

综述与专论

中国卫星遥感气溶胶研究进展

余卫国¹, 房世波², 余学祥¹

(1 安徽理工大学测绘学院, 安徽淮南 232001; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 根据传感器反射特性的不同, 气溶胶遥感可分为四大类: 光学特性遥感, 多角度遥感, 偏振特性遥感, 雷达特性遥感。本文从这四个方面介绍了气溶胶遥感传感器特性及算法研究, 并介绍气溶胶产品光学厚度应用进展, 包括遥感气溶胶精度验证、AOD 与 PM 之间应用关系, 以及 AOD 在中国地区各省空间分布以及四季变化。为以后利用气溶胶光学厚度研究大气污染、灰霾等奠定了基础。

关键词: 气溶胶遥感; 气溶胶光学厚度; 偏振特性遥感; PM; 大气污染

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2016)01-0001-06

RESEARCH PROGRESS ON SATELLITE REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC AEROSOLS OF CHINA

YU Wei-guo¹, FANG Shi-bo², YU Xue-xiang¹

(1. Anhui University of Science & Technology, Anhui 232001, China; 2. Institute of Eco-environment and Agro-meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the different reflectance characteristics of sensors, remote sensing of aerosols can be divided into four main categories: optical remote sensing, multi-angle remote sensing, polarization remote sensing, radar characteristics remote sensing. This paper describes these four aspects of aerosol remote sensing sensor characteristics and algorithm research, and describes the progress of the thickness of aerosol products for optical applications, including remote sensing of aerosols verify the accuracy of the application between AOD and PM, and AOD distribution space in China Provinces and the changing seasons. The use of aerosol optical depth for future studies of air pollution, haze and others.

Key words: remote sensing of aerosol; AOD; Polarization properties of remote sensing; PM; Air Pollution

大气气溶胶通过散射与吸收太阳短波和地球长波辐射对气候产生直接影响, 气溶胶又与云相互作用对气候产生间接影响, 近地面气溶胶影响到环境和人类健康, 同时还会导致交通事故。但是由于来源广泛并且具有很大的时空变化, 难以在全球范围内精确、实时确定气溶胶的性质、组成及时空分布, 因而对大气气溶胶的研究依赖于监测

手段的发展。针对这些问题, 国内外已经实施了多个大气气溶胶研究计划, 并取得了一系列成果。一些学者从不同角度总结了气溶胶领域的研究成果: 大气气溶胶光学特性研究进展^[1-3]、卫星气溶胶遥感研究进展^[4-5]、中国大气气溶胶研究进展及气候效应的研究^[6-7]、大气气溶胶光学厚度遥感概况^[8]。

20 世纪 70 年代中期 NOAA AVHRR 可见光通道的海洋上空开始气溶胶反演, 接着 Tanre 等人研究结果表明陆地遥感中去除大气, 特别是气

收稿日期: 2015-08-22

作者简介: 余卫国(1989-)男, 安徽合肥人, 硕士在读, 主要研究方向大气气溶胶遥感。

溶胶的模糊效应的重要意义和可行性, 并由此开始了陆地上空气溶胶的遥感研究^[9]。国内从吕达仁、赵柏林等气溶胶遥感反演算法和空间分布开始, 气溶胶遥感从算法到气溶胶物理特性研究^[10]蓬勃发展。伴随着卫星遥感技术的发展, 卫星遥感反演气溶胶传感器时间分辨率和空间分辨率各不一样。一些学者开展了卫星传感器反演精度验证工作^[11-13]。在气溶胶反演的过程中, 算法对反演精度高低的影响很大, 这发展了各种各样的算法^[14-15]。气溶胶遥感反演 AOD 产品的应用与中国地区空间分布的研究^[16-17]。

气溶胶遥感原理为气溶胶粒子经过对入射辐射的散射和吸收作用, 使入射辐射的性质及强度发生了变化。通过测量入射辐射性质的变化便可以反演气溶胶粒子的特性。气溶胶遥感可分为两大类: 卫星遥感和地基遥感。地基联网观测和卫星遥感所提供的数据是研究气溶胶气候和环境效应的重要基础, 其中地基观测能给出站点所在位置高时间分辨率的气溶胶数据, 用以研究区域长时间序列的气溶胶的变化特征和趋势, 但受限于空

