

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 ..... 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 ..... 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM<sub>1</sub> 污染特征及来源 ..... 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 ..... 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 ..... 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM<sub>2.5</sub> 组分及其活性氧物质对比 ..... 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM<sub>10</sub> 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 ..... 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM<sub>2.5</sub> 镧系元素组成特征及来源解析 ..... 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 ..... 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 ..... 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 ..... 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 ..... 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 ..... 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 ..... 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 ..... 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO<sub>2</sub> 脱气的空间变化及其影响因素 ..... 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 ..... 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 ..... 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 ..... 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 ..... 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 ..... 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 ..... 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO<sub>2</sub> 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 ..... 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 ..... 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 ..... 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 ..... 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe<sup>0</sup> 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 ..... 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 ..... 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 ..... 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 ..... 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 ..... 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 ..... 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K<sup>+</sup> 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 ..... 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 ..... 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 ..... 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 ..... 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 ..... 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 ..... 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 ..... 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 ..... 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO<sub>2</sub>-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 ..... 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 ..... 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 ..... 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 ..... 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 ..... 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 ..... 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 ..... 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 ..... 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 ..... 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 ..... 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 ..... 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 ..... 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO<sub>x</sub> 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 ..... 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

# 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征

赵仕伟<sup>1,2,3,4</sup>, 高晓清<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京市 5111 信箱, 北京 100094)

**摘要:** 通过与 AERONET 太阳光度计站点数据进行对比验证, 确认了 MODIS C6 AOD 融合产品在西北地区的适用性. 利用 2006 ~ 2015 年 MODIS/AQUA C6 MYD08-M3 产品分析中国西北地区气溶胶光学厚度的时空变化特征和形成原因. 结果表明: ①从空间分布特征来看, 塔里木盆地和关中盆地是高值区, 青海南部、甘肃西南部是低值区; 准噶尔盆地是前后 5 年年均 AOD 对比增量区, 柴达木盆地和河套地区是对比减量区. ②从时间变化特征来看, 近 10 年西北地区年均 AOD 变化范围为 0.18 ~ 0.22, 2011 年起呈缓慢下降趋势, 平均年降幅约为 0.32%; 南疆地区呈现较为明显的年际变化特征, 与沙尘天气强弱、频次的年份分布直接相关; 东部地区在 2011 ~ 2015 年, 下降趋势显著, 平均年降幅达到 1.1%; 北疆和青藏地区年均 AOD 整体保持平稳; 西北地区不同区域 AOD 季节变化均呈现从春季至秋季逐步下降, 冬季再次回升的相同关系.

**关键词:** MODIS; 气溶胶光学厚度; AERONET; 时空特征; 西北地区

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2637-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611164

## Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product

ZHAO Shi-wei<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Xiao-qing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Mailbox 5111, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This work compared the collection 6 MODIS aerosol optical depth products with sun photometer data from AERONET, and evaluated the applicability of C6 merged data in the northwest of China. The spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of AOD over northwest of China were analyzed by MODIS/AQUA C6 MYD08-M3 products from 2006 to 2015, and the results showed that Southern Xinjiang and Guanzhong region of Shanxi province had relatively high AOD, whereas the south of Qinghai and Gansu province had low values; Junggar Basin was the incremental area of AOD for the first 5 years and second 5 years, whereas converse result existed in Qaidam Basin and Hetao area. Temporally, the yearly mean AOD ranged from 0.18 to 0.22, and the declined trend occurred in 2011, and the annual decrease rate was about 0.32%; Because of different intensity and frequency of dust weather, the south of Xinjiang showed a significant interannual variation characteristic; East of the northwest displayed an obviously declining trend from 2011 to 2015, and the yearly mean decrease was about 1.1%. The AOD in north of Xinjiang and Qinghai-Tibet remained stable. The seasonal changes of AOD among different areas over the northwest had the same trend, all gradually declined from spring to autumn, and increased in winter.

