2019-04-08T10：35

投稿信

大气气溶胶对地球的气候和生态系统、辐射平衡、大气环境有显著影响。作为气溶胶光学特性之一，气溶胶光学厚度是研究气溶胶的环境及气候影响最重要的参数。近年来，卫星反演资料由于观测时次多，覆盖范围广等优点逐渐成为监测全球气溶胶光学厚度时空分布的有效方法。目前，具有反演气溶胶产品能力的卫星主要为太阳同步轨道卫星，例如Terra和Auqa卫星。但太阳同步轨道卫星每天最多只能获取2个有效的气溶胶光学厚度数据，较低的时间分辨率使得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。

Himawari-8是日本最新一代的静止气象卫星，可实现10分钟/次的高频率对地观测。Himawari-8上搭载的AHI（Advanced Himawari Imager）传感器设置有对气溶胶敏感的蓝光通道，在陆地气溶胶反演方面具有很大的潜力。准确性是影响卫星反演气溶胶光学厚度产品应用的重要因素，由于受地表反照率、气溶胶类型和高云的影响所引起的反演误差难以控制，这使得卫星反演的计算方法需要依靠地面同步的地基观测资料来进行对比订正以便进一步的完善。所以，无论在全球或区域尺度，将卫星反演气溶胶产品广泛用于各领域之前需对其可信度进行校验。已有研究人员对Himawari-8气溶胶光学厚度产品进行验证，但他们的研究均以是以特定局部区域为研究范围，目前还没有关于Himawari-8气溶胶光学厚度反演产品的大规模验证及反演精度的全面研究。利用地面AERONET观测数据对Himawari-8气溶胶光学厚度进行全面验证，评估其气溶胶数据的可靠性及适用性可为人为排放气溶胶和气候变化提供有价值的科学指导和研究。

创新点：（1）首次在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规模的验证分析。（2）分析了Himawari-8提供的气溶胶光学厚度数据在各地基观测站点（局部区域）上的可靠性及适用性。（3）对Himawari-8气溶胶光学厚度的反演精度进行了分析研究，提供了对Himawari-8气溶胶光学厚度进行订正以便进一步完善反演算法的方法。

本文尚未发表且无利益冲突。

赵垒，辛金元，杨磊库，司瑞瑞，刘光静. 2019. Himawari-8 气溶胶光学厚度产品的验证分析[J]. 大气科学，：. Zhao Lei, Xin Jinyuan, Yang Leiku, Si Ruirui, Liu Guangjing. 2019. Validation Analysis of Himawari-8 Aerosol Optical Depth Products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), ：. 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 分钟/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 2 级气溶胶光学厚度（AOD）产品与 AERONET 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极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，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基础资料。

关键词 Himawari-8，气溶胶光学厚度，验证

文章编号　　中图分类号　　文献标识码

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1906.19102

Validation Analysis of Himawari-8 Aerosol Optical Depth Products

ZHAO Lei [1,2], XIN Jinyuan [2], YANG Leiku [1], SI ruirui [2] , LIU Guangjing [2]

收稿日期 2019-01-07；　网络预出版日期

作者简介 赵垒，女，1992 年 5 月出生，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，国家自然科学基金面上项目 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

[1] *School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*

[2] *The State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract Himawari-8 is a new generation of geostationary meteorological satellite launched by Japan Meteorological Administration. The sensor AHI (Advanced Himawari Imager) carried by Himawari-8 can achieve high temporal resolution observation for 10 minutes/time.. Level 2 Aerosol Optical Depth (AOD) dataset from Himawari-8 satellite was compared to AERONET AOD at 70 sites from September 2015 to December 2017. The results show that the precision of AOD products retrieved by Himawari-8 satellite has great spatial difference. Among them, there are 48 sites where there is a good correlation between Himawari-8 AOD and AERONET AOD (R>0.5). The Himawari-8 AOD clearly underestimated ground-based AOD at 22 sites. At the sites of American_Samoa, Bandung, Birdsville, Bukit_Kototabang, Canberra, Fowlers_Gap, Jabiru, QOMS_CAS, etc., ground-based AOD are small and Himawari-8 satellite retrived AOD is large. Analysis of the absolute error (difference between Himawari-8 AOD and AERONET AOD) found that there is a good correlation 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 datas is large, there is a good linear relationship between absolute error and Himawari-8 AOD. This provides useful basic information for the improvement and perfection of Himawari-8 AOD inversion algorithm.

Keywords Himawari-8, 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

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

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，2003）。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（李晓静等，2009；王新强等，2003）。

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（陈洪滨等，2018；高玲等，2012）。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 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35800千米，主要搭载的传感器是高级成像仪（AHI），其具有与GOES-R上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500m（Yumimoto et al.，2016）。Himawari-8提供的全球气溶胶产品有两种：10-minute（Level 2）和1-hour（Level 3），其空间分辨率均为5km×5km。基于Higurashi和Nakajima（1999）以及Fukuda等人（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至2500nm波长范围内每1nm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着改变的像素。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着变化。Yoshida等人（2018）给出了反演算法细节的具体描述。本研究所用的是Himawari-8 2级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 NASA 和 LOA-PHOTONS（CNRS）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，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 500nm，但 AERONET 发布

的数据没有 500nm 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（440nm、675nm、870nm、1020nm）的气溶胶光学厚度数据采用二次多项式拟合算法求得其 500nm 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 5km×5km，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

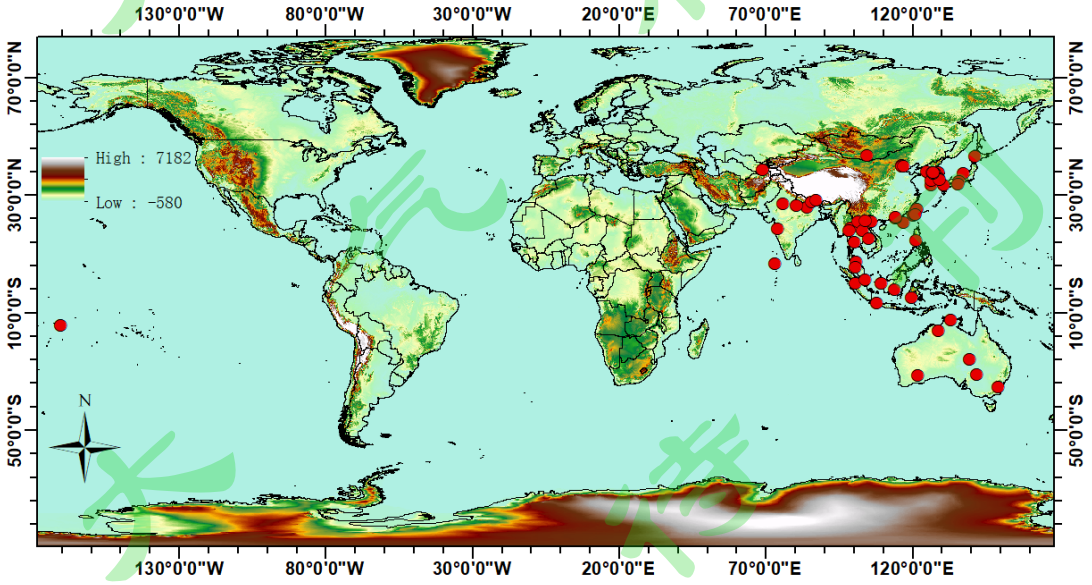


图 1 站点分布图

Fig.1 Site distribution

Himawari-8 静止气象卫星星下点位于东经 140.7°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：80E-160W，60N-60S。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，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。

