

赵垒, 辛金元, 杨磊库, 等. 2020. Himawari-8 气溶胶光学厚度产品的验证分析 [J]. 大气科学, 44(3): 455–471. ZHAO Lei, XIN Jinyuan, YANG Leiku, et al. 2020. Validation Analysis of Himawari-8 Aerosol Optical Depth Products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 455–471. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.19102

Himawari-8 气溶胶光学厚度产品的验证分析

赵垒^{1,2} 辛金元² 杨磊库¹ 司瑞瑞² 刘光静²

1 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南焦作 454000

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 Himawari-8 是由日本气象局发射的新一代静止气象卫星, 其搭载的传感器 AHI (Advanced Himawari Imager) 可实现 10 min/次的高时间分辨率对地观测。本文将 2015 年 9 月至 2017 年 12 月 Himawari-8 卫星 Level-2 气溶胶光学厚度 (AOD) 产品与 AERONET (AErosol RObotic NETwork) 70 个站点的地基观测数据进行对比验证分析, 结果表明 Himawari-8 卫星反演的气溶胶光学厚度产品的精度存在很大的空间上的差异性, 其中有 48 个站点 Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 之间存在较好的相关性 ($R>0.5$), 有 22 个站点 Himawari-8 卫星反演气溶胶光学厚度产品存在明显的低估现象。在 American_Samoa、Bandung、Birdsville、Bukit_Kototabang、Canberra、Fowlers_Gap、Jabiru 以及 QOMS_CAS 等站点出现地基观测值很小而卫星反演的气溶胶光学厚度较大的情况。对绝对误差 (Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 的差) 进行分析发现 Himawari-8 AOD 存在低估现象时绝对误差与 AERONET AOD 之间存在较好的相关性; 在地基观测值很小而 Himawari-8 卫星反演 AOD 较大的地区绝对误差与 Himawari-8 AOD 之间存在较好的线性关系, 这为 Himawari-8 AOD 反演算法的改进与完善提供了有用的研究发现。

关键词 Himawari-8 卫星 气溶胶光学厚度 验证

文章编号 1006-9895(2020)03-0455-17

中图分类号 P407

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1906.19102

Validation Analysis of Himawari-8 Aerosol Optical Depth Products

ZHAO Lei^{1,2}, XIN Jinyuan², YANG Leiku¹, SI Rui², and LIU Guangjing²

1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan Province 454000

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Himawari-8 is a new generation of geostationary meteorological satellites launched by the Japan Meteorological Administration. The advanced Himawari imager (AHI) sensor carried by Himawari-8 can achieve a high temporal resolution observation for 10 min/time. Level-2 aerosol optical depth (AOD) dataset from Himawari-8 satellite was compared with AERONET (AErosol RObotic NETwork) AOD at 70 sites from September 2015 to December 2017.

收稿日期 2019-01-07; 网络预出版日期 2019-06-20

作者简介 赵垒, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶光学特性研究。E-mail: zhaolei@dq.cern.ac.cn

通讯作者 辛金元, E-mail: xjy@mail.iap.ac.cn; 杨磊库, E-mail: yanglk@hpu.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFC0202001, 国家自然科学基金项目 41375036, 河南省科技攻关项目 162102310089, 河南省自然科学基金面上项目 182300410113, 河南理工大学博士基金 B2016-14、B2017-08

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFC0202001), National Natural Science Foundation of China (Grant 41375036), Henan Province's Scientific and Technological Research (Grant 162102310089), Henan Provincial Natural Science Foundation Project (Grant 182300410113), Doctoral Foundation of Henan Polytechnic University (Grants B2016-14, B2017-08)

The results show that the precision of AOD products retrieved by Himawari-8 satellite has a large spatial difference. Among them, 48 sites feature a good correlation between Himawari-8 AOD and AERONET AOD ($R > 0.5$). The Himawari-8 AOD clearly underestimates the ground-based AOD at 22 sites. At some sites, including American_Samoa, Bandung, Birdsville, Bukit_Kototabang, Canberra, Fowlers_Gap, Jabiru, and QOMS_CAS, ground-based AODs are small and Himawari-8 satellite-retrieved AOD is large. Analysis of the absolute error (the difference between Himawari-8 AOD and AERONET AOD) shows that a good correlation exists between absolute error and AERONET AOD when the Himawari-8 AOD underestimates ground-based observations. In areas where ground-based observations are small and satellite inversion data are large, a good linear relationship exists between absolute error and Himawari-8 AOD. This provides useful basic information for the improvement and perfection of the Himawari-8 AOD inversion algorithm.

Keywords Himawari-8 satellite, Aerosol optical depth, Validation

1 引言

大气气溶胶是指均匀分散于大气中的固体微粒和液体微粒所构成的稳定混合体系（张婕等, 2016）。大气中的气溶胶含量相对较少，但它在大气过程中所起的作用却不容忽视，影响着地球的生态系统和全球气候变化，导致大气能见度下降，灰霾天增加，并对人类的健康造成严重的威胁（任丽新等, 1999; Mahowald, 2011）。气溶胶光学厚度（AOD）指沿辐射传输路径由气溶胶吸收和散射作用对辐射产生的总削弱（盛裴轩等, 2003），其作为初始值是研究大气辐射效应的关键因子，并且可表征大气环境的污染程度（Luo et al., 2000）。目前，气溶胶光学厚度的获取有两种途径：地基观测和卫星反演。气溶胶光学厚度的地基观测主要依靠 CE318 自动跟踪太阳光度计、MicroTops-II 手持太阳光度计等常规仪器（辛金元, 2007）。但是地基监测仪器普遍较贵，仪器的操作和维护过程比较繁琐，因此这种常规观测只能在有限的观测站点进行，无法满足连续、长时间、动态监测大范围环境污染和及时获取气溶胶时空分布特征的要求（许研等, 2016）。随着卫星遥感反演技术的快速发展，由于可以进行长时间连续观测，覆盖范围大等优势，卫星反演观测弥补了地基观测站点不足的问题，成为监测区域和全球 AOD 时空分布的有效方法（Engel-Cox et al., 2004）。目前卫星反演的气溶胶产品虽然能达到一定的精度水平，但由于反演过程中受到各种因素的影响，例如下垫面类型、气溶胶类型、高云等，很难对其反演的误差进行控制，这使得卫星反演算法需要依靠地面同步的地基观测数据来进行验证，以便进一步的校正和完善卫星反演方法（王新强等, 2003; 李晓静等, 2009）。

近年来，卫星反演气溶胶光学厚度技术越发成熟，各种传感器和反演方法先后被应用，如 MODIS、

VIIRS、MISR、CALIOP 等传感器，如暗像元法、深蓝算法、结构函数法、多角度多通道反演法、偏振反演法等反演方法。由于以上传感器都搭载在太阳同步轨道卫星上，所以每天最多只能获取 2 个有效数据，较低的时间分辨率使太阳同步轨道卫星反演的数据资料很难用来研究气溶胶光学厚度的日变化情况。因此，利用空间分辨率比地基观测大、时间分辨又比太阳同步轨道卫星高的地球同步卫星来反演气溶胶光学厚度就具有了重要的意义（高玲等, 2012; 陈洪滨等, 2018）。日本最新一代 Himawari-8 地球同步轨道气象卫星于 2014 年 10 月 7 日在日本种子岛航天中心发射成功。Himawari-8 是世界上第一颗可以拍摄彩色图像的静止气象卫星（<http://www.chinanews.com/gj/2015/07-07/7389254.shtml> [2019-04-03]），每 10 分钟可生成一个全盘图像并以 2.5 分钟的时间间隔快速扫描日本和目标区域，可提供高时间分辨率的气溶胶光学厚度产品（Yu and Wu, 2016）。但其反演产品的适用性及可靠性如何尚不清楚，所以对其气溶胶光学厚度产品进行验证是非常有必要的。目前，已有研究人员对 Himawari-8 气溶胶光学厚度产品进行了验证（葛邦宇等, 2018; Yan et al., 2018; Yang et al., 2018）。但他们的研究均以单个或几个站点进行验证分析，没有对其进行大范围多站点的研究。本研究利用 2015 年 9 月至 2017 年 12 月 70 个站点 AERONET（AErosol RObotic NETwork）地基观测数据对 Himawari-8 卫星反演的气溶胶光学厚度数据进行了对比验证，并对其反演精度及可靠性进行了分析，为卫星反演算法的改正完善提供有效资料。