**Key words:** MODIS; aerosol optical depth(AOD); AERONET; spatio-temporal characteristics; northwestern China

大气气溶胶通过吸收、散射太阳辐射或通过参与云的微物理过程, 改变云的辐射特性, 直接或间接影响地-气系统辐射平衡, 是影响全球气候变化的重要因子. 世界气象组织(WMO)大气科学委员会第 16 届会议在其成果报告《未来 10 年展望: 新挑战与机遇》中指出: 大气气溶胶对空气质量、天气以及气候的影响是未来 10 年大气科学的 6 大研究主题之一<sup>[1]</sup>. 由于气溶胶的时空多变性、化学成分的复杂性以及气溶胶-云凝结核-云-辐射之间复杂的非线性关系, 使得研究气溶胶的气候效应非常困难, 且具有

很大的不确定性<sup>[2]</sup>. 大气气溶胶浓度时空分布的信息以及物理、化学、光学特性、尺度分布和大气含量等信息的准确获取, 为准确估算气溶胶直接和间接辐射强迫提供可能<sup>[3]</sup>.

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)作为气溶胶最基本的光学特性之一, 是目前可以得到的气溶胶数据中覆盖范围最广、较准确的一种数

收稿日期: 2016-11-21; 修订日期: 2017-01-21

基金项目: 国家自然科学基金委重大专项培育项目(91437108)

作者简介: 赵仕伟(1982~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为气溶胶气候效应, E-mail: fqyy0122@163.com

据,同时也是推算气溶胶含量、评估大气污染程度、确定气溶胶气候效应的关键参数<sup>[4,5]</sup>。由于卫星探测方法具有覆盖面积广,信息获取方便、快捷等特点,国内外多颗卫星都提供了 AOD 反演产品,如美国的 MODIS、MISR、SeaWiFS、VIIRS、OMI、Calipso 等,国内利用环境一号(HJ-1)系列卫星上搭载的宽覆盖多光谱 CCD 相机和 FY-3A 上搭载的中分辨率光谱成像仪(MERSI)都可以实现对 AOD 的反演。MODIS AOD 产品采用陆地植被暗像元方法(dark target, DT)和深蓝通道算法(deep blue, DB)分别获取陆地植被、沙漠、干旱等区域的气溶胶信息,采用水体暗像元特性获取海洋区域的气溶胶信息<sup>[6,7]</sup>,由于产品具有较高的时空分辨率,数据质量良好,使得该产品在空气污染研究领域中得到了最为广泛的应用。

目前,NASA 已经发布了 3 个版本的气溶胶再处理产品,分别是 C4、C5 和 C6 版。我国学者利用不同版本气溶胶产品做过多方面研究:李成才等<sup>[8]</sup>利用北京和香港地区地面太阳光度计站点数据对 MODIS 气溶胶产品进行了对比验证,然后利用产品资料统计分析了中国东部地区气溶胶光学厚度季节分布和变化特征;邓学良等<sup>[9]</sup>利用 MODIS C4 版气溶胶产品中 550 nm 气溶胶光学厚度和小颗粒比例两个参数的关系,计算得到气溶胶光学厚度,并进一步研究了我国海域人为和沙尘气溶胶的时空分布;罗宇祥等<sup>[10]</sup>利用 MODIS C5.1 版 AOD 产品统计分析了 2001~2010 年中国地区大气气溶胶光学厚度的详细分布状况和季节变化特征。在 MODIS C6 产品发布之前,MODIS C5 DT AOD 是最为成熟、也是在目前现有研究中应用最为广泛的 AOD 产品,但由于 DT 算法在沙漠、干旱半干旱地区无法反演 AOD,造成了我国西部地区大量 AOD 数据的缺失。

中国西北地区因其特殊的地理位置,不仅是全球气候变化响应最敏感的地带,也是生态环境变化最脆弱的地区。近年来,起源于我国塔克拉玛干沙漠和内蒙古戈壁荒漠的沙尘暴频繁出现,加之人类农业、工业生产活动及交通运输排放的大气污染物,使得我国西北地区气溶胶含量丰富、类型多样、化学成分复杂,时空分布特征差异很大<sup>[11,12]</sup>。相比我国其他地区,该区域地基点稀少,缺乏对气溶胶卫星反演产品的检验,对气溶胶时空分布特征的研究也比较少<sup>[13]</sup>。MODIS C6 版产品在覆盖范围上为环境、气候分析提供了几乎全地表覆盖的大气气溶胶信息<sup>[14]</sup>,这为准确评估 MODIS 气溶胶产品在