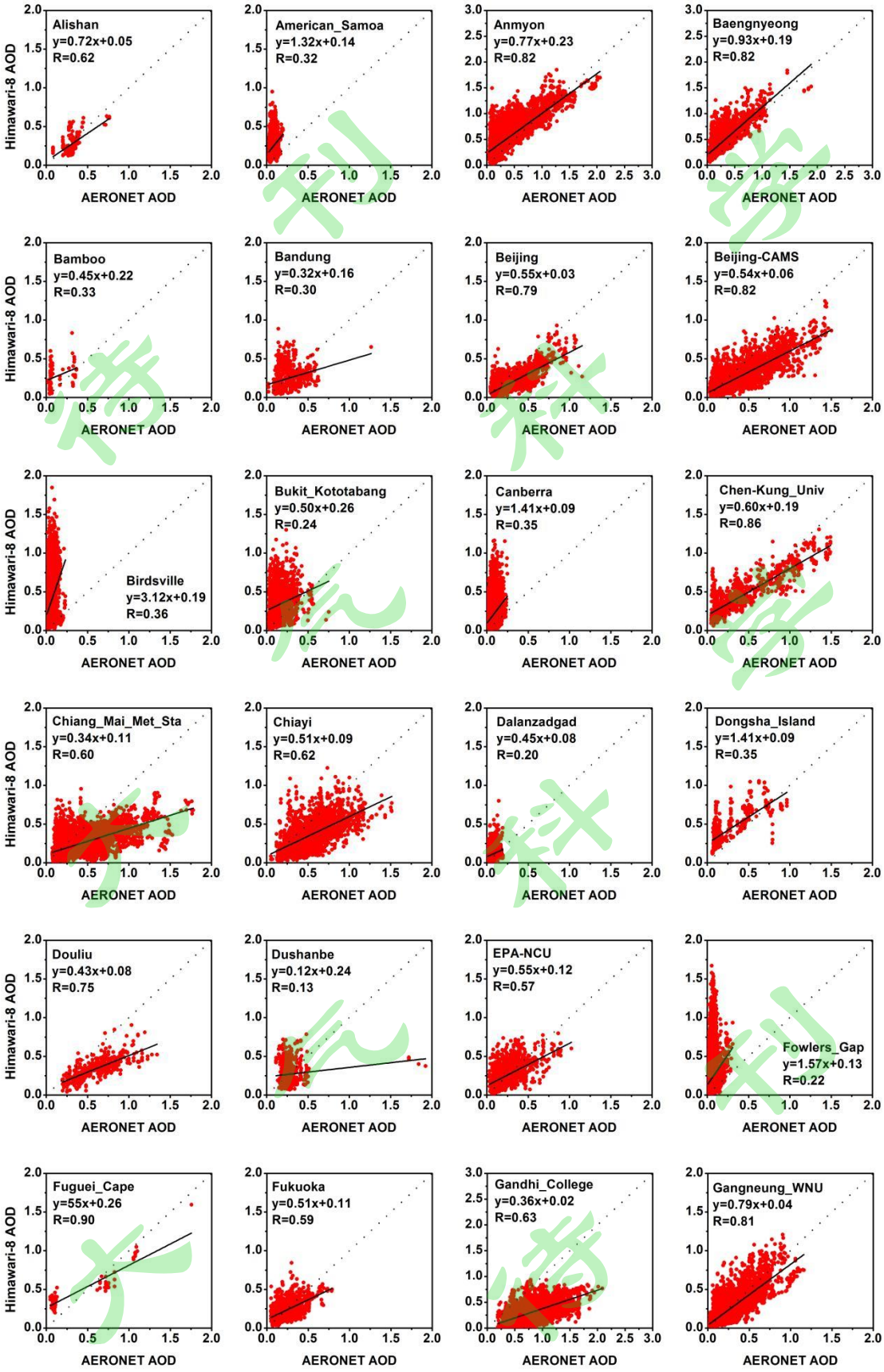
表 1 站点地理位置信息

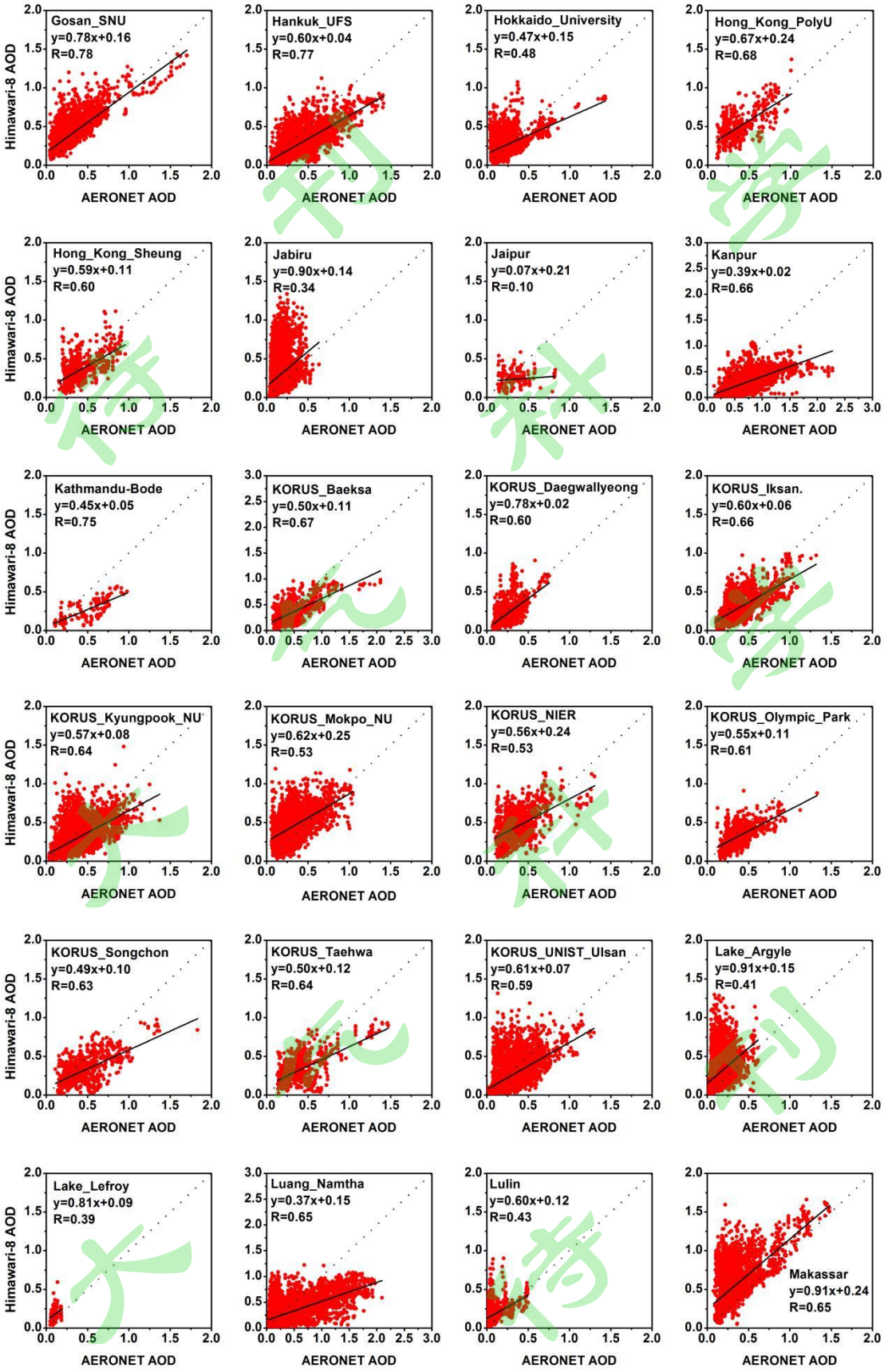
Table 1 Site geographic information

序号	站点	经度(°E)	纬度(°N)	高程(m)	国家	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
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	127.569	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