2 数据与方法

2.1 卫星数据

Himawari-8 静止气象卫星于 2015 年 7 月正式投入使用，卫星轨道高度约 35800 km，主要搭载

的传感器是高级成像仪 (AHI), 其具有与新一代静止环境观测卫星-R 的高级基线成像仪相媲美的能力 (Bessho et al., 2016)。AHI 设备包含可见光至红外共 16 个通道, 其中 3 个可见光通道, 3 个近红外通道和 10 个红外通道, 最高空间分辨率为 500 m (Yumimoto et al., 2016)。Himawari-8 提供的全球气溶胶产品有两种: 10-min (Level-2) 和 1-h (Level-3), 其空间分辨率均为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 。基于 Higurashi and Nakajima (1999) 以及 Fukuda et al. (2013) 的研究方法, 首先通过在目标函数中引入每个通道的权重, 自动选择用于气溶胶反演的最佳通道; 然后在陆地和海洋上设置通用的候选气溶胶模型; 最后在 300~2500 nm 波长范围内每 1 nm 编制一次查找表, 并使用每个传感器的响应函数对辐射进行加权以获得 Himawari-8 卫星气溶胶光学厚度产品。在反演过程中, 使用为 GOSAT/CAI、GCOM-C/SGLI 和 Earth CARE/MSI 仪器开发的云检测算法来筛选晴空像素 (Ishida and Nakajima, 2009; Ishida et al., 2011)。剔除可见通道中大气顶层反射率随时间或空间显著改变的像素。为了减小可见光到近红外波长处的气体吸收的影响, 对各通道处大气顶层的反射率进行了纠正。对臭氧和水蒸气进行气体校正, 因为它们的量随时间和位置显著变化。Yoshida et al. (2018) 给出了反演算法细节的具体描述。本研究所用的是 Himawari-8 Level-2 气溶胶光学厚度产品, 该产品通过地球观测研究中心和日本宇宙航空研究开发机构的 P-Tree 系统编写发布, 用户经过注册可免费进行下载 (<http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html> [2019-04-03])。

2.2 地基数据

全球自动观测网 AERONET 是由美国 NASA 和法国 LOA-PHOTONS 联合建立的地基气溶胶观测网, 目前全球共有 600 多个观测站点, 为气溶胶光学, 微物理和辐射特性提供了长期, 连续且易于获取的数据资料, 主要用于气溶胶特性研究, 卫星反演验证以及与其他数据库的协同作用等 (Kaufman and Gao, 1992)。AERONET AOD 的观测误差为 0.01~0.02, 可以将 AERONET 的观测值作为真实值对卫星反演气溶胶产品的精度进行验证和评估。AERONET 官方提供了三种质量等级的气溶胶光学厚度产品: Level 1.0 (原数据)、Level 1.5 (云掩膜数据) 和 Level 2.0 (云掩膜和质量控制数据) (王宏斌等, 2016)。本研究所用的地基

观测数据选取的是 AERONET Level 2.0 的 AOD 数据 (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> [2019-04-03])。Himawari-8 提供的气溶胶光学厚度数据波段为 500 nm, 但 AERONET 发布的数据没有 500 nm 的气溶胶光学厚度数据, 所以本研究利用 AERONET 提供的其它波段 (440 nm、675 nm、870 nm、1020 nm) 的气溶胶光学厚度数据采用二次多项式拟合算法求得其 500 nm 的气溶胶光学厚度值 (Eck et al., 1999)。

2.3 时空匹配方法

地基气溶胶光学厚度资料为空间上固定观测站按照固定的时间间隔采集的数据, 而卫星反演的气溶胶光学厚度是以分辨率大小为观测单元的空间上的瞬时观测数据。简单的利用卫星拍摄时间点的地基观测值与单个卫星像元值进行对比, 就是用空间上某一点的气溶胶光学厚度值与几十平方公里空间范围内的气溶胶光学厚度的均值作比较, 很显然这种比较缺乏可信度 (Wong et al., 2015)。因此, 需要寻找一种稳定可靠的时空匹配方法。基于前人多年的研究, 本研究选取以下方法进行匹配验证。

选取晴空下的 AERONET 地基观测数据和 Himawari-8 卫星反演数据进行时空匹配, Himawari-8 Level-2 气溶胶光学厚度产品的空间分辨率为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$, 卫星数据选取以地基观测站点为中心 5×5 格点上所有气溶胶光学厚度数据的均值, 匹配的地面资料选取卫星拍摄前后 30 分钟内 AERONET 观测数据的均值。具体统计时还要求卫星数据在所选 25 个格点上至少 5 个格点有有效数据, 地基观测站在卫星拍摄前后 30 分钟内至少有 2 个观测数据, 否则不能满足时空匹配要求 (Mattar et al., 2011)。

3 站点分布

Himawari-8 静止气象卫星星下点位于 140.7°E 的赤道上空, 覆盖了全球三分之一的区域 (Shang et al., 2017)。Himawari-8 提供的气溶胶光学厚度数据的经纬度范围为 ($60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$, $80^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{W}$)。2015 年 9 月至 2017 年 12 月期间, 地基观测网 AERONET 在此范围内共筛选出 70 个站点, 站点分布并不均匀, 主要分布在日本群岛、韩国、印度尼西亚群岛、中国和澳大利亚。图 1 给出了站点的具体分布图。所有站点的地理位置信息都描述在表 1 中。

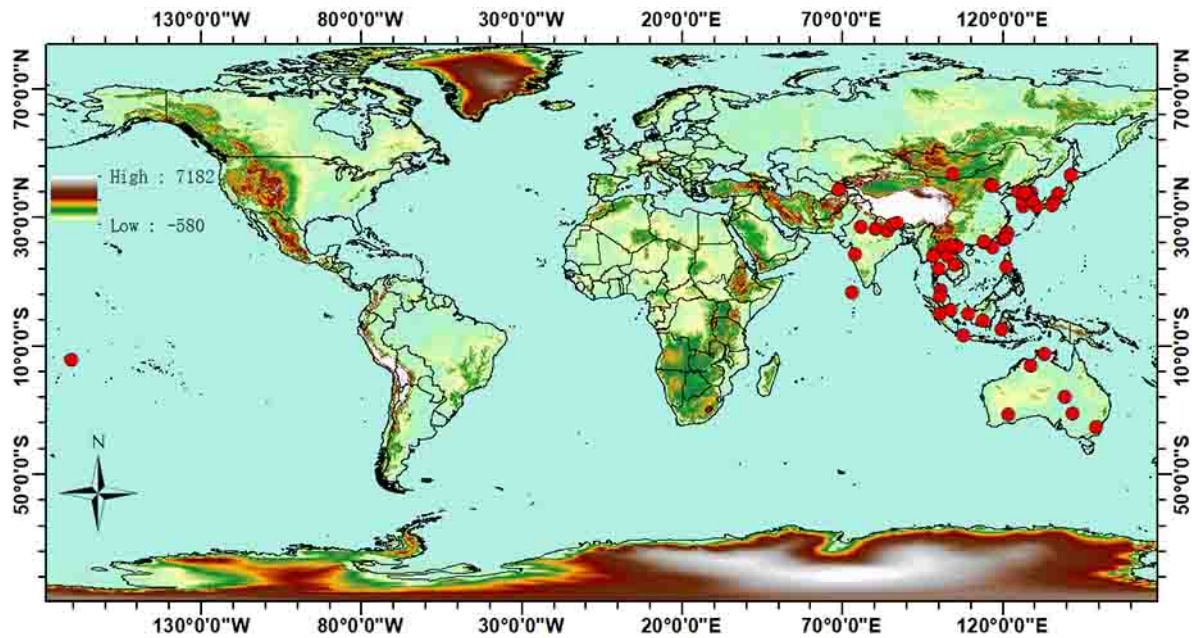


图1 AERONET 观测站点分布

Fig. 1 AERONET observation site distribution

表1 AERONET观测站点地理位置信息

Table 1 AERONET observation site geographic information

序号	站点	经度	纬度	高程/m	国家或地区	地理类型
1	Alishan	120.813°	23.508°	2416	中国	山区
2	American_Samoa	189.436°	-14.247°	76	美国	岛屿
3	Anmyon	126.330°	36.539°	47	韩国	乡村
4	Baengnyeong	124.630°	37.966°	136	韩国	岛屿
5	Bamboo	121.535°	25.187°	1050	柬埔寨	岛屿
6	Bandung	107.610°	-6.888°	826	印度尼西亚	高原盆地城市
7	Beijing	116.381°	39.977°	92	中国	超大城市
8	Beijing-CAMS	116.317°	39.933°	106	中国	超大城市
9	Birdsville	139.346°	-25.899°	46	澳大利亚	小镇
10	Bukit_Kototabang	100.318°	-0.202°	864	印度尼西亚	热带森林种植园
11	Canberra	149.111°	-35.271°	600	澳大利亚	谷地
12	Chen-Kung_Univ	120.217°	23.000°	50	中国台湾	学校
13	Chiang_Mai_Met_Sta	98.972°	18.771°	312	泰国	山谷城市
14	Chiayi	120.496°	23.496°	27	中国台湾	学校
15	Dalanzadgad	104.419°	43.577°	1470	蒙古国	峡谷
16	Dongsha_Island	116.729°	20.699°	5	中国	岛屿
17	Douliu	120.545°	23.712°	60	中国台湾	乡镇
18	Dushanbe	68.858°	38.553°	821	塔吉克斯坦	新兴城市
19	EPA-NCU	121.185°	24.968°	144	美国	环保局
20	Fowlers_Gap	141.701°	-31.086°	181	澳大利亚	干旱区观测站
21	Fuguei_Cape	121.538°	25.297°	15	中国台湾	海岬
22	Fukuoka	130.475°	33.524°	30	日本	城郊
23	Gandhi_College	84.128°	25.871°	60	印度	学校
24	Gangneung_WNU	128.867°	37.771°	60	韩国	学校