国西北地区的适用性提供了可能,也为定量研究气溶胶的光学特性及时空分布特征提供了科学数据。本文利用全球气溶胶自动观测网(AERONET)站点数据对 MODIS C6 AOD 融合产品进行对比验证,评价产品的适用性和反演精度。在此基础上,采用 MODIS/AQUA C6 MYD08-M3 数据集开展分析,研究 2006~2015 年中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征及形成原因。

## 1 材料与方 法

MODIS C6 版气溶胶产品于 2014 年初发布,包含了第二代 DB 算法、DT 算法和数据融合产品。第二代 DB 算法是一个加强混合算法,适用区域从沙漠、干旱半干旱等高亮区域扩展到了浓密植被覆盖等暗区域,实现了对整个陆地区域的覆盖<sup>[15]</sup>。C6 DT 提供了 10 km 和 3 km 分辨率两种 AOD 产品<sup>[16]</sup>。为最大限度提高 AOD 数据覆盖率,MODIS C6 气溶胶产品中还包括了 DT 和 DB AOD 融合产品,融合方案是基于归一化植被指数(NDVI)数据将地表分为  $NDVI < 0.2$ 、 $0.2 \leq NDVI \leq 0.3$  和  $NDVI > 0.3$  共 3 个类别对 AOD 产品进行融合<sup>[17]</sup>。由于 MODIS C6 融合产品发布时间较短,数据的适用性评价和区域性验证工作以及在空气质量污染方面的应用还比较少。本文选取 MODIS/AQUA C6 版 MYD04\_L2 日产品和 MYD08\_M3 全球  $1^\circ \times 1^\circ$  格点月均值产品,提取“AOD\_550\_Dark\_Target\_Deep\_Blue\_Combined\_Mean\_Mean”数据集开展分析。

AERONET(aerosol robotic network)由 NASA 和法国国家科学研究中心(CNRS)共同组建的地基气溶胶遥感网络。AERONET 的目标是获取气溶胶的特征参数,并验证卫星反演的气溶胶参数。AERONET 在全球陆地和海洋上分布着 400 个观测站,采用的观测设备主要是 CIMEL 系列太阳光度计<sup>[18]</sup>。利用此太阳光度计获取的太阳直射光和天空漫射光反演气溶胶光学厚度、单次散射反照率和粒子尺度分布等气溶胶特性参数。由于利用地基太阳光度计观测反演气溶胶参数不受地表参数影响,它反演的 AOT 精度可以达到 0.01~0.02,可作为真值检验卫星反演结果<sup>[19]</sup>。

本文选取我国西北地区 6 个站点的 AERONET level 2.0 级 AOD 数据产品,具体站点信息和数据时段见表 1。AERONET 产品中包含了 340、380、440、500、675、870、1 020 nm 共 7 个波段的 AOD 数据,没有 550 nm 产品。由于气溶胶光学厚度的自然对

数与波长的自然对数之间存在二次多项式拟合关系<sup>[20]</sup>, 即:

$$\ln\tau_{\alpha}(\lambda) = a_0 + a_1\ln\lambda + a_2\ln(\lambda)^2$$

所以采用二次多项式拟合算法差值得到 550 nm AOD. 为使地面观测与卫星反演数据具有时空代表性和可比性, 以卫星过境前后 30 min 地基观测结果的平均值匹配地基站点位置  $\pm 25$  km 半径范围内的 MODIS 反演结果<sup>[21]</sup>. 针对对比分析结果, 本文

采用一元线性回归方程 ( $AOD_{modis} = a + b \times AOD_{aeronet}$ , 式中,  $a$  是截距,  $b$  是斜率)、相关系数 ( $R$ )、均方根误差 (RMSE) 和预期误差区间 (expected error, EE) 等多种统计指标对 MODIS AOD 产品进行验证. 预期误差区间  $EE_{DT} = \pm(0.05 + 0.15\tau_A)$ 、 $EE_{DB} = \pm(0.05 \pm 0.2\tau_A)$ , 式中,  $\tau_A$  为地基观测气溶胶光学厚度<sup>[22]</sup>. 为统一评价标准, 本文选取  $EE_{DB}$  为预期误差区间.