Alishan
y=0.72x+0.05
R=0.62
American_Samoa
y=1.32x+0.14
R=0.32
Anmyon
y=0.77x+0.23
R=0.82
Baengnyeong
y=0.93x+0.19
R=0.82
Bamboo
y=0.45x+0.22
R=0.33
Bandung
y=0.32x+0.16
R=0.30
Beijing
y=0.55x+0.03
R=0.79
Beijing-CAMS
y=0.54x+0.06
R=0.82
Birdsville
y=3.12x+0.19
R=0.36
Bukit_Kototabang
y=0.50x+0.26
R=0.24
Canberra
y=1.41x+0.09
R=0.35
Chen-Kung_Univ
y=0.60x+0.19
R=0.86
Chiang_Mai_Met_Sta
y=0.34x+0.11
R=0.60
Chiayi
y=0.51x+0.09
R=0.62
Dalanzadgad
y=0.45x+0.08
R=0.20
Dongsha_Island
y=1.41x+0.09
R=0.35
Douliu
y=0.43x+0.08
R=0.75
Dushanbe
y=0.12x+0.24
R=0.13
EPA-NCU
y=0.55x+0.12
R=0.57
Fowlers_Gap
y=1.57x+0.13
R=0.22
Fuguei_Cape
y=55x+0.26
R=0.90
Fukuoka
y=0.51x+0.11
R=0.59
Gandhi_College
y=0.36x+0.02
R=0.63
Gangneung_WNU
y=0.79x+0.04
R=0.81
Himawari-8 AOD
AERONET AOD


Gosan_SNU
y=0.78x+0.16
R=0.78
Hankuk_UFS
y=0.60x+0.04
R=0.77
Hokkaido_University
y=0.47x+0.15
R=0.48
Hong_Kong_PolyU
y=0.67x+0.24
R=0.68
Hong_Kong_Sheung
y=0.59x+0.11
R=0.60
Jabiru
y=0.90x+0.14
R=0.34
Jaipur
y=0.07x+0.21
R=0.10
Kanpur
y=0.39x+0.02
R=0.66
Kathmandu-Bode
y=0.45x+0.05
R=0.75
KORUS_Baeksa
y=0.50x+0.11
R=0.67
KORUS_Daegwallyeong
y=0.78x+0.02
R=0.60
KORUS_Iksan.
y=0.60x+0.06
R=0.66
KORUS_Kyungpook_NU
y=0.57x+0.08
R=0.64
KORUS_Mokpo_NU
y=0.62x+0.25
R=0.53
KORUS_NIER
y=0.56x+0.24
R=0.53
KORUS_Olympic_Park
y=0.55x+0.11
R=0.61
KORUS_Songchon
y=0.49x+0.10
R=0.63
KORUS_Taehwa
y=0.50x+0.12
R=0.64
KORUS_UNIST_Ulsan
y=0.61x+0.07
R=0.59
Lake_Argyle
y=0.91x+0.15
R=0.41
Lake_Lefroy
y=0.81x+0.09
R=0.39
Luang_Namtha
y=0.37x+0.15
R=0.65
Lulin
y=0.60x+0.12
R=0.43
Makassar
y=0.91x+0.24
R=0.65
Himawari-8 AOD
AERONET AOD