续表 1

序号	站点	经度	纬度	高程/m	国家或地区	地理类型
25	Gosan_SNU	126.162°	33.292°	72	韩国	城区
26	Hankuk_UFS	127.266°	37.339°	167	韩国	学校
27	Hokkaido_University	141.341°	43.075°	59	日本	学校
28	Hong_Kong_PolyU	114.180°	22.303°	30	中国香港	学校
29	Hong_Kong_Sheung	114.117°	22.483°	40	中国香港	城区
30	Jabiru	132.893°	-12.661°	30	澳大利亚	公园
31	Jaipur	75.806°	26.906°	450	印度	古城
32	Kanpur	80.232°	26.513°	123	印度	工商业城市
33	Kathmandu-Bode	85.390°	27.680°	1360	尼泊尔	古城
34	KORUS_Baeksa	127.56°	37.412°	64	韩国	海滩
35	KORUS_Daegwallyeong	128.759°	37.687°	837	韩国	牧场
36	KORUS_Iksan	127.005°	35.962°	84	韩国	城市
37	KORUS_Kyungpook_NU	128.606°	35.890°	65	韩国	学校
38	KORUS_Mokpo_NU	126.437°	34.913°	26	韩国	学校
39	KORUS_NIER	126.640°	37.569°	26	韩国	环境研究所
40	KORUS_Olympic_Park	127.124°	37.522°	45	韩国	公园
41	KORUS_Songchon	127.489°	37.338°	90	韩国	城市
42	KORUS_Taehwa	127.310°	37.312°	152	韩国	森林
43	KORUS_UNIST_Ulsan	129.19°	35.582°	106	韩国	科技研究所
44	Lake_Argyle	128.749°	-16.108°	150	澳大利亚	湖泊
45	Lake_Lefroy	121.705°	-31.255°	300	澳大利亚	湖泊
46	Luang_Namtha	101.416°	20.931°	557	老挝	盆地城市
47	Lulin	120.874°	23.469°	2868	中国	城市
48	Makassar	119.572°	-4.998°	16	印度尼西亚	岛屿城市
49	Manila_Observatory	121.078°	14.635°	63	菲律宾	天文台观测站
50	MCO-Hanimaadhoo	73.183°	6.776°	0	马尔代夫	气候观测台
51	NGHIA_DO	105.800°	21.048°	40	越南	城市
52	Nong_Khai	102.717°	17.877°	175	泰国	城市
53	Noto	137.137°	37.334°	200	日本	半岛
54	Omkoi	98.432°	17.798°	1120	泰国	县城
55	Osaka	135.591°	34.651°	50	日本	工商业城市
56	Palangkaraya	113.946°	-2.228°	27	印度尼西亚	城市
57	Pontianak	109.191°	0.075°	2	印度尼西亚	城市
58	Pune	73.805°	18.537°	559	印度	丘陵城市
59	Pusan_NU	129.083°	35.235°	71	韩国	港口城市
60	QOMS_CAS	86.948°	28.365°	4276	中国	珠穆拉玛峰观测站
61	Seoul_SNU	126.951°	37.458°	116	韩国	学校
62	Shirahama	135.357°	33.693°	10	日本	沿海城市
63	Silpakorn_Univ	100.041°	13.819°	72	泰国	学校
64	Singapore	103.780°	1.298°	30	新加坡	城市
65	Son_La	103.905°	21.332°	683	越南	山区
66	Songkhla_Met_Sta	100.605°	7.184°	15	泰国	古城
67	Ubon_Ratchathani	104.871°	15.246°	120	泰国	城市
68	USM_Penang	100.302°	5.358°	51	马来西亚	学校
69	XiangHe	116.962°	39.754°	36	中国	城郊
70	Yonsei_University	126.935°	37.564°	88	韩国	学校

4 验证结果

本研究共选取了 70 个 AERONET 站点数据对 Himawari-8 AOD Level-2 产品进行验证分析, 图 2

为 Himawari-8 卫星反演气溶胶光学厚度数据与 NASA 发布的 AERONET 气溶胶光学厚度标准产品对比结果散点图。从图中可以看出在不同站点 Himawari-8 卫星反演产品的精度存在较大的差异性,

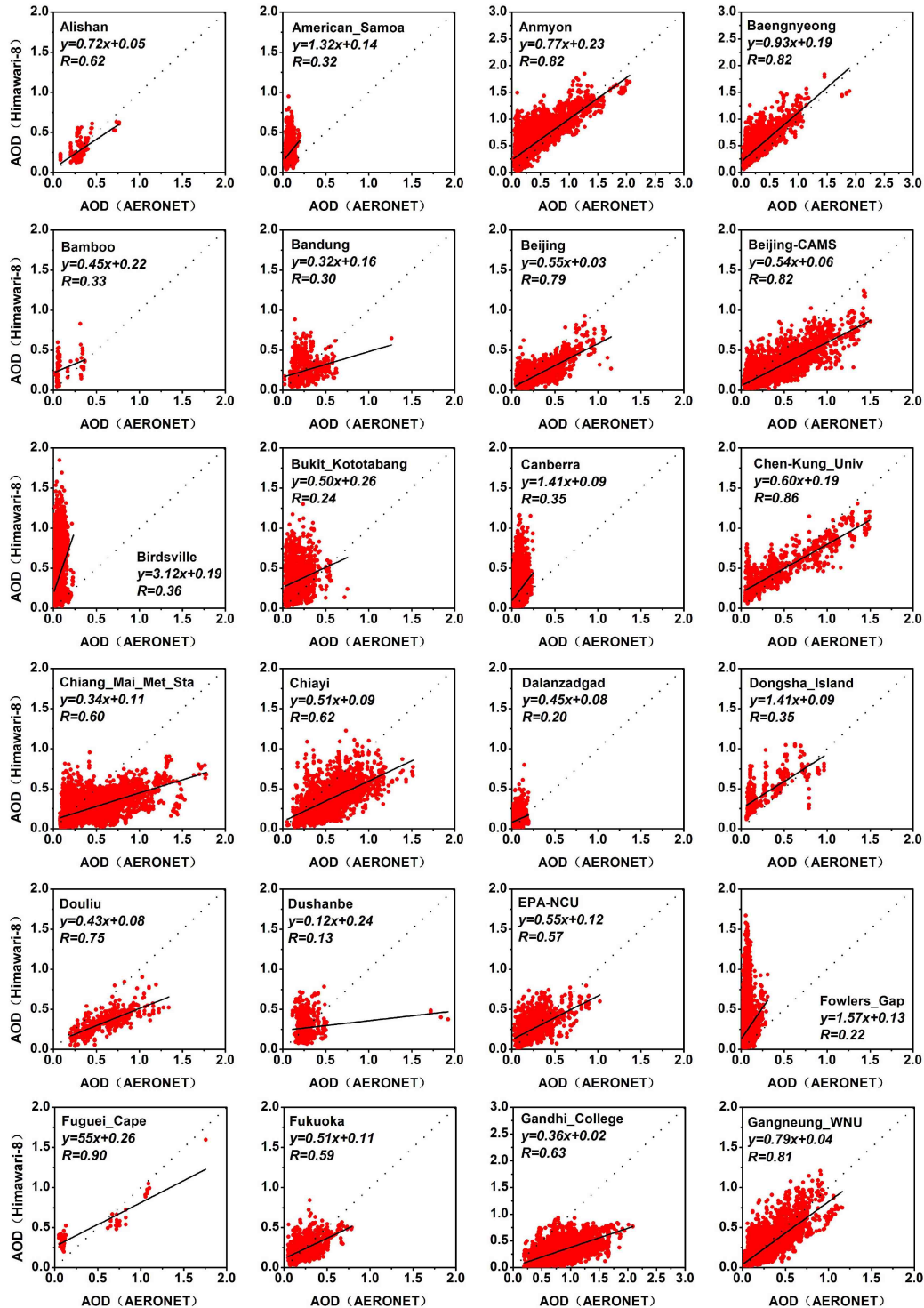


图 2 70 个站点 Himawari-8 卫星反演 AOD 与 AERONET AOD 的对比验证散点图

Fig. 2 Scatterplot of AERONET ground-based AOD and Himawari-8 satellite-retrieved AOD at 70 sites