间分辨率不利于宏观研究和分析, 而卫星遥感可以有效的弥补地基观测在空间分辨率上的不足, 特别是在环境恶劣的偏远地区不宜设地面观测点, 卫星遥感更能突出其优越性, 但遥感卫星受分辨率的限制, 反演气溶胶需要地面数据进行验证^{[18]-[20]}。本文拟通过光学特性遥感、多角度卫星遥感、偏振特性遥感、雷达特性遥感四个方面分别综述了气溶胶卫星遥感研究进展, 重点论述了各自反演算法及优缺点。在此基础上提出大气气溶胶遥感研究存在的问题及展望, 以期对后续大气气溶胶遥感研究提供参考。

1 卫星遥感研究进展

1.1 卫星遥感传感器

目前应用于气溶胶的卫星传感器很多, 这些传感器为人们研究气溶胶提供了大量有用信息。气溶胶主要三种机制影响气候变化: 大气气溶胶对短波和长波的直接散射或吸收, 即直接辐射强迫, 而它的直接辐射效应对大气有三方面的影响: 气溶胶的散射作用将减少入射到地气系统的太阳

表 1 应用于气溶胶的卫星传感器

传感器分类	传感器名称	空间分辨率	主要用途	参考文献
	AVHRR	1.1	气象、气候、大气能量	高玲, 张里阳 ^[22]
	TOMS	50	大气臭氧探测、气溶胶	任霄玉和任国玉 ^[23]
	SAGEII SAGEIII	-	气溶胶的垂直分布信息	Thomason, L. W. Poole, L. R. Randall, C. E. ^[24]
	ATSR-2	1	大气气溶胶、臭氧和水汽	Sogacheva, Larisa; De Leeuw, Gerrit ^[25]
	GOES	1	检测云、污染物和霾, 识别强烈风暴	-
光学特性传感器	MERSI	0.25	能高精度定量遥感云特性、气溶胶、陆地表面特性	周永波, 白洁 ^[26]
	HJ-1	0.03	用于环境气象监测	盛莉, 黄敬峰 ^[27]
	GMS-5	-	气象	张军华, 毛节泰 ^[28-29]
	CBERS	0.019	地球资源和环境观测	王中挺 ^[30]
	MIPAS	3 垂直分辨率	温度、气溶胶陆地	-
	MODIS-MOD04	1.2: 10*10	气溶胶 (L2: 每天, L3: 8 天)	毛节泰, 季成才 ^[31]
	TM	0.03	陆地	宋巍巍, 管东生 ^[32]
多角度传感器	AATSR	1	湿度、气溶胶、陆地、地表、SST、植被特征	Kokhanovsky ^[33]
	MISR	0.275	气溶胶、辐射平衡观测	Kahn, R. ^[34]
偏振特性传感器	POLDER	6	气溶胶	顾红, 顾行法 ^[35]
卫星雷达传感器	CALIPSO	0.03 垂直分辨率	气溶胶和云在大气中的垂直分布	赵一鸣, 江月松 ^[36] , 赵剑 ^[37]
	CLOUDSAT(CPR)	垂直 0.5 水平 1.4*2.5	云垂直结构及其光学物理特性	-

辐射,起冷却作用;气溶胶吸收太阳短波辐射,对其所在的气层有加热作用,气溶胶的冷却和增暖两种作用的大小与其吸收散射比、地表反射率有关。大气气溶胶还起到云凝结核的作用;大量的气溶胶颗粒可能使云滴的数密度增加,云滴的平均半径变小,这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长,甚至使降水减少。气溶胶可以改变大气物理化学过程,从而影响温室气体的浓度和分布。这些都会影响到地气系统的能量平衡,从而对气候变化有影响^[21]。所以通过这些传感器获得的气溶胶辐射特性可以研究气候变化。表 1 通过把卫星气溶胶遥感传感器分成四大类分述了各种传感器的空间分辨率及其主要用途。

1.2 卫星遥感反演气溶胶方法

根据各种传感器各自的特性,学者发展了各种各样的气溶胶反演算法。表 2 中算法目前都是广泛应用的。

其他一些算法;Muhammad Bilal 等提出一种用于混合表面的简单的高分辨率算法^[53];Nicolas L.