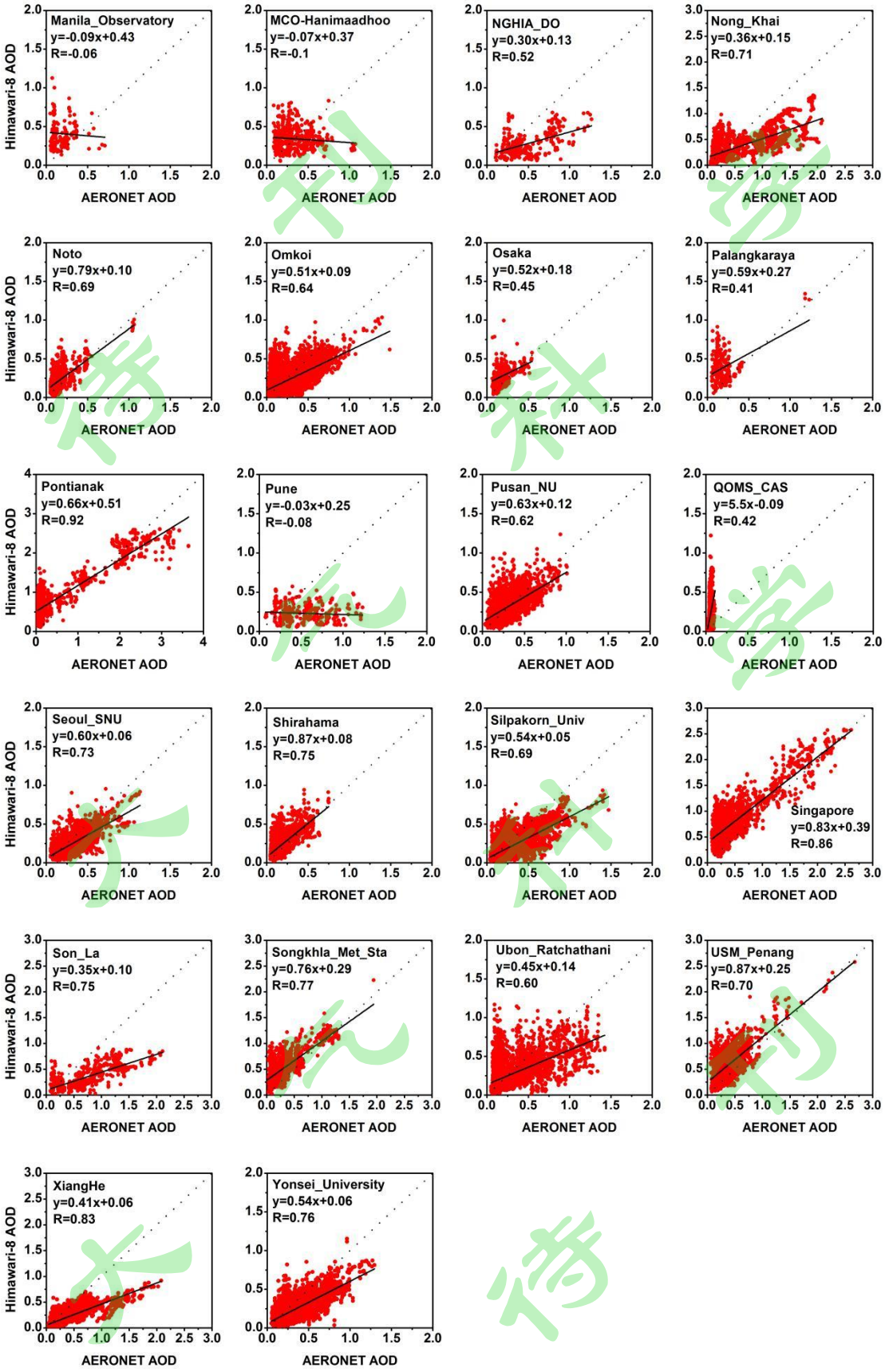


图2 70个站点Himawari-8卫星反演AOD与AERONET AOD的对比验证散点图

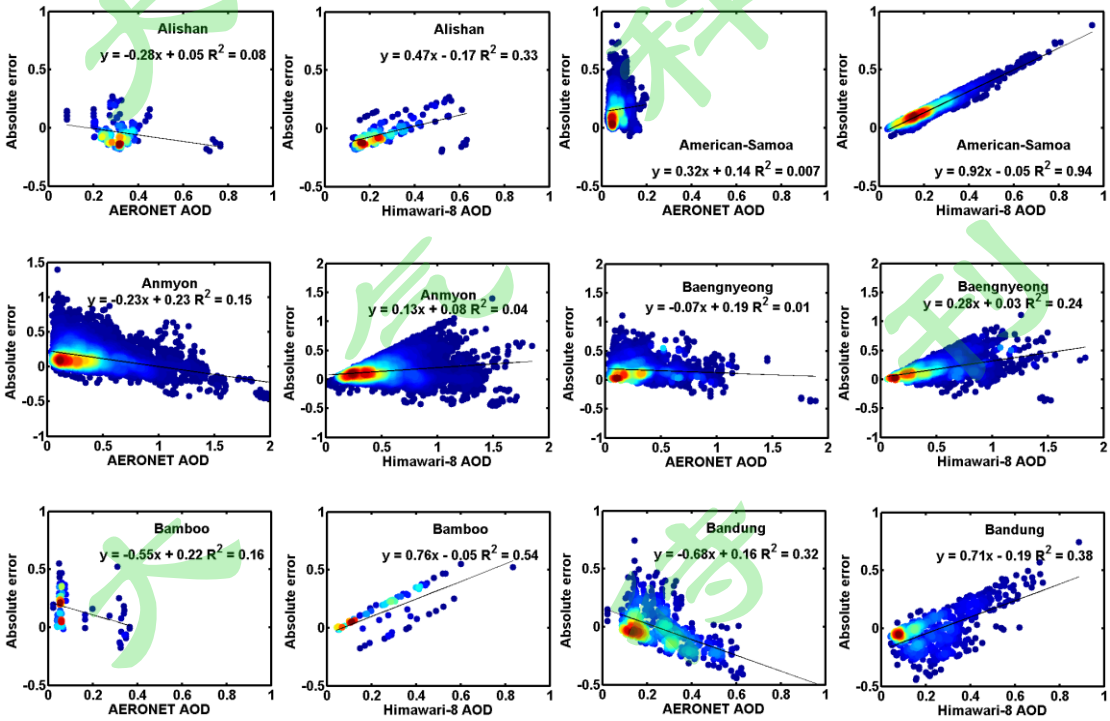
Fig.2 Scatterplot of ground-based AOD and Himawari-8 satellite retrieved AOD at 70 sites

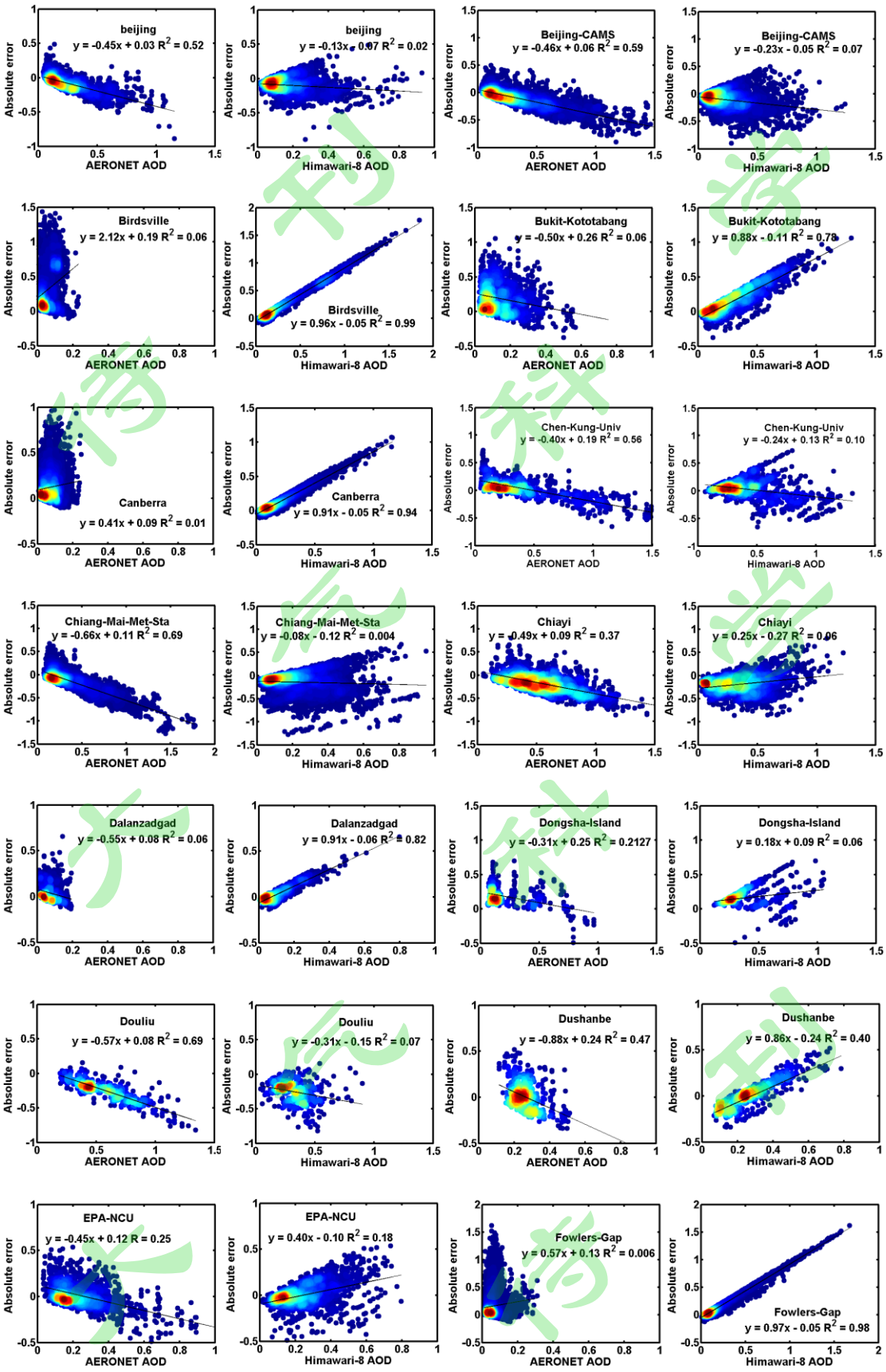
本研究共选取了 70 个 AERONET 站点数据对 Himawari-8 AOD 2 级产品进行验证分析，图 2 为 Himawari-8 卫星反演气溶胶光学厚度数据与 NASA 发布的 AERONET 气溶胶光学厚度标准产品对比结果散点图。从图中可以看出在不同站点 Himawari-8 卫星反演产品的精度存在较大的差异性，这可能是受地球同步卫星的高轨道高度的影响且与卫星反演算法，地表反射率及气溶胶类型等因素有关。整体来说，在大多数站点 Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 之间具有较好的相关性，尤其是 Pontianak，Chen-Kung_Univ，Singapore，Anmyon，Baengnyeong，Beijing-CAMS，Gangneung_WNU，XiangHe 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。