表 1 AERONET 中国西北地区站点信息<sup>[23]</sup>

Table 1 Information on AERONET sites in the northwest of China

站点名称	站点位置	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	下垫面情况	数据时段
DunHuang_LZU	敦煌	94.955	40.492	1061.0	沙漠戈壁	2012-04
Jingtai	景泰	104.100	37.333	1604.0	农场	2008-03 ~ 2008-04
Minqin	民勤	102.959	38.607	1373.0	沙漠戈壁	2010-05 ~ 2010-06
SACOL	兰州	104.137	35.946	1965.8	原生植被	2007-04 ~ 2007-07
Yulin	榆林	109.717	38.283	1080.0	丘陵草滩	2002-08, 2002-10
Zhangye	张掖	100.276	39.079	1461.0	荒漠草原	2008-04 ~ 2008-06

## 2 MODIS C6 AOD 融合产品与 AERONET 站点数据验证结果

图 1 是西北地区 6 个站点 MODIS C6 AOD 融合产品与 AERONET 太阳光度计站点数据散点图. 其中, “黑色实圈”为观测样点, “黑线”为正负误差线, “红色实线”为线性回归拟合线; 根据前文所述时空匹配方法, 共匹配数据点 162 个, 其中有 128 组样本 (数据质量控制 QA 标志为 2 和 3) 可供对比分析, 占数据点总数 ( $N = 162$ ) 的 79%, 具体站点数据验证结果和数据等级说明分别见表 2 和表 3; 二者拟合线  $y = -0.0025 + 0.8x$ , 相关系数为 0.72, 均方根误差为 0.18, 分别有 54 和 106 个点落在 EE 和 2 倍 EE 区间内, 约占样本总数 ( $N = 128$ ) 的 42% 和 83%; 分别有 20 和 6 个点的 MODIS 数据高于 EE 和 2 倍 EE 区间范围, 54 和 16 个点分别低于 EE 和 2 倍 EE 区间范围. 综合以上结果, 可以看出: MODIS

AOD 融合产品具有较好的覆盖度, 数据相关性较好, 虽然部分样本存在低估现象, 但具备一定的数据精度. 这与 Xie 等<sup>[24]</sup> 发现在中国西部地区 MODIS C5.1 DB AOD 存在严重的低估现象有所不同, 说明随着算法的升级, 第二代 DB 算法和 DT 算法融合产品在相同区域的反演结果更加合理, 适用性更强.

图 2(a) 为对比数据绝对误差相对频数分布图, 有 53 个数据误差在  $\pm 0.05$  内 (1 个总体标准偏差  $\sigma$ ), 约占样本总数的 41%, 有 87 个数据误差在  $\pm 0.15$  内, 占样本总数的 68%; 有 88 个数据存在正误差, 占样本总数的 69%, 40 个数据存在负误差, 占样本总数的 31%. 就相对误差频率分布而言 [图 2(b)], 有 58 个数据相对误差在 30% 以内, 占样本总数的 45%; 有 89 个数据相对误差 50% 以内, 约占样本总数的 70%; 有 88 个数据相对误差为负百分比, 占样本总数的 69%. 综合以上结果分析: MODIS C6 融合产品误差分布具有明显的单峰性、非对称性和

表 2 MODIS C6 版气溶胶融合产品对比验证结果

Table 2 Comparison results between MODIS C6 DB and DT merged product and AERONET sites data

站点	DB 和 DT 算法融合产品			
	样本数 ( $N$ )	相关系数 ( $R$ )	误差区间 ( $EE_{DB}$ )	均方根误差 (RMSE)
DunHuang_LZU	14	0.87	0.50	0.15
Jingtai	17	0.75	0.06	0.09
Minqin	11	0.97	0.82	0.11
SACOL	36	0.85	0.56	0.14
Yulin	26	0.88	0.31	0.06
Zhangye	24	0.70	0.46	0.20
Average/Sum	128	0.84	0.45	0.13