Sifakis 等开发了用于高分辨率卫星映射的光学厚度陆克里斯汀代码和 Angstro 指数及其应用^[54-55]; LABITS 算法即基于时间序列技术的陆地气溶胶和双向反射率反演,这个算法是基于两个假设,即在观测的时候地表反射特性和在短距离内气溶胶光学特性都是改变很少的^[56-57]。AERUS-GEO 算法即用 GEO 数据定向分割的方法反演气溶胶和地表反射率。法国将通过 ICARE 主题中心发布 AERUS-GEO 产品 1 (<http://www.icare.univ-lille1.fr/drupal/>)^[58]。

2 卫星气溶胶遥感反演产品 AOD 应用进展

国内外一些学者通过各种传感器 AOD 产品与 AERONET 产品进行对比,开展了其 AOD 产品的进度验证工作^[12]。王莉莉,辛金元等利用中国的气溶胶观测网 CSHNET 评估 MODIS 气溶胶的光学厚度在中国不同生态类型和地理区域的适用性^[59]。

还有一些学者研究了中国近几十年来全国各

表 2 卫星气溶胶几种主要反演算法

传感器分类	反演算法	算法优缺点	参考文献
光学特性传感器	暗目标法	只能适应于低反射率的像元且需要高精度的已知地表反射率的先验知识	Kaufman ^[38-41]
	扩展暗像元法	干旱半干旱以及城市等高反射率地区	
	结构函数法	利用了地表反射率短时间内不变的特点,并且结构函数值简单表达,但忽略了地气交互的多次散射	周春艳,仲波 ^[42]
	反差减少法	可以应用于暗像元不存在的陆地区域,但很难找到时间间隔小且无气溶胶分布	Tanre D ^[43]
	多星协同反演算法	无需事先假定气溶胶类型等参数,无须估算地表反照率,可应用于包括城市等高反射率地区在内的各种地表类型	唐家奎 ^[44]
多角度传感器	V5.2 算法	相对于暗像元法可见光和中红外通道的反射率比值不再是常量而是函数关系,同时也考虑植被指数(NDVI)的影响	Robert.C.Levy 徐梦溪,肖钟湧 ^[45-46]
	双角度算法(ATSR-DV)	适应于各种区域但精度有待于进一步验证	Veefkind ^[47]
	基于 MISR 的多角度算法	选择的是全球区域的气溶胶模型,当一些角度像元受影响,仍可以利用其他角度的像元信息进行反演计算	梁顺林 ^[48]
偏振特性传感器	敏感性分析方法	能同时反演气溶胶模式、气溶胶形状、AOD	Cheng ^[49]
	云顶 AOD 算法	能在有云的情况下进行气溶胶反演	Waquet ^[50]
雷达特性传感器	选择性迭代边界定位(SIBYL)、分类算法(SCA)、混合消光系数反演算法(HERA)	经过一系列方法的处理,最终得到的气溶胶和云空间分布信息、消光系数廓线、云的透明性等	Winker,Omar ^[51-52]

地区的 AOD 分布以及四季变化^{[16-17][60]}。薛文博等利用 2005-2012 年 MODIS 气溶胶产品分析中国地区 AOD,得出与 2005-2007 均值相比,绝大部分省份 2008-2010 年期间 AOD 下降趋势非常明显,而在 2011-2012 年期间又回升,但大部分还是低于 2005-2007 年均值的^[61]。

何秀、邓兆泽等利用 AOD 与 PM₁₀ 做相关性分析,发现二者的直接相关程度较低。而将 AOD 除以气溶胶季节性标高,在进行相对湿度订正后可以应用于地面 PM₁₀ 检测^[62]。经济的高速发展,灰

霾现象在我国日趋严重,一些学者对此进行了一些监测研究^[63]。

3 结束语

在气溶胶遥感方面,已经做了大量的工作,但还是存在一些问题:

(1)目前研究气溶胶遥感的方法很多,不同方法适应范围、准确性如何还需要进一步研究。可以考虑进行一次综合的仪器和方法的比较试验,通过分析同时观测的结果,评价不同方法的准确性、

表 3 CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶光学厚度产品各项统计参数^[59]

站点	生态类型	n	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
拉萨	高原农业	29	16%	0	55%	45%
海北	高原草原	13	16%	31%	38%	31%
沙坡头	荒漠	25	15%	0	88%	12%
鄂尔多斯	荒漠	36	24%	6%	55%	39%
阜康	荒漠	80	55%	0	93%	7%
海伦	农业	16	14%	25%	6%	69%
三江	沼泽湿地	41	42%	15%	36%	49%
长白山	温带森林	58	46%	38%	29%	33%
北京森林	暖温带森林	97	50%	31%	10%	59%
西双版纳	热带雨林	53	65%	68%	2%	30%
太湖	湖泊	45	68%	0	33%	67%
胶州湾	海湾	92	63%	3%	46%	51%
上海	沿海城市	63	75%	2%	73%	25%
兰州	西部城市	52	43%	29%	21%	50%
北京	东部城市	64	64%	6%	59%	35%
香河	城市郊区	40	78%	15%	10%	75%
沈阳	城郊农业	93	53%	25%	18%	57%
安塞	农业	17	61%	41%	0%	59%
封丘	农业	63	89%	2%	35%	63%
盐亭	农业	46	81%	20%	4%	76%
桃源	农业	58	79%	2%	10%	88%