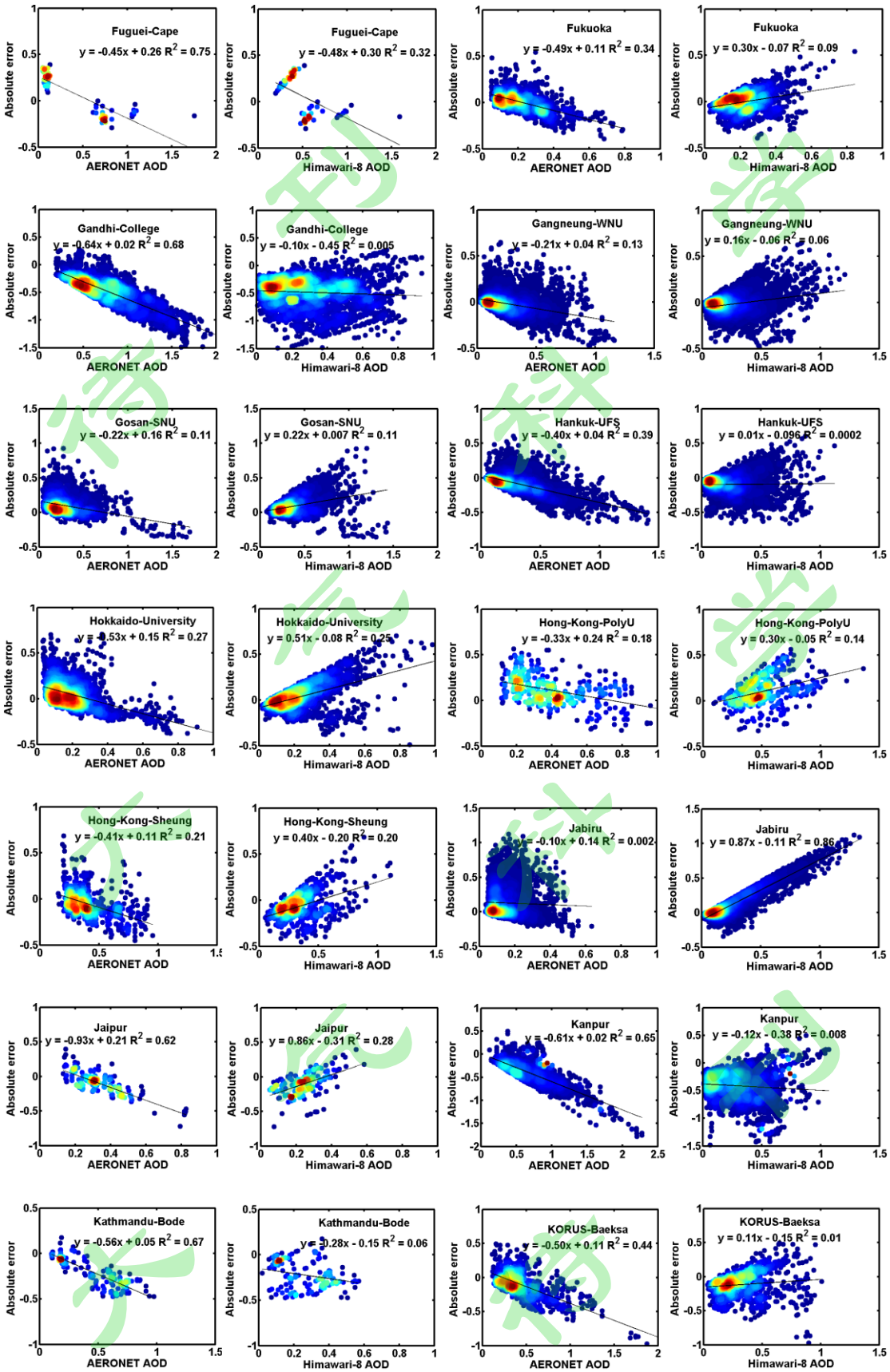
Jaipur，拉贾斯坦邦首府，印度北部的一座古城，属热带季风气候，年降雨量超过 2300 毫米。Manila_Observatory，马尼拉天文台，于 1865 年由菲律宾耶稣会特派团成立，随着费德里科•弗拉的成立，它开始系统地观察菲律宾的天气。Pune 位于印度马哈拉施特拉邦，其西边为德干高原，这是一个丘陵城市，属于炎热的半干旱气候。在 Jaipur，Manila_Observatory，MCO-Hanimaadhoo，Pune 四个站点，卫星反演气溶胶光学厚度在地基观测值较大时仍然较小，这可能是由于卫星反演算法中气溶胶类型不适用的原因。在气溶胶光学厚度比较高的情