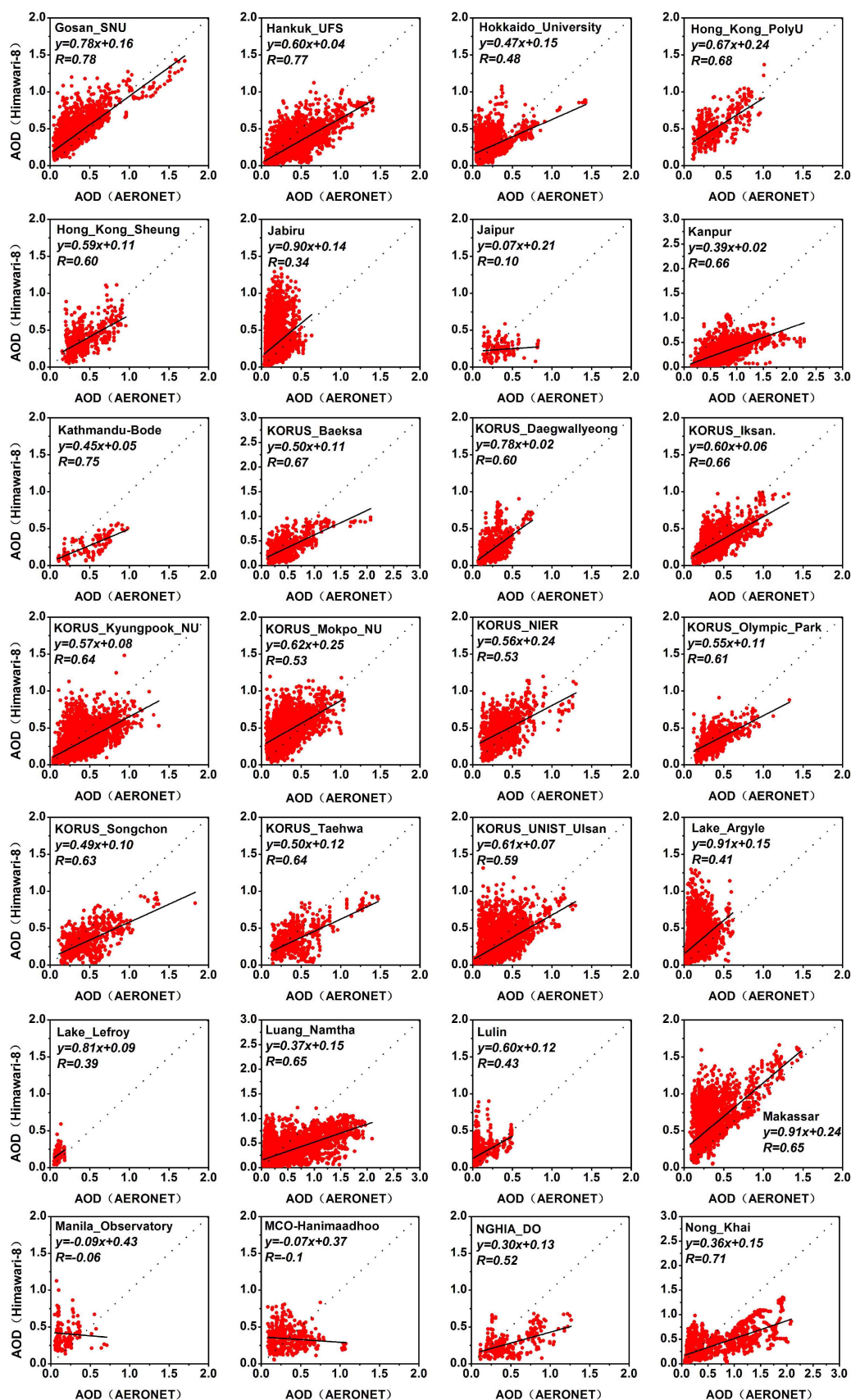


图 2 (续)

Fig. 2 (Continued)

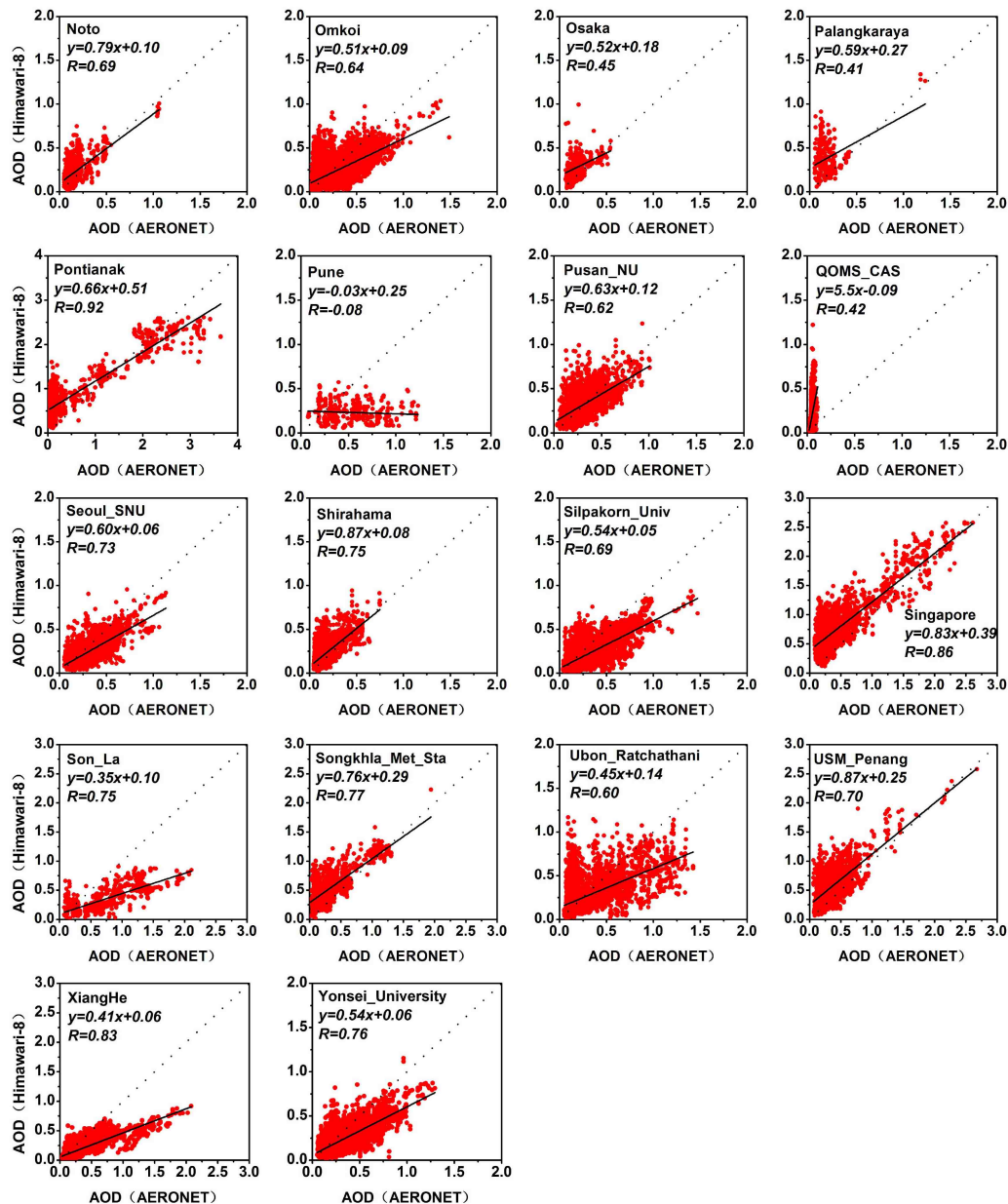


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

这可能是受地球同步卫星的高轨道高度的影响且与卫星反演算法, 地表反射率及气溶胶类型等因素有关。整体来说, 在大多数站点 Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 之间具有较好的相关性, 尤其是 Pontianak、Chen-Kung_Univ、Singapore、Anmyon、Baengnyeong、Beijing-CAMS、Gangneung_WNU、XiangHe 等站点, 两个数据集的相关性均大于 0.8。虽然 Fuguei_Cape 站 Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 之间的相关系数为 0.9, 但其数据量较少, 并不具有代表性。在 American_Samoa、

Bandung、Birdsville、Bukit_Kototabang、Canberra、Fowlers_Gap、Jabiru、QOMS_CAS 等站点出现地基观测值很小而卫星反演的气溶胶光学厚度较大的情况。American_Samoa 位于太平洋中部偏西南方的美属萨摩亚群岛, 由死火山形成, 四周环绕着珊瑚礁。Bandung 是印度尼西亚西爪哇省首府, 位于爪哇岛西部火山群峰环抱的高原盆地中。Birdsville 在澳大利亚的伯兹维尔小镇上, 位于辛普森沙漠的边缘, 气候非常干旱。Bukit_Kototabang 位于印度尼西亚西苏门答腊岛,

周围主要由热带森林种植园组成 (Nurhayati and Nakajima, 2012)。Canberra 位于澳大利亚东南部山脉区的开阔谷地上, 属于亚热带季风性湿润气候, 是热带海洋气团和极地大陆气团交替控制和互相角逐交绥的地带。Fowlers_Gap, 福勒峡干旱区观测研究站, 属澳大利亚的新南威尔士州, 福勒峡区覆盖了布罗肯希尔北部障碍区及其周围的干旱牧场。Jabiru 位于被列于世界遗产名录的卡卡杜澳大利亚国家公园内, 靠近风景秀丽的阿纳姆地悬崖。QOMS_CAS, 中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站, 其气溶胶特征反映了高山大气背景状况 (Xu et al., 2014)。地基观测是在单个站点的观测, 但卫星观测是区域观测, 在以上 8 个站点地基观测的气溶胶光学厚度虽然较小, 但卫星值是包括地基站点周围复杂地形下大的气溶胶光学厚度在内的平均值, 这可能就会造成地基观测值很小而卫星反演的气溶胶光学厚度较大的情况。