a)n: 地面观测期间 MODIS 产品样本数;r₁:MODIS 产品样本数与地面观测资料数之比;r₂:MODIS 产品小于观测值且在误差线之外所占比重;r₃:MODIS 大于观测值且在误差线之外所占比重;r₄:在误差内的点所占比重。

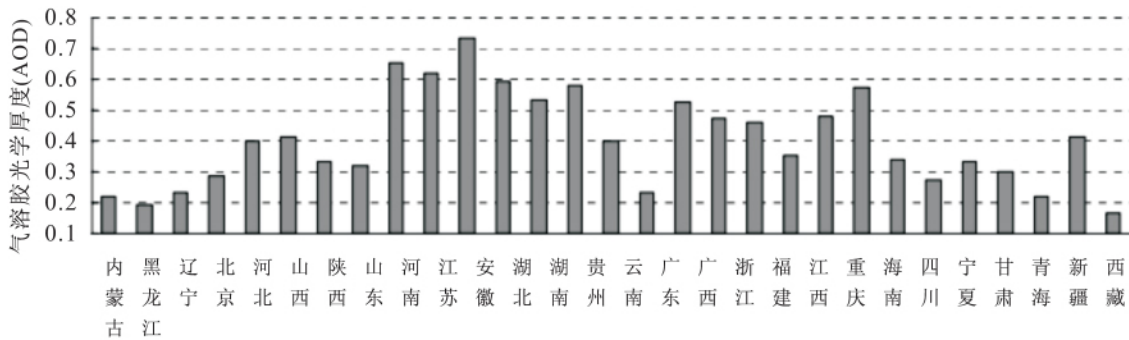


图 1 中国各地 10 年平均 AOD 特征^[16]