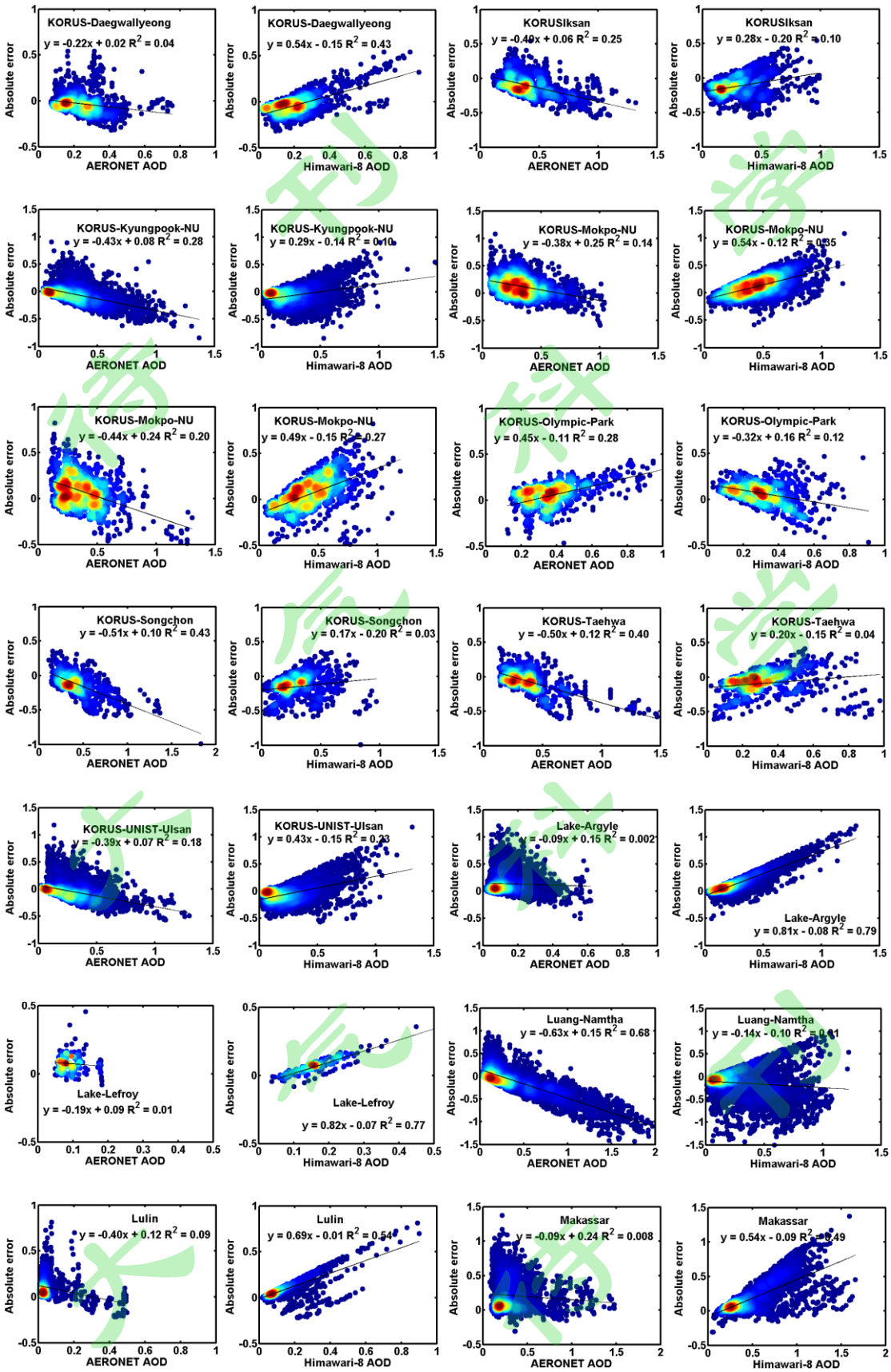
况下，气溶胶模式误差将占主导地位（吴序鹏等，2012）。在 Beijing，Beijing-CAMS，Chiang_Mai_Met_Sta， Gandhi_College， Kanpur， KORUS_Baeksa， Kathmandu-Bode，KORUS_Iksan ， KORUS_Mokpo_NU ， KORUS_Olympic_Park ， KORUS_Taehwa ，KORUS_Songchon，Luang_Namtha，Omkoi，Nong_Khai，NGHIA_DO，Pusan_NU，Seoul_SNU，Silpakorn_Univ，Son_La，XiangHe，Yonsei_University 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 ，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。