Jaipur, 拉贾斯坦邦首府, 印度北部的一座古城, 属热带季风气候, 年降雨量超过 2300 mm。Manila_Observatory, 马尼拉天文台, 于 1865 年由菲律宾耶稣会特派团成立, 它可以系统地观测菲律宾的天气。Pune 位于印度马哈拉施特拉邦, 其西边为德干高原, 这是一个丘陵城市, 属于炎热的半干旱气候。在 Jaipur、Manila_Observatory、MCO-Hanimaadhoo、Pune 四个站点, 卫星反演气溶胶光学厚度在地基观测值较大时仍然较小, 这可能是由于卫星反演算法中气溶胶类型不适用的原因。在气溶胶光学厚度比较高的情况下, 气溶胶模式误差将占主导地位 (吴序鹏等, 2012)。在 Beijing、Beijing-CAMS、Chiang_Mai_Met_Sta、Gandhi_College、Kanpur、KORUS_Baeksa、Kathmandu-Bode、KORUS_Iksan、KORUS_Mokpo_NU、KORUS_Olympic_Park、KORUS-Taehwa、KORUS_Songchon、Luang_Namtha、Omkoil、Nong_Khai、NGHIA_DO、Pusan_NU、Seoul_SNU、Silpakorn_Univ、Son_La、XiangHe 和 Yonsei_University 站点, Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 之间虽然相关性较好 ($R>0.50$), 但两个数据集的线性回归方程的斜率较小, 这说明 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度在这些站点存在明显的低估现象。这可能是受地球同步卫星的高轨道高度和传感器的灵敏度的影响导致其反演产品存在系统偏差, 需要对其误差来源进行研究。就 Himawari-8 静止气象卫星反演的气

溶胶光学厚度产品的可靠性及适用性而言, 在 Anmyon、Baengnyeong、Chen-Kung_Univ、Gangneung_WNU、Gosan_SNU、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung、Shirahama、Singapore、USM_Penang 和 Songkhla_Met_Sta 站点, Himawari-8 卫星反演的气溶胶光学厚度产品具有较好的结果。在卫星反演气溶胶光学厚度的过程中, 受地表反照率、气溶胶类型的不同以及当地环境等因素的影响所造成的实际误差难以控制, Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度产品确实存在极大的空间上的不确定性。

5 误差分析

从图 2 中我们得知 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度产品存在空间上的差异性, 因此对其误差来源进行分析就显得十分重要。图 3 分别给出了绝对误差 (Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 的差值) 与 AERONET AOD、Himawari-8 AOD 的关系热点图。从图中可以看出, 在 Beijing、Beijing-CAMS、Chen-Kung_Univ、Douliu、Gandhi_College、Jaipur、Kanpur、Kathmandu-Bode、KORUS_Baeksa、KORUS_Songchon、KORUS-Taehwa、Luang_Namtha、MCO-Hanimaadhoo、NGHIA_DO、Nong_Khai、Pontianak、Pune、Silpakorn_Univ、Son_La、Ubon_Ratchathani、XiangHe 和 Yonsei_University 站点, 绝对误差与 AERONET AOD 之间存在较好的线性关系且两者之间的相关性较好 ($R^2>0.4$; R^2 为相关系数)。从图 2 可以看出以上站点 Himawari-8 卫星反演 AOD 存在明显的低估现象, 从地基观测值可看出这些地区气溶胶光学厚度值较大且两个 AOD 数据集的零点相差较小 (截距 $B<0.25$), 这说明 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度在以上站点存在可校正的跨度误差, 即可直接通过绝对误差与 AERONET AOD 之间存在的线性关系 ($y=-Ax+B$; A 为斜率) 对 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度数据进行校正。在 American_Samoa、Birdsville、Bukit_Kototabang、Canberra、Dalanadgad、Fowlers_Gap、Jabiru、Lake_Argyle、Lake_Lefroy、Lulin、Makassar、Manila_Observatory、MCO-Hanimaadhoo 和 QOMS_CAS 站点, 两个数据集的绝对误差与 Himawari-8 AOD 之间存在极好的线性关系 ($y=Ax+B$) 且两者之间存在较好的相关性, 尤其是在澳大利亚地区的 Birdsville、Canberra、Fowlers_Gap、Jabiru、Lake_Argyle 和

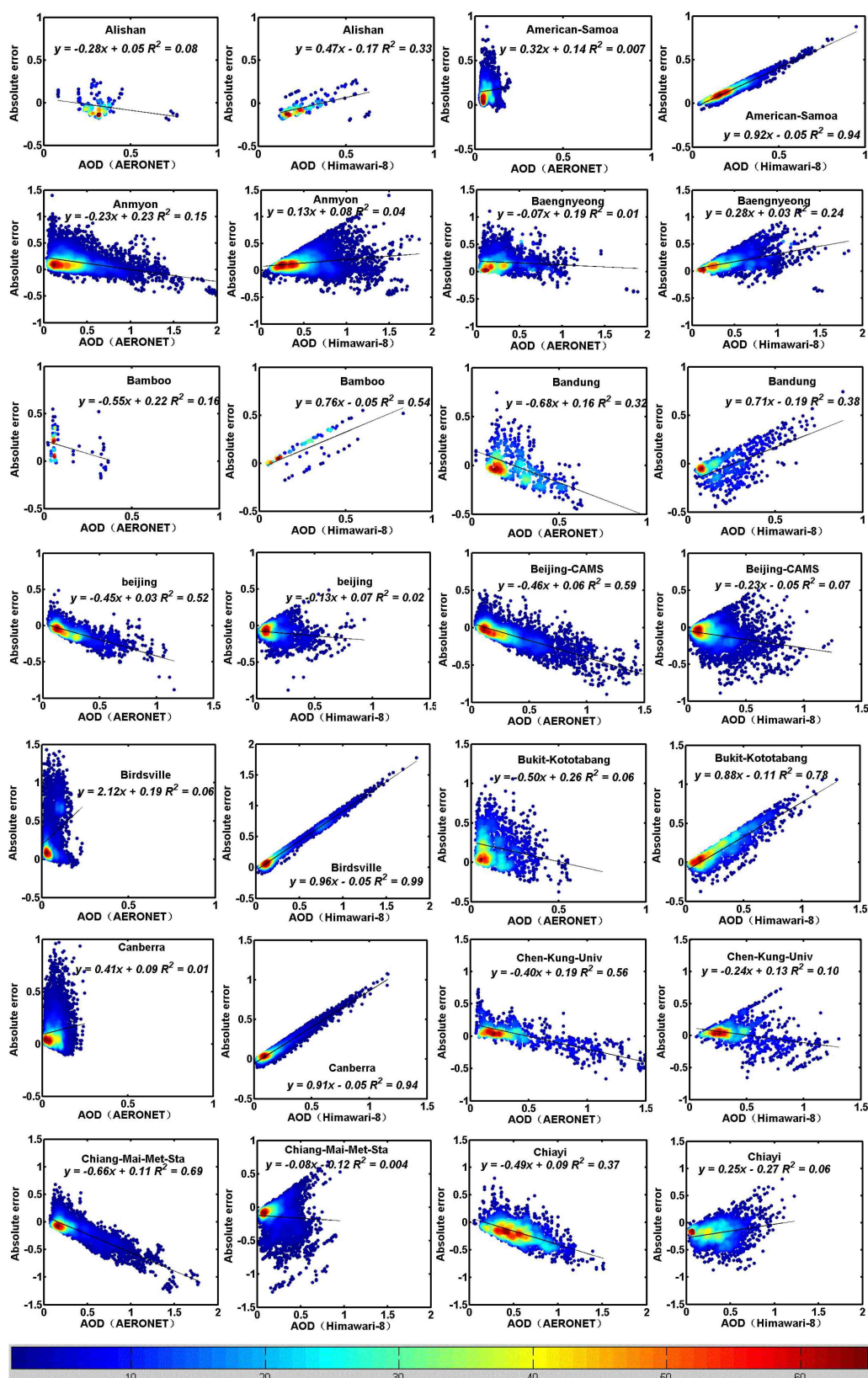


图3 70个站点 AOD 绝对误差 (Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 的差值) 与 AERONET 及 Himawari-8 AOD 的关系热点图, 颜色表示不同区间内数据对的数量

Fig. 3 Heat map of the relationship between AOD absolute error (difference between Himawari-8 AOD and AERONET AOD) and AERONET and Himawari-8 AOD at the 70 sites. Colored dots represent the number of ordered pairs in different intervals