适应范围,为以后的气溶胶研究提供可行方法和评价结果可信性。例如在 MODIS 卫星遥感气溶胶

这一领域,目前仍然面临一些挑战和困难,包括高反照率背景地区气溶胶的反演、海上近岸地区泥

沙含量较大海域上空的气溶胶反演、气溶胶类型(气溶胶散射吸收特性)的精确确定、不同区域的气溶胶模型选择、地标反射率的处理等等。

(2)地面监测站稀疏,满足不了全球性的研究评价的需要。卫星遥感受时空分辨率的限制,城市区域尺度气溶胶遥感的业务化监测难度很大。

(3)气溶胶的长时间序列和空间分布情况研究也在逐步的开展,气溶胶的季节性研究,在不同文献中发现气溶胶的季节分布研究不尽相同,这就需要统一的研究。

参考文献

- [1] 韦莲芳, 杨复沫. 大气气溶胶消光性质的研究进展[J]. 环境化学, 2014, 33(5): 705-715.
- [2] 韩永, 王体健. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 7396-7407.
- [3] 刘强, 王明星. 大气气溶胶研究现状和发展趋势[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(3): 17-23.
- [4] 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 477-498.
- [5] 王磊, 张鹏等. 多角度气溶胶遥感研究进展[J]. 遥感信息, 2012, 01: 110-115.
- [6] 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.
- [7] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.
- [8] 宋薇, 张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 76-82.
- [9] Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of oceans [J]. Appl Opt, 1978(17): 1631-1636.
- [10] 赵柏林, 余小鼎. 海上大气气溶胶的卫星遥感研究[J]. 科学通报, 1986, 31: 1645-1649.
- [11] 齐玉磊, 葛颢铭, 黄建平. 北方地区 MODIS 和 MISR 与 AERONET 气溶胶光学厚度的比较及其时空分布分析[J]. 科学通报, 2013, 58: 1670-1679.
- [12] 范学花, 陈洪滨. POLDER-2/PARASOL 卫星气溶胶业务产品在北京地区的验证分析[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 137-144.
- [13] Fan X. H., P. Goloub, J.L. Deuzé, H.B. Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over North East Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 697-707.
- [14] Wang Z T, Li Q. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16 (3): 596-610.
- [15] 胡引翠, 史广峰. 大气气溶胶遥感反演研究进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(11): 2612-2613, 2617.
- [16] 郑小波, 周成霞. 中国各省区近 10 年遥感气溶胶光学厚度和变化[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 595-599.
- [17] 郑小波, 罗宇翔. 中国气溶胶分布的地理学和气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 255-263.
- [18] Hansen J, Sato M, Rudy R. Radiative forcing and climate response[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 6831-6864.
- [19] Xia X H, Chen Z, Wang L P, etc. Significant Reduction of Surface Solar Irradiance Induced by Aerosols in a Suburban Region in Northeastern China [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (22): 6531-654.
- [20] B. Holben, T. Eck, I. Slutsker, et al. AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [21] 宋薇, 张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 76-82.
- [22] 高玲, 张里阳, 李俊, 等. 利用 AVHRR 数据反演陆地气溶胶光学厚度. 应用气象学报, 2014, 25(1): 42-51.
- [23] 任霄玉, 任国玉, 魏建明. 我国北方 TOMS 气溶胶光学厚度与地面沙尘天气频数的比较[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 874-881.
- [24] Thomason, L.W. Poole, L.R. Randall, C.E. SAGE III aerosol extinction validation in the Arctic winter: comparisons with SAGE II and POAM III[J]. Atmos. Chem. Phys., 2007, 7(5): 1423-1433.
- [25] Sogacheva, Larisa; De Leeuw, Gerrit. Aerosol and cloud properties using (A)ATSR: retrieval algorithm and application for aerosol-cloud interaction[J]. 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014.
- [26] 周永波, 白洁. FY-3A/MERSI 海上沙尘天气气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 771-786.
- [27] 盛莉, 黄敬峰等. 综合利用环境星 CCD 和红外数据反演大气气溶胶光学厚度[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 276-281.
- [28] 张军华, 斯召俊, 毛节泰等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 23-35.
- [29] Mao Jie tai, Liu Li, Zhang Jun hua. GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu lake[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59: 351-359.
- [30] Wang Zhongting, Chen Liangfu, Gong Hui. Modified DDV method of aerosol optical depth inversion over land surfaces from CBERS-02B[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1053-1066.
- [31] 李成才, 毛节泰. 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, 39 增刊 108-117.
- [32] 宋巍巍, 管东生. 利用 TM 影像反演广州市气溶胶光学厚度空间分布[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1638-1645.
- [33] A.A. Kokhanovsky et al. The inter-comparison of AASTR dual-view aerosol optical thickness retrievals with results from various algorithms and instruments[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009.
- [34] Kahn, R.A., Gaitley, B.J., Crean, K.A., Diner, D.J., Martonchik, J.V., Holben. MISR global aerosol optical depth validation based on two years on two years of coincident AERONET observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2005(110).
- [35] GUO Hong; GU Xingfa; XIE Donghai. A Review of Atmospheric Aerosol Research by Using Polarization Remote Sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 7(34): 1873-1880.
- [36] 赵一鸣, 江月松, 张绪国. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 2943-2954.
- [37] 赵剑, 孙学金. CALIPSO 星载激光雷达系统在全球气溶胶探测中应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 3(1): 50-54, 59.
- [38] Kaufman, Tanre D, Gordon H R. Passive remote sensing of atmospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect[J].

- Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 16815–16830.
- [39] Kaufman Y J, Wald A E, et al. The MODIS 2.1 μ m Channel correlation with visible reflectance for using in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Transactions on Geo science and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286–1298.
- [40] Kaufman Y J, Tanre D. Algorithm for remote sensing of troposphere aerosol from MODIS [J]. NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document. Goddard Space Flight Center, 1998, 85.
- [41] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L M. MODIS semi-annual Report [R]. 2002.
- [42] 周春艳, 仲波. 基于 HJ-1A/B 卫星利用结构函数法反演北京地区气溶胶光学厚度 [J]. 第十六届中国环境遥感应用技术论坛论文集. 2012.
- [43] Tanre D, Deschamps P Y, DEVAUX C. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 15955–15964.
- [44] 唐家奎, 薛勇, 虞统等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法 [J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(5): 474–481.
- [45] Robert C. Levy, Lorraine A. Remer. A new algorithm for retrieving aerosol properties overland from MODIS spectral reflectance [J]. submitted by publication. J Geophys Res., July 2006.
- [46] 肖钟湧, 江洪等. 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.
- [47] J. Peijin, Veeffkind, Gettit de Leeuw, Phillip A. Durkee. Retrieval of aerosol optical depth over land using two-angle view satellite radiometry during TARFOX [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(25): 3135–3138.
- [48] 梁顺林. 定量遥感 [M]. 北京, 科学出版社, 2009: 154–156.
- [49] Cheng T H, GU Xing fa. High-resolution Directional Polarimetric Camera (DPC) used in the remote sensing of aerosol properties [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111: 895.
- [50] F. Waquet, J. Riedi, L. Labonnote. Aerosol Remote Sensing over Clouds Using A-Train Observations [J]. Journal of the atmospheric sciences, 2009(66): 2468–2480.
- [51] Winker D M, Vaughan M A, Omar A. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(11): 2310–2323.
- [52] Omar A H, Winker D M. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(10): 1994–2014.
- [53] Muhammad Bilal, Janet E. Nichol, Max P. Bleiweiss, David Dubois. A Simplified high resolution MODIS Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) for use over mixed surfaces [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 135–145.
- [54] Nicolai Sifakis, Christos Iossifidis, Charis Kontoes. CHRISTINE Code for High Resolution Satellite mapping of optical Thickness and Angstrom Exponent. Part II: First application to the urban area of Athens, Greece and comparison to results from previous contrast-reduction codes [J]. Computers & Geosciences, 2014, 62: 142–149.
- [55] Man Sing Wong, Janet E. Nichol, Kwon Ho Lee. An operational MODIS aerosol retrieval algorithm at high spatial resolution, and its application over a complex urban region [J]. Atmospheric Research, 2011, 99: 579–589.
- [56] Guang Jie, Xue Yong. Comparison Of Two Methods For Aerosol Optical Depth Retrieval Over North Africa From MSG/SEVIRI Data [J]. IEEE, 2014, 335–338.
- [57] D. Carrer, J. L. Roujean, O. Hautecoeur, T. Elias. Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI MSG visible Observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, D10208: 1–24.
- [58] Carrer, D., X. Ceamanos, B. Six, J.-L. Roujean. AERUS-GEO: A newly available satellite-derived aerosol optical depth product over Europe and Africa, Geophys. Res. Lett. 2014.
- [59] 王莉莉, 辛金元, 王跃思. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性 [J]. 科学通报, 2007, 52(4): 477–486.
- [60] 邵培, 麻金继. 基于偏振数据反演北京地区气溶胶光学厚度及其时空特征的研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2012, 02.
- [61] 薛文博, 武卫玲等. 中国气溶胶光学厚度时空演变特征分析 [J]. 环境与可持续发展, 2013, 4: 17–21.
- [62] 何秀, 邓兆泽等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM10 监测方面的应用研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2010, 46(2): 178–184.
- [63] 毛晓琴, 陈勇航. 应用 CALIPSO 卫星资料研究长三角地区灰霾天气特征 [J]. 2009, 第 26 届中国气象学会年会.

(上接第 50 页)

- [3] 陈孝杨, 黄河, 桑宏庆. 应用地累积指数法评价淮河流域沉积物中重金属污染 [J]. 安徽科技学院学报, 2006, 20(2): 35–38.
- [4] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义 [J]. 地理科学, 25(5): 590–596.
- [5] 郁亚娟, 黄宏, 王晓栋, 等. 淮河沉积物中重金属的测定和污染评价 [J]. 环境科学研究, 16(6): 26–28.
- [6] 杨振, 胡明安, 黄松. 大宝山矿区河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 桂林学院学报, 27(1): 44–48.
- [7] 周建民, 党志, 蔡美芳, 等. 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化 [J]. 环境科学研究, 18(3): 5–10.
- [8] 淮南市人民政府. 淮南生态市建设规划(2003–2020) [R]. 淮南: 淮南市人民政府, 2005.6
- [9] 淮南市人民政府. 淮南生态市建设规划(2003–2020) [R]. 淮南: 淮南市人民政府, 2005.6
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach [J]. Water Res, 1980, 14(2): 975–1001.
- [11] 向勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 700–705.
- [12] 陈峰, 胡振琪, 柏玉, 等. 矸石山周围土壤重金属污染的生态风险评价 [J]. 农业环境科学, 2006, 25(增刊): 575–578.
- [13] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究 [J]. 土壤学报, 2004, (6): 6–14.
- [14] 陈怀满. 土壤—植物系统中重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 徐磊, 张华, 桑树勋. 煤矸石中微量元素的地球化学行为 [J]. 煤田地质, 2002, 30(4): 1–3.