有界性,且有 41% 左右的数据分布在 1 个总体标准偏差  $\sigma$  内,有 45% 的样本数据相对误差控制在 30% 内,产品误差分布相对集中,小误差出现的比例较高,产品具有一定的准确度. 综合对比验证和误差分析结果可以说明:MODIS C6 融合产品在西北地区不同下垫面背景下,数据精度较好,且具有一定的覆盖范围,能够满足气候和环境研究的要求,可作为研究区域性气溶胶光学特征变化的基础数据.

表 3 MODIS C6 AOD 产品质量控制 (QA) 标志

QA 标志	质量等级说明
0	差 (Bad) 或不可信 (No Confidence)
1	边缘等级 (Marginal)
2	好 (Good)
3	非常好 (Very Good)

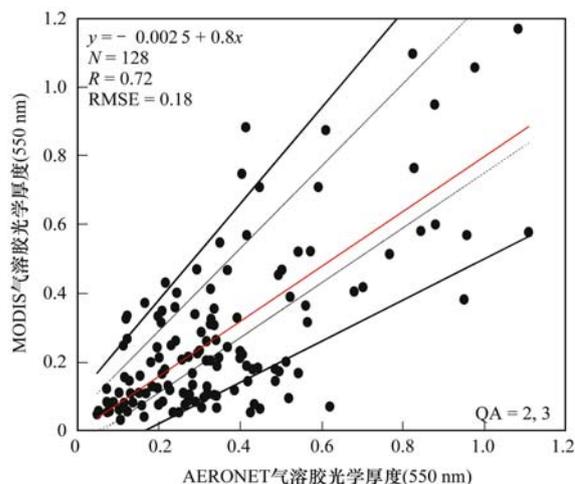


图 1 MODIS AOD 融合产品与太阳光度计站点数据散点图

Fig. 1 Scatter plots of AOD merged product from MODIS and sun photometer sites

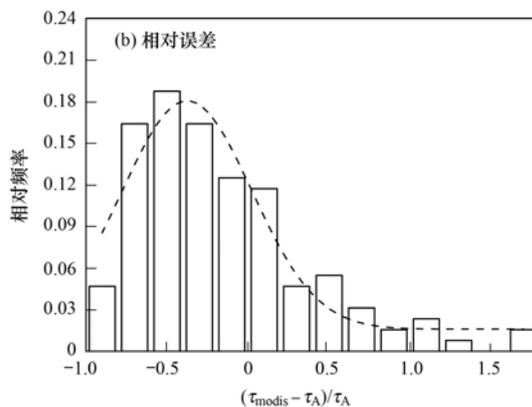
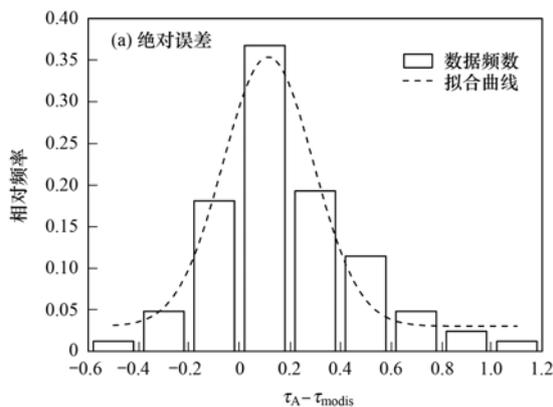


图 2 MODIS C6 AOD 融合产品误差相对频数分布

Fig. 2 Relative frequency distribution of MODIS C6 AOD merged product error

### 3 气溶胶光学厚度的时空变化特征

利用 2006 ~ 2015 年 MODIS/AQUA C6 MYD08-M3 产品,分析中国西北地区气溶胶光学厚度空间分布特征和时间变化特征,研究典型高值和低值区域形成原因. 通过提取 2006 ~ 2010 年和 2011 ~ 2015 年前后 5 年 AOD 差值分布,讨论西北地区 AOD 显著变化区域及其影响因素.