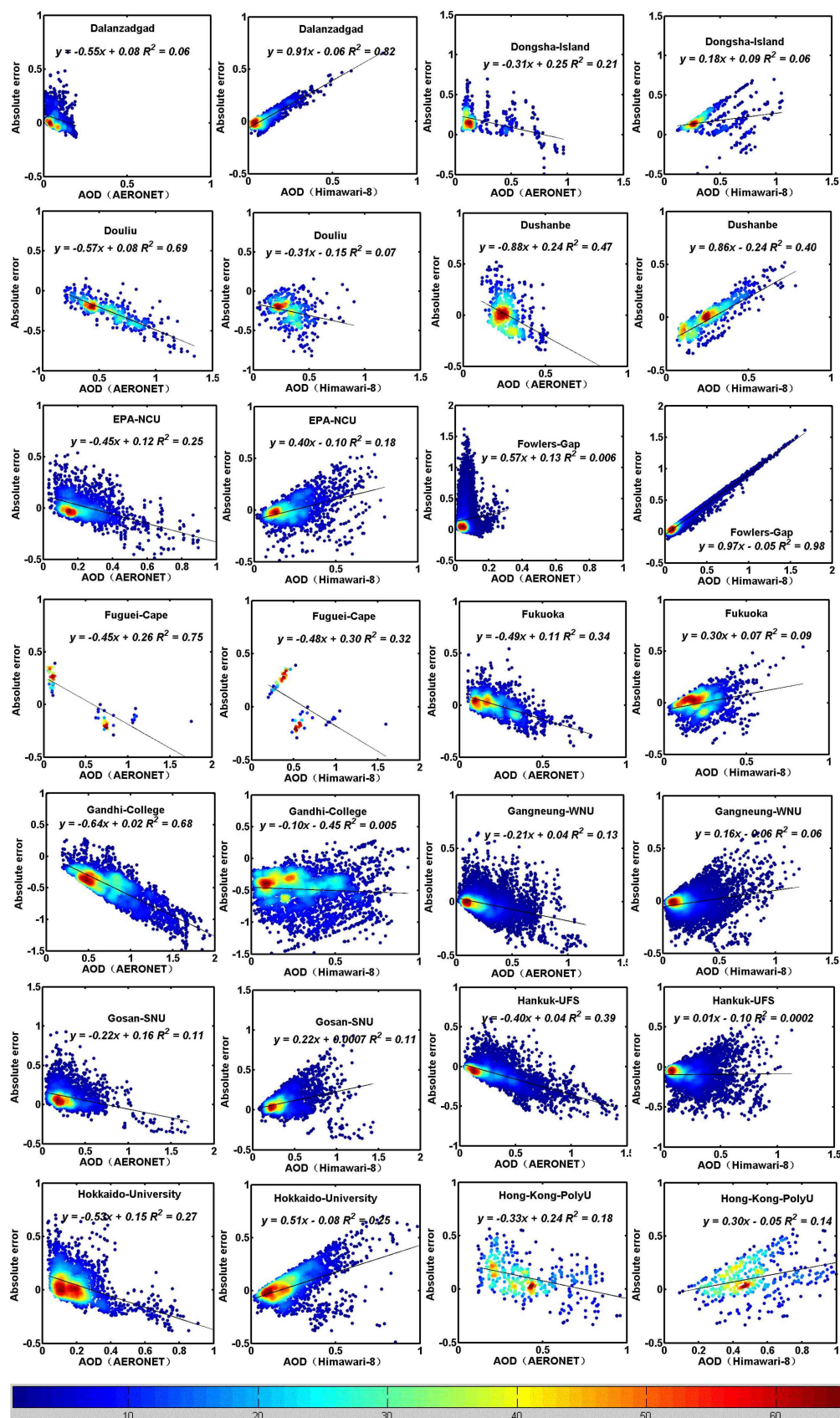


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

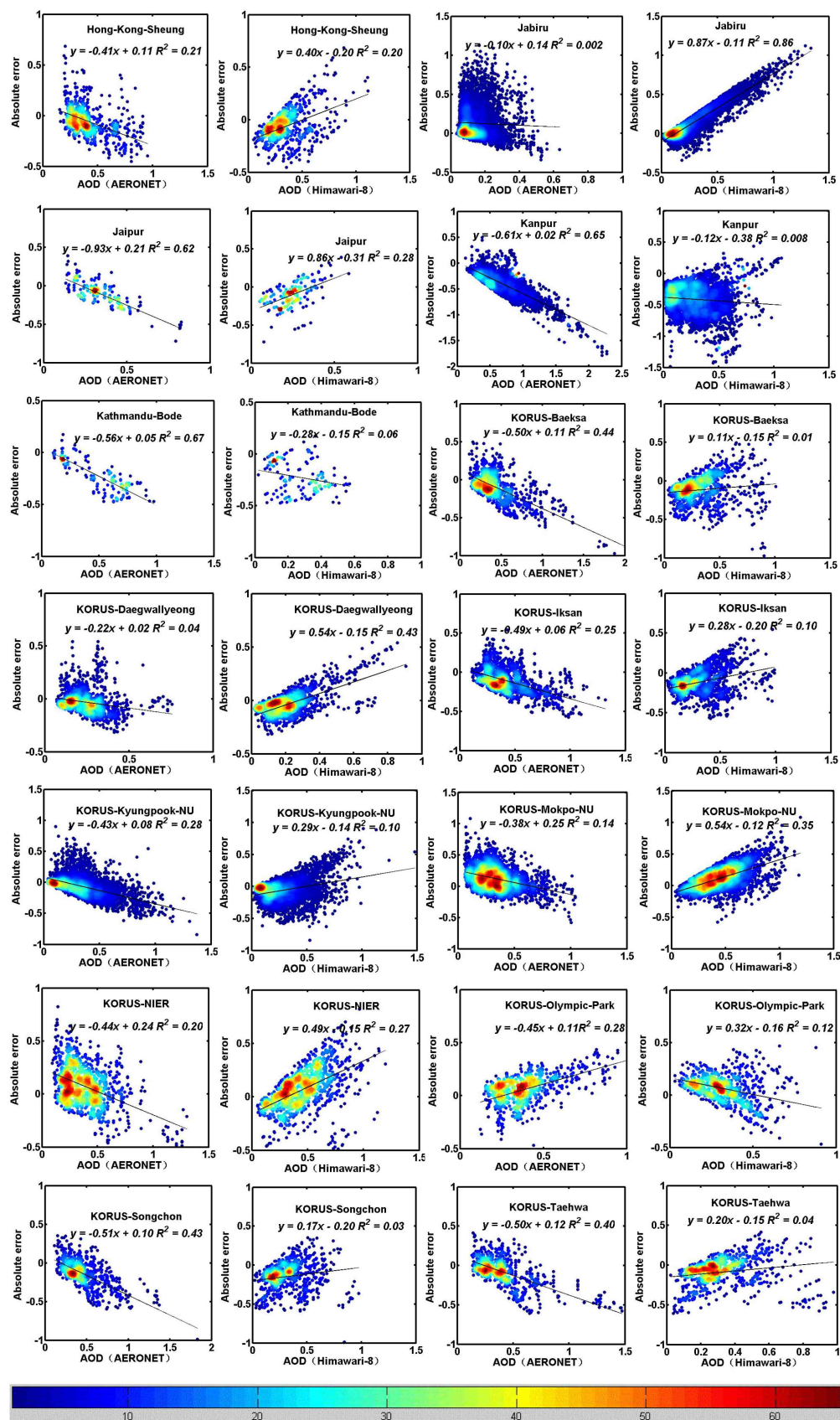


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

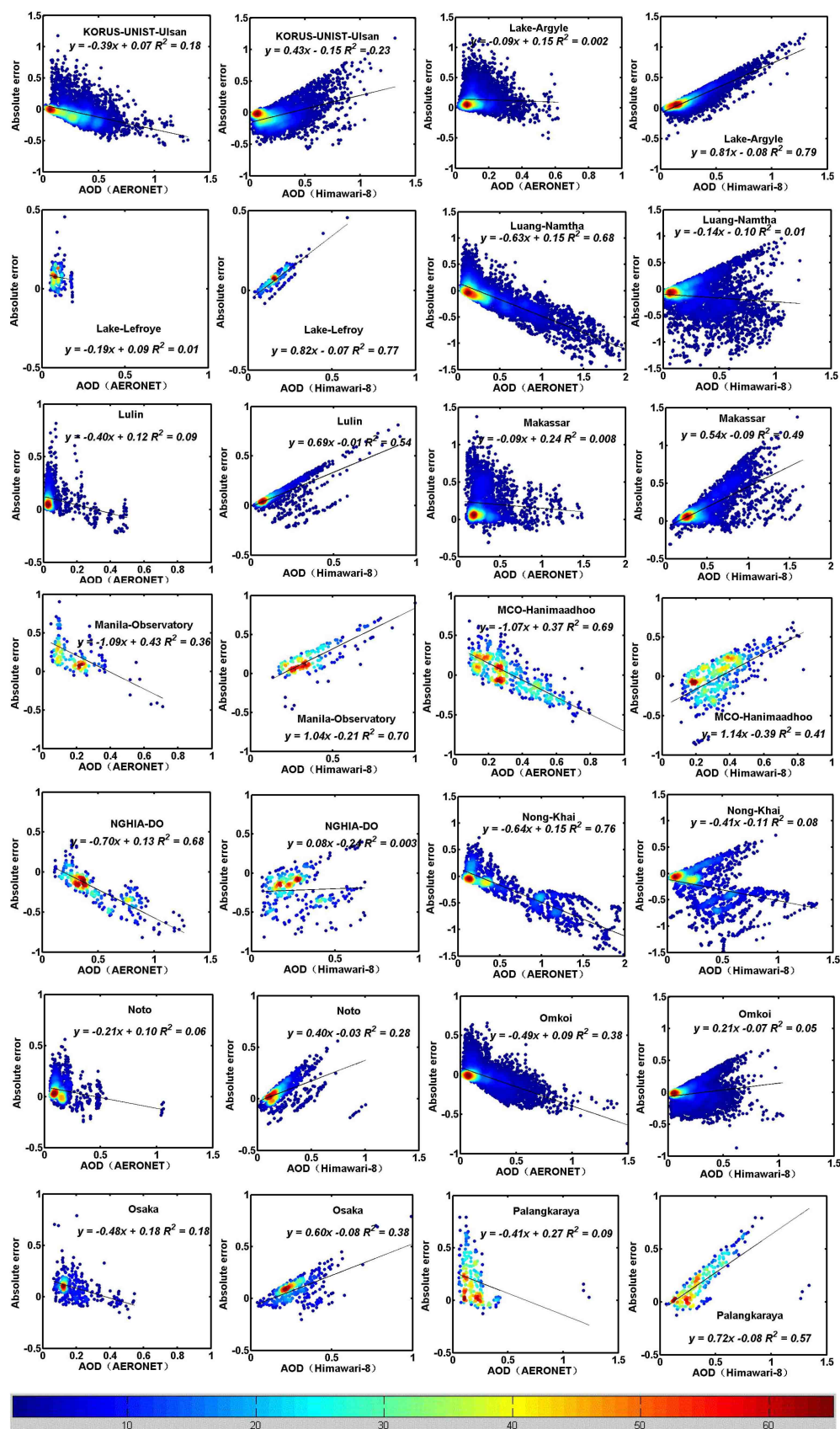


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

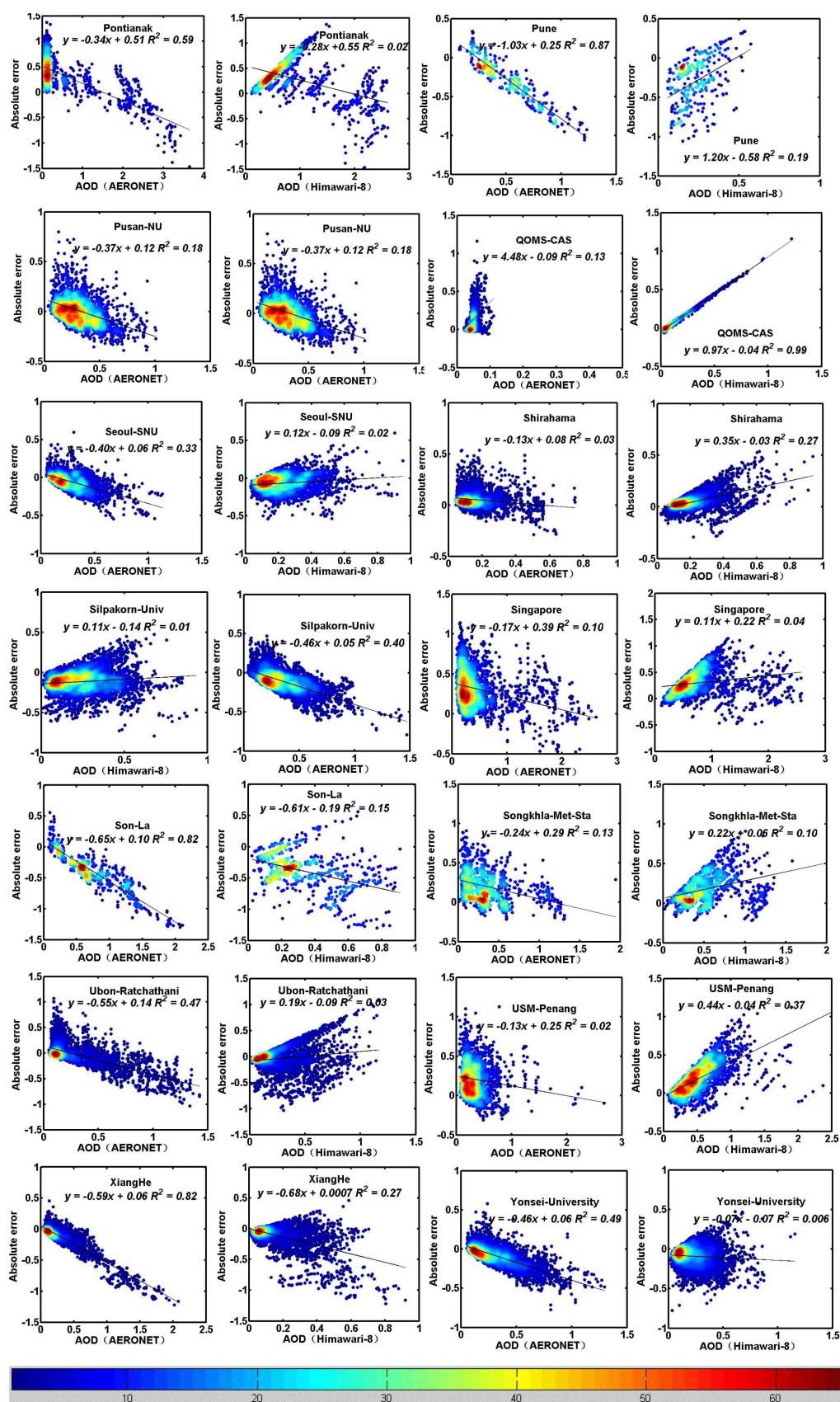


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

Lake_Lefroy 站点, 绝对误差与 Himawari-8 AOD 存在极好的相关系数 ($R^2 > 0.75$)。这说明 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度数据在以上 14 个站点存在零点误差: $-A \times y - B$, 所以可通过零点误差对 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度数据进行校准使其更适用于研究当地气溶胶光学厚度的特性及日变化情况。在 Anmyon、Baengnyeong、Chen-Kung_ Univ、Gangneung_WNU、Gosan_SNU、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung、Shirahama、Singapore、USM_Penang 和 Songkhla_Met_Sta 站点, Himawari-8 卫星反演的气溶胶光学厚度产品与地基观测真值有较好的相关性, 两个数据集的绝对误差无论是与 AERONET AOD 还是 Himawari-8 AOD 均不存在明显的相关性且其绝对误差密集值均在零值附近, 这说明 Himawari-8 卫星反演 AOD 在以上站点具有较好的适用性。从以上分析中可知, Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度存在的低估现象以及在某些气溶胶光学厚度很小的地区出现卫星反演气溶胶光学厚度较大的情况均是可以进行校正的, 这对 Himawari-8 气溶胶光学厚度产品的应用及反演算法的改进意义重大。

6 结论