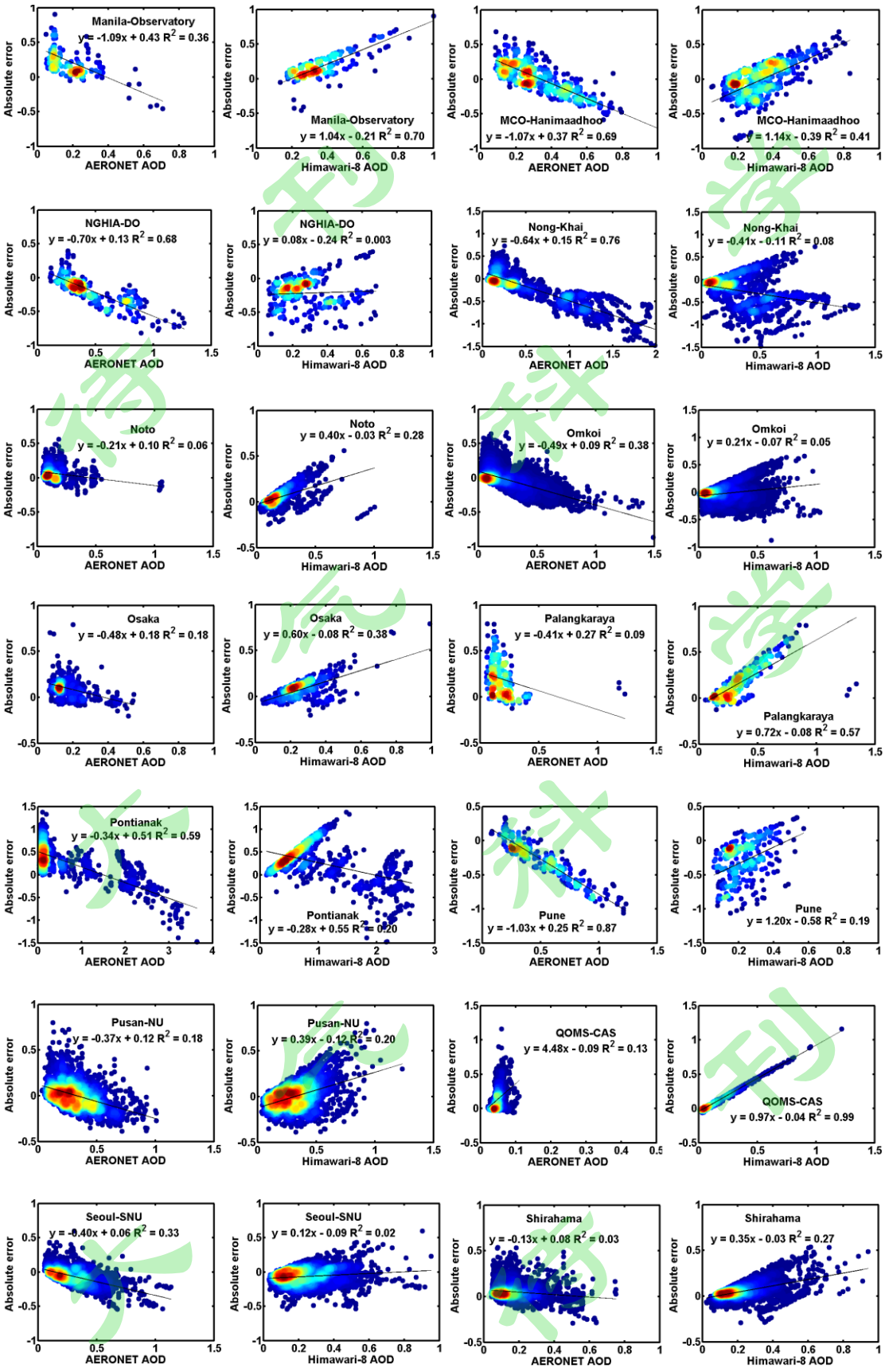
5 误差分析




beijing
y = -0.45x + 0.03 R2 = 0.52
beijing
y = -0.13x + 0.07 R2 = 0.02
Beijing-CAMS
y = -0.46x + 0.06 R2 = 0.59
Beijing-CAMS
y = -0.23x - 0.05 R2 = 0.07
Birdsville
y = 2.12x + 0.19 R2 = 0.06
Birdsville
y = 0.96x - 0.05 R2 = 0.99
Bukit-Kototabang
y = -0.50x + 0.26 R2 = 0.06
Bukit-Kototabang
y = 0.88x - 0.11 R2 = 0.78
Canberra
y = 0.41x + 0.09 R2 = 0.01
Canberra
y = 0.91x - 0.05 R2 = 0.94
Chen-Kung-Univ
y = -0.40x + 0.19 R2 = 0.56
Chen-Kung-Univ
y = -0.24x + 0.13 R2 = 0.10
Chiang-Mai-Met-Sta
y = -0.66x + 0.11 R2 = 0.69
Chiang-Mai-Met-Sta
y = -0.08x - 0.12 R2 = 0.004
Chiayi
y = -0.49x + 0.09 R2 = 0.37
Chiayi
y = 0.25x - 0.27 R2 = 0.06
Dalanzadgad
y = -0.55x + 0.08 R2 = 0.06
Dalanzadgad
y = 0.91x - 0.06 R2 = 0.82
Dongsha-Island
y = -0.31x + 0.25 R2 = 0.2127
Dongsha-Island
y = 0.18x + 0.09 R2 = 0.06
Douliu
y = -0.57x + 0.08 R2 = 0.69
Douliu
y = -0.31x - 0.15 R2 = 0.07
Dushanbe
y = -0.88x + 0.24 R2 = 0.47
Dushanbe
y = 0.86x - 0.24 R2 = 0.40
EPA-NCU
y = -0.45x + 0.12 R = 0.25
EPA-NCU
y = 0.40x - 0.10 R2 = 0.18
Fowlers-Gap
y = 0.57x + 0.13 R2 = 0.006
Fowlers-Gap
y = 0.97x - 0.05 R2 = 0.98
Absolute error
AERONET AOD
Himawari-8 AOD


Fuguei-Cape
y = -0.45x + 0.26 R2 = 0.75
Fuguei-Cape
y = -0.48x + 0.30 R2 = 0.32
Fukuoka
y = -0.49x + 0.11 R2 = 0.34
Fukuoka
y = 0.30x - 0.07 R2 = 0.09
Gandhi-College
y = -0.64x + 0.02 R2 = 0.68
Gandhi-College
y = -0.10x - 0.45 R2 = 0.005
Gangneung-WNU
y = -0.21x + 0.04 R2 = 0.13
Gangneung-WNU
y = 0.16x - 0.06 R2 = 0.06
Gosan-SNU
y = -0.22x + 0.16 R2 = 0.11
Gosan-SNU
y = 0.22x + 0.007 R2 = 0.11
Hankuk-UFS
y = -0.40x + 0.04 R2 = 0.39
Hankuk-UFS
y = 0.01x - 0.096 R2 = 0.0002
Hokkaido-University
y = -0.53x + 0.15 R2 = 0.27
Hokkaido-University
y = 0.51x - 0.08 R2 = 0.25
Hong-Kong-PolyU
y = -0.33x + 0.24 R2 = 0.18
Hong-Kong-PolyU
y = 0.30x - 0.05 R2 = 0.14
Hong-Kong-Sheung
y = -0.41x + 0.11 R2 = 0.21
Hong-Kong-Sheung
y = 0.40x - 0.20 R2 = 0.20
Jabiru
y = -0.10x + 0.14 R2 = 0.002
Jabiru
y = 0.87x - 0.11 R2 = 0.86
Jaipur
y = -0.93x + 0.21 R2 = 0.62
Jaipur
y = 0.86x - 0.31 R2 = 0.28
Kanpur
y = -0.61x + 0.02 R2 = 0.65
Kanpur
y = -0.12x - 0.38 R2 = 0.008
Kathmandu-Bode
y = -0.56x + 0.05 R2 = 0.67
Kathmandu-Bode
y = 0.28x - 0.15 R2 = 0.06
KORUS-Baeksa
y = -0.50x + 0.11 R2 = 0.44
KORUS-Baeksa
y = 0.11x - 0.15 R2 = 0.01
Absolute error
AERONET AOD
Himawari-8 AOD


KORUS-Daegwallyeong
y = -0.22x + 0.02 R2 = 0.04
KORUS-Daegwallyeong
y = 0.54x - 0.15 R2 = 0.43
KORUSIksan
y = -0.40x + 0.06 R2 = 0.25
KORUSIksan
y = 0.28x - 0.20 R2 = 0.10
KORUS-Kyungpook-NU
y = -0.43x + 0.08 R2 = 0.28
KORUS-Kyungpook-NU
y = 0.29x - 0.14 R2 = 0.10
KORUS-Mokpo-NU
y = -0.38x + 0.25 R2 = 0.14
KORUS-Mokpo-NU
y = 0.54x - 0.12 R2 = 0.35
KORUS-Mokpo-NU
y = -0.44x + 0.24 R2 = 0.20
KORUS-Mokpo-NU
y = 0.49x - 0.15 R2 = 0.27
KORUS-Olympic-Park
y = 0.45x - 0.11 R2 = 0.28
KORUS-Olympic-Park
y = -0.32x + 0.16 R2 = 0.12
KORUS-Songchon
y = -0.51x + 0.10 R2 = 0.43
KORUS-Songchon
y = 0.17x - 0.20 R2 = 0.03
KORUS-Taehwa
y = -0.50x + 0.12 R2 = 0.40
KORUS-Taehwa
y = 0.20x - 0.15 R2 = 0.04
KORUS-UNIST-Ulsan
y = -0.39x + 0.07 R2 = 0.18
KORUS-UNIST-Ulsan
y = 0.43x - 0.15 R2 = 0.23
Lake-Argyle
y = -0.09x + 0.15 R2 = 0.002
Lake-Argyle
y = 0.81x - 0.08 R2 = 0.79
Lake-Lefroy
y = -0.19x + 0.09 R2 = 0.01
Lake-Lefroy
y = 0.82x - 0.07 R2 = 0.77
Luang-Namtha
y = -0.63x + 0.15 R2 = 0.68
Luang-Namtha
y = -0.14x - 0.10 R2 = 0.11
Lulin
y = -0.40x + 0.12 R2 = 0.09
Lulin
y = 0.69x - 0.01 R2 = 0.54
Makassar
y = -0.09x + 0.24 R2 = 0.008
Makassar
y = 0.54x - 0.09 R2 = 0.49
Absolute error
AERONET AOD
Himawari-8 AOD


Manila-Observatory
y = -1.09x + 0.43 R2 = 0.36
Manila-Observatory
y = 1.04x - 0.21 R2 = 0.70
MCO-Hanimaadhoo
y = -1.07x + 0.37 R2 = 0.69
MCO-Hanimaadhoo
y = 1.14x - 0.39 R2 = 0.41
NGHIA-DO
y = -0.70x + 0.13 R2 = 0.68
NGHIA-DO
y = 0.08x - 0.24 R2 = 0.003
Nong-Khai
y = -0.64x + 0.15 R2 = 0.76
Nong-Khai
y = -0.41x - 0.11 R2 = 0.08
Noto
y = -0.21x + 0.10 R2 = 0.06
Noto
y = 0.40x - 0.03 R2 = 0.28
Omkoi
y = -0.49x + 0.09 R2 = 0.38
Omkoi
y = 0.21x - 0.07 R2 = 0.05
Osaka
y = -0.48x + 0.18 R2 = 0.18
Osaka
y = 0.60x - 0.08 R2 = 0.38
Palangkaraya
y = -0.41x + 0.27 R2 = 0.09
Palangkaraya
y = 0.72x - 0.08 R2 = 0.57
Pontianak
y = -0.34x + 0.51 R2 = 0.59
Pontianak
y = -0.28x + 0.55 R2 = 0.20
Pune
y = -1.03x + 0.25 R2 = 0.87
Pune
y = 1.20x - 0.58 R2 = 0.19
Pusan-NU
y = -0.37x + 0.12 R2 = 0.18
Pusan-NU
y = 0.39x - 0.12 R2 = 0.20
QOMS-CAS
y = 4.48x - 0.09 R2 = 0.13
QOMS-CAS
y = 0.97x - 0.04 R2 = 0.99
Seoul-SNU
y = -0.40x + 0.06 R2 = 0.33
Seoul-SNU
y = 0.12x - 0.09 R2 = 0.02
Shirahama
y = -0.13x + 0.08 R2 = 0.03
Shirahama
y = 0.35x - 0.03 R2 = 0.27
Absolute error
AERONET AOD
Himawari-8 AOD