#### 3.1 空间分布特征

图 3(a) 是中国地区 2006 ~ 2015 年 MODIS AOD 年平均分布. 从中可以看出:东部地区仍然是 AOD 极端高值区. AOD 大于 0.8 的高值区主要位于华北南部、黄淮、江汉、长三角和四川盆地地区,这与近年来国内的一些研究学者对中国区域 AOD 的时空分布研究结论相同<sup>[25,26]</sup>. 这些地区 AOD 常年高值,主要由于工农业生产、建筑、交通运输等人类活动产生的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、氨气等污染气体转化成

的细颗粒气溶胶,以及矿物扬尘、烟尘等直接排放一次气溶胶. 通过前后 5 年 AOD 年平均差值分布可以看出[图 3(d)],减少区主要位于四川盆地、江南和华南地区、内蒙古中西部和西北地区东部. 四川盆地和吉林东部地区减量在  $-0.1 \sim -0.2$  之间,江南和华南地区减量在  $-0.1 \sim 0$  之间. 年平均值的降低也说明中国在原有典型气溶胶高值区,即长三角、珠三角和四川盆地的空气质量污染控制取得一定成效;AOD 年平均值对比增量区主要位于东北地区中东部、华北地区南部和黄淮地区东北部,其中高值区位于黑龙江中南部,增量值达到 0.15 以上,该区域气溶胶明显呈上升趋势,主要与当地秋冬季煤炭使用和大面积秸秆等生物质燃烧有关.

图 4 是我国西北地区 2006 ~ 2015 年 AOD 年平均、前后 5 年平均及差值分布. 如图 4(a)、4(b)、4(c) 所示,西北地区常年 AOD 高值区主要位于南疆盆地和陕西关中地区. 南疆盆地的塔克拉玛干沙

漠与巴丹吉林和腾格里沙漠形成了我国主要的沙尘源区,也是全球沙尘气溶胶的重要排放地,常年伴有沙尘天气发生. 韩永翔等<sup>[27]</sup>根据沙漠风积地貌所揭示的风场变化探讨了塔里木盆地的大气环流和沙尘暴成因,指出在暖季(春、夏),由于地面对大气感热加热作用强烈而形成热低压,当冷空气入侵,将加强热低压的发展,从而形成沙尘天气. 盆地的大部分区域 AOD 年平均值在 0.5~0.6,沙漠的北部、南部和东部均存在高值,年平均值大于 0.6. 偏东的若羌及周边地区年平均值大于 0.7,此高值分布与该地区的地形和气候特征密切相关. 塔里木盆地的北、西、南面分别被天山、帕米尔高原和昆仑山包围,受北方和西北方南下气流影响,气流经东天山山口进入塔里木盆地,在沙漠下垫面热力作用和沙漠东侧窄地形的共同作用下,形成高值区;陕西中部的关中地区是该省的经济核心区域,人口密集度较高,

人类活动造成了大量污染物的排放. 同时,关中地区平均海拔 500 m,特殊的盆地地形非常不利用污染物的扩散,使得该地区常年 AOD 处于高值,部分地区的 AOD 年平均值已达到 1.0. Dong 等<sup>[28]</sup>对陕西省的 AOD 变化趋势及成因进行了分析研究,同样指出地形因素和局地源是造成关中地区 AOD 高值的主要原因;AOD 小于 0.2 的低值区主要位于青海东南部和甘肃南部地区. 该地区地处青藏高原,平均海拔超过 3 000 m,常年受西北暖湿气流影响,人口稀疏,工农业生产较少,不易受人为源和自然源气溶胶影响,AOD 年平均值较低.

图 4(d)是 2006~2010 年和 2011~2015 年,前后两个 5 年 AOD 年平均差值分布. 从中可以看出,北疆地区准噶尔盆地大部分区域为 AOD 对比增量区. 该区域以乌鲁木齐、昌吉、石河子、奎屯和克拉玛依这 5 个城市形成天山北坡经济带,是新疆现