本文第一次在 70 个站点对静止气象卫星 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度产品进行了大范围的验证分析。将 2015 年 9 月至 2017 年 12 月 Himawari-8 Level-2 气溶胶光学厚度产品与 70 个 AERONET 地基观测站观测得到的气溶胶光学厚度数据进行了对比验证分析, 结果表明 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度产品存在极大的空间上的差异性。在 Anmyon、Baengnyeong、Chen-Kung_ Univ、Gangneung_WNU、Gosan_SNU、Hong_Kong_PolyU、Hong_Kong_Sheung、Shirahama、Singapore、USM_Penang 和 Songkhla_Met_Sta 站点, Himawari-8 卫星反演的气溶胶光学厚度产品具有较好的可靠性及适用性。在 American_Samoa、Bandung、Birdsville、Bukit_Kototabang、Canberra、Fowlers_Gap、Jabiru、QOMS_CAS 等气溶胶光学厚度较小的站点出现卫星反演的气溶胶光学厚度较大的情况, 分析其绝对误差与 Himawari-8 AOD 关系发现两者之间存在极好的相关系数 ($R^2 > 0.75$)。在以上站点 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度存在零点误差: $-A \times y - B$, 通过零点误差可对 Himawari-8 反

演的气溶胶光学厚度数据进行校准。在 Beijing、Beijing-CAMS、Chiang_Mai_Met_Sta、Gandhi_College、Kanpur、KORUS_Baeksa、Kathmandu-Bode、KORUS_Iksa、KORUS_Mokpo_NUKORUS_Olympic_Park、KORUS-Taehwa、KORUS_Songchon、Luang_Namtha、Omkoii、Nong_Khai、NGHIA_DO、Pusan_NU、Seoul_SNU、Silpakorn_Univ、Son_La、XiangHe 以及 Yonsei_University 站点, Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度存在明显的低估现象, 绝对误差与 AERONET AOD 之间存在较好的线性关系 ($y = -A \times x + B$) 且两个数据集间有较好的相关系数 ($R^2 > 0.4$), 因此可以直接用两者之间存在的线性关系对 Himawari-8 反演的气溶胶光学厚度数据进行校正。基于 70 个不同下垫面类型站点的地基观测资料对 Himawari-8 气溶胶光学厚度产品进行验证并分析其误差规律及来源将为 Himawari-8 气溶胶光学厚度反演算法的改进提供依据。