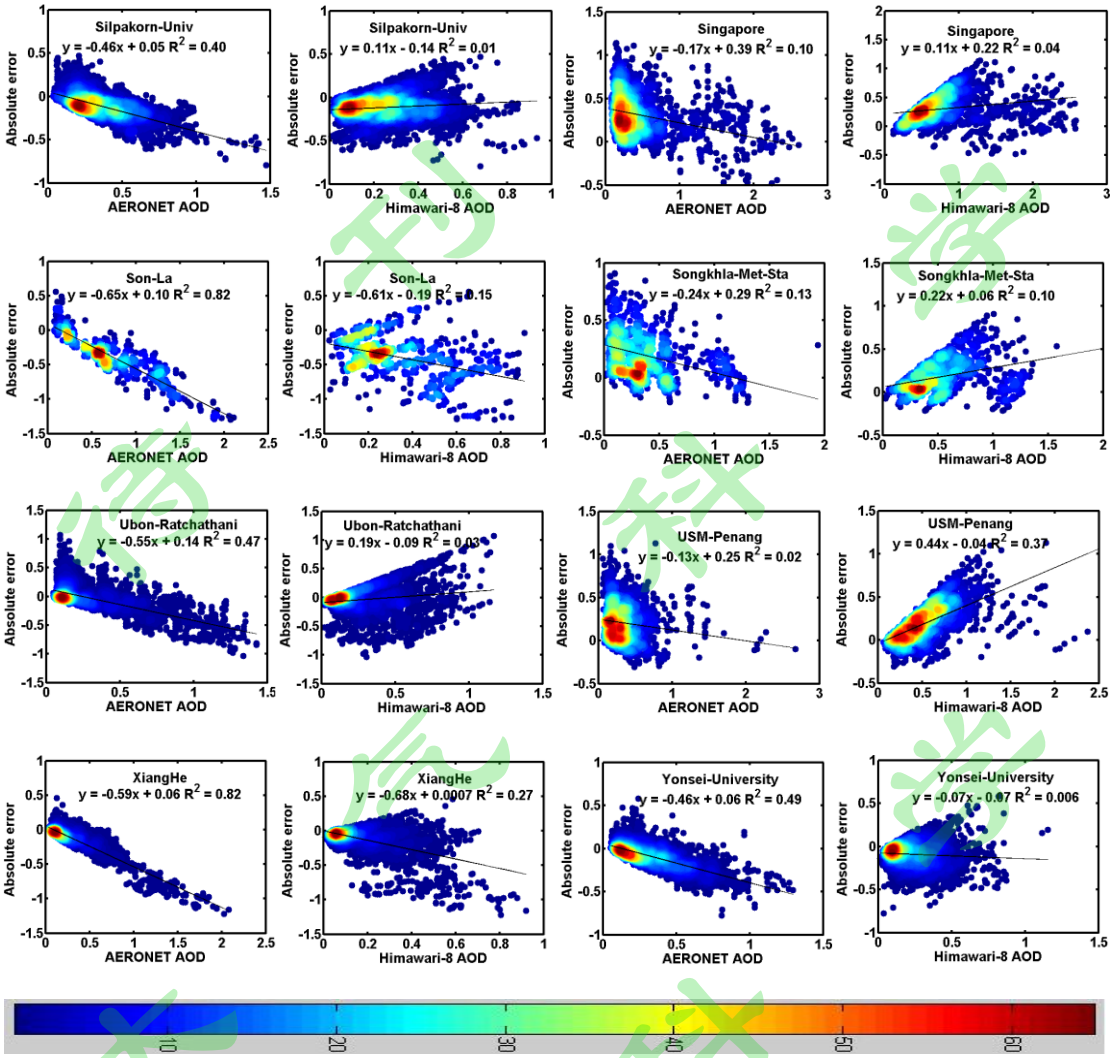


图 3 70 个站点绝对误差（Himawari-8 AOD 与 AERONET AOD 的差值）与 AERONET 及 Himawari-8 AOD 的关系热点图，颜色表示数据对密度。

Fig.3 Absolute error (difference between H8 AOD and AERONET AOD) trends of the 70 sites. Colorful dots represent the number of ordered pairs in every particular case.

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，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）。从图 2 可知以上站点 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（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= -A*X+B）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，Dalanzadgad，Fowlers_Gap，Jabiru，Lake_Argyle，Lake_Lefroy，Lulin，Makassar，Manila_Observatory，MCO-Hanimaadhoo，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=A*X+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，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*(Himawari-8 AOD)-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，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 2 级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，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*(Himawari-8 AOD)-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_Iksan ，KORUS_Mokpo_NU ， KORUS_Olympic_Park ， KORUS_Taehwa ， KORUS_Songchon ，Luang_Namtha，Omkoi，Nong_Khai，NGHIA_DO，Pusan_NU，Seoul_SNU，Silpakorn_Univ，Son_La，XiangHe，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*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., 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, Higurashi A, Kikuchi N, Nakajima T Y, Ishida H. 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. Geophys. Res. Atmospheres., 118(24), 13520-13531. doi:10.1002/2013JD020090.

Higurashi A, Nakajima T, 1999. Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAAAVHRR [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., 114, D07206, doi:10.1029/2008JD010710.

Ishida H, Nakajima T Y. Yokota T. Kikuchi N. Watanabe H. 2011. Investigation of GOSAT TANSO-CAI cloud screening ability through an inter-satellite comparison r [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50(7): 1571-1586. doi:10.1175/2011JAMC2672.1

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/qxxb2012.049.

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. 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.

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 Meterological Science (in Chinese). 20(2): 147-156. doi:10.11898/1001-7313.20090203.

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 Meteorol. Sin., 14(4): 490-502.

Mahowald N. 2011. Aerosol Indirect Effect on Biogeochemical Cycles and Climate [J]. Science, 334: 794-796. doi:10.1126/science.1207374.

Mattar C, Sobrino J, 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, 张文, 王秀玲. 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, Lu Weixiu, Zhang Wen, Wang Xiuling.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., 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. 29. Sheng, Peixuan, Mao, Jietai, Li, Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University press, 77-83.

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.

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.

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，李晓静，夏祥鳌. 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, Li Xiaojing, Xia Xiang'ao. 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，李莘莘. 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. Li Shenshen. 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 K. 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: 748. doi:10.3390/rs10050748.

Yoshida M, Kikuchi M, Nagao T M, Murakami H, Nomaki T, Higurashi A. 2018. Common Retrieval of Aerosol Properties for Imaging Satellite Sensors [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan., 96B, 193−209. doi:10.2151/jmsj.2018-039.

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.

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: 165. doi:10.3390/rs8030165.

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.