致谢 感谢 AERONET 为本文提供地基气溶胶光学厚度资料, 同时感谢工作人员对各观测站仪器的管理与维护。感谢日本气象厅提供 Himawari-8 卫星气溶胶光学厚度产品数据。

参考文献 (References)

- Bessho K, Date K, Hayashi M, et al. 2016. An introduction to Himawari-8/9-Japan's new-generation geostationary meteorological satellites [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94(2): 151–183. doi:10.2151/jmsj.2016-009
- 陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 2018. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用 [J]. *大气科学*, 42(3): 621–633.
- Chen Hongbin, Fan Xuehua, Xia Xiang'ao. 2018. Review of satellite remote sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(3): 621–633. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17272
- Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. 1999. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 104(D24): 31333–31349. doi:10.1029/1999jd900923
- Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W, et al. 2004. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality [J]. *Atmos. Environ.*, 38(16): 2495–2509. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.01.039
- Fukuda S, Nakajima T, Takenaka H, et al. 2013. New approaches to removing cloud shadows and evaluating the 380 nm surface reflectance for improved aerosol optical thickness retrievals from the GOSAT/TANSO-Cloud and Aerosol Imager [J]. *J. Geophys. Res.*

- Atmos., 118(24): 13520–13531. doi:10.1002/2013JD020090
- 高玲, 任通, 李成才, 等. 2012. 利用静止卫星 MTSAT 反演大气气溶胶光学厚度 [J]. *气象学报*, 70(3): 598–608. Gao Ling, Ren Tong, Li Chengcai, et al. 2012. A retrieval of the atmospheric aerosol optical depth from MTSAT [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70(3): 598–608. doi:10.11676/qxb2012.049
- 葛邦宇, 杨磊库, 陈兴峰, 等. 2018. 暗目标法的 Himawari-8 静止卫星数据气溶胶反演 [J]. *遥感学报*, 22(1): 38–50. Ge Bangyu, Yang Leiku, Chen Xingfeng, et al. 2018. Study on aerosol optical depth retrieval over land from Himawari-8 data based on dark target method [J]. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(1): 38–50. doi:10.11834/jrs.20187033
- Higurashi A, Nakajima T. 1999. Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA AVHRR [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56(7): 924–941. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<0924:DOATCA>2.0.CO;2
- Ishida H, Nakajima T Y. 2009. Development of an unbiased cloud detection algorithm for a spaceborne multispectral imager [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114(D7): D07206. doi:10.1029/2008JD010710
- Ishida H, Nakajima T Y, Yokota T, et al. 2011. Investigation of GOSAT TANSO-CAI cloud screening ability through an intersatellite comparison [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50(7): 1571–1586. doi:10.1175/2011JAMC2672.1
- Kaufman Y J, Gao B C. 1992. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30(5): 871–884. doi:10.1109/36.175321
- 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 2009. 中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验 [J]. *应用气象学报*, 20(2): 147–156. Li Xiaojing, Zhang Peng, Zhang Xingying, et al. 2009. Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20(2): 147–156. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2009.02.003
- Luo Y F, Li W L, Zhou X J, et al. 2000. Analysis of the atmospheric aerosol optical depth over China in 1980s [J]. *Acta Meteor. Sin.*, 14(4): 490–502.
- Mahowald N. 2011. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate [J]. *Science*, 334(6057): 794–796. doi:10.1126/science.1207374
- Mattar C, Sobrino J A, Julien Y, et al. 2011. Trends in column integrated water vapour over Europe from 1973 to 2003 [J]. *Int. J. Climatol.*, 31(12): 1749–1757. doi:10.1002/joc.2186
- Nurhayati N, Nakajima T. 2012. A study of aerosol optical properties at the global GAW station Bukit Kototabang, Sumatra, Indonesia [J]. *Atmos. Environ.*, 46: 597–606. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.057
- 任丽新, 游荣高, 吕位秀, 等. 1999. 城市大气气溶胶的物理化学特性及其对人体健康的影响 [J]. *气候与环境研究*, 4(1): 67–73. Ren Lixin, You Ronggao, Lv Weixiu, et al. 1999. The physical and chemical characteristics of aerosols in the urban region and their influence on human health [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 4(1): 67–73. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1999.01.15
- Shang H Z, Chen L F, Letu H, et al. 2017. Development of a daytime cloud and haze detection algorithm for Himawari-8 satellite measurements over central and eastern China [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122(6): 3528–3543. doi:10.1002/2016JD025659
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 77–83. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics (in Chinese)*[M]. Beijing: Peking University Press, 77–83.
- 王新强, 杨世植, 朱永豪, 等. 2003. 基于 6S 模型从 MODIS 图像反演陆地上空大气气溶胶光学厚度 [J]. *量子电子学报*, 20(5): 629–634. Wang Xinqiang, Yang Shizhi, Zhu Yonghao, et al. 2003. Aerosol optical thickness retrieval over land from MODIS data based on the inversion of the 6S model [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (in Chinese)*, 20(5): 629–634. doi:10.3969/j.issn.1007-5461.2003.05.025
- 王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 2016. 中国地区 MODIS 气溶胶产品的验证及反演误差分析 [J]. *高原气象*, 35(3): 810–822. Wang Hongbin, Zhang Lei, Jiao Shengming, et al. 2016. Evaluation of the MODIS aerosol products and analysis of the retrieval errors in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 35(3): 810–822. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00043
- Wong M S, Jin X M, Liu Z Z, et al. 2015. Multi-sensors study of precipitable water vapour over mainland China [J]. *Int. J. Climatol.*, 35(10): 3146–3159. doi:10.1002/joc.4199
- 吴序鹏, 杨军, 车慧正, 等. 2012. 塔克拉玛干沙漠地区气溶胶光学厚度卫星遥感产品验证 [J]. *气候与环境研究*, 17(2): 149–159. Wu Xupeng, Yang Jun, Che Huizheng, et al. 2012. Verification for the satellite remote sensing products of aerosol optical depth in Taklimakan Desert area [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(2): 149–159. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10089
- 辛金元. 2007. 中国地区气溶胶光学特性地基联网观测与研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 156pp. Xin Jinyuan. 2007. Observation and research of aerosol optical properties over China by using the Chinese Sun Hazemeter Network[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 156pp.
- Xu C, Ma Y M, Panday A, et al. 2014. Similarities and differences of aerosol optical properties between southern and northern sides of the Himalayas [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(6): 3133–3149. doi:10.5194/acp-14-3133-2014
- 许研, 张炜, 司一丹, 等. 2016. 高分一号数据的气溶胶光学厚度反演和验证 [J]. *遥感信息*, 31(5): 60–65. Xu Yan, Zhang Wei, Si Yidan, et al. 2016. Retrieval and validation of aerosol optical depth by using GF-1 remote sensing data [J]. *Remote Sensing Information (in Chinese)*, 31(5): 60–65. doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.010
- Yan X, Li Z Q, Luo N N, et al. 2018. A minimum albedo aerosol retrieval method for the new-generation geostationary meteorological satellite Himawari-8 [J]. *Atmos. Res.*, 207: 14–27. doi:10.1016/j.atmosres.2018.02.021
- Yang F K, Wang Y, Tao J H, et al. 2018. Preliminary investigation of a New AHI Aerosol Optical Depth (AOD) retrieval algorithm and evaluation with multiple source AOD measurements in China [J]. *Remote Sens.*, 10(5): 748. doi:10.3390/rs10050748

- Yoshida M, Kikuchi M, Nagao T M, et al. 2018. Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors [J]. [J. Meteor. Soc. Japan](#), 96B: 193–209. doi:10.2151/jmsj.2018-039
- Yu F F, Wu X Q. 2016. Radiometric inter-calibration between Himawari-8 AHI and S-NPP VIIRS for the solar reflective bands [J]. [Remote Sens.](#), 8(3): 165. doi:10.3390/rs8030165
- Yumimoto K, Nagao T M, Kikuchi M, et al. 2016. Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation

- geostationary meteorological satellite [J]. [Geophys. Res. Lett.](#), 43(11): 5886–5894. doi:10.1002/2016GL069298
- 张婕, 刘昊野, 辛金元, 等. 2016. 沈阳地区 MODIS 与 MERSI 气溶胶产品对比研究 [J]. [遥感学报](#), 20(4): 549–560. Zhang Jie, Liu Haoye, Xin Jinyuan, et al. 2016. The comparison of MODIS and MERSI aerosol products in Shenyang [J]. [Journal of Remote Sensing \(in Chinese\)](#), 20(4): 549–560. doi:10.11834/jrs.20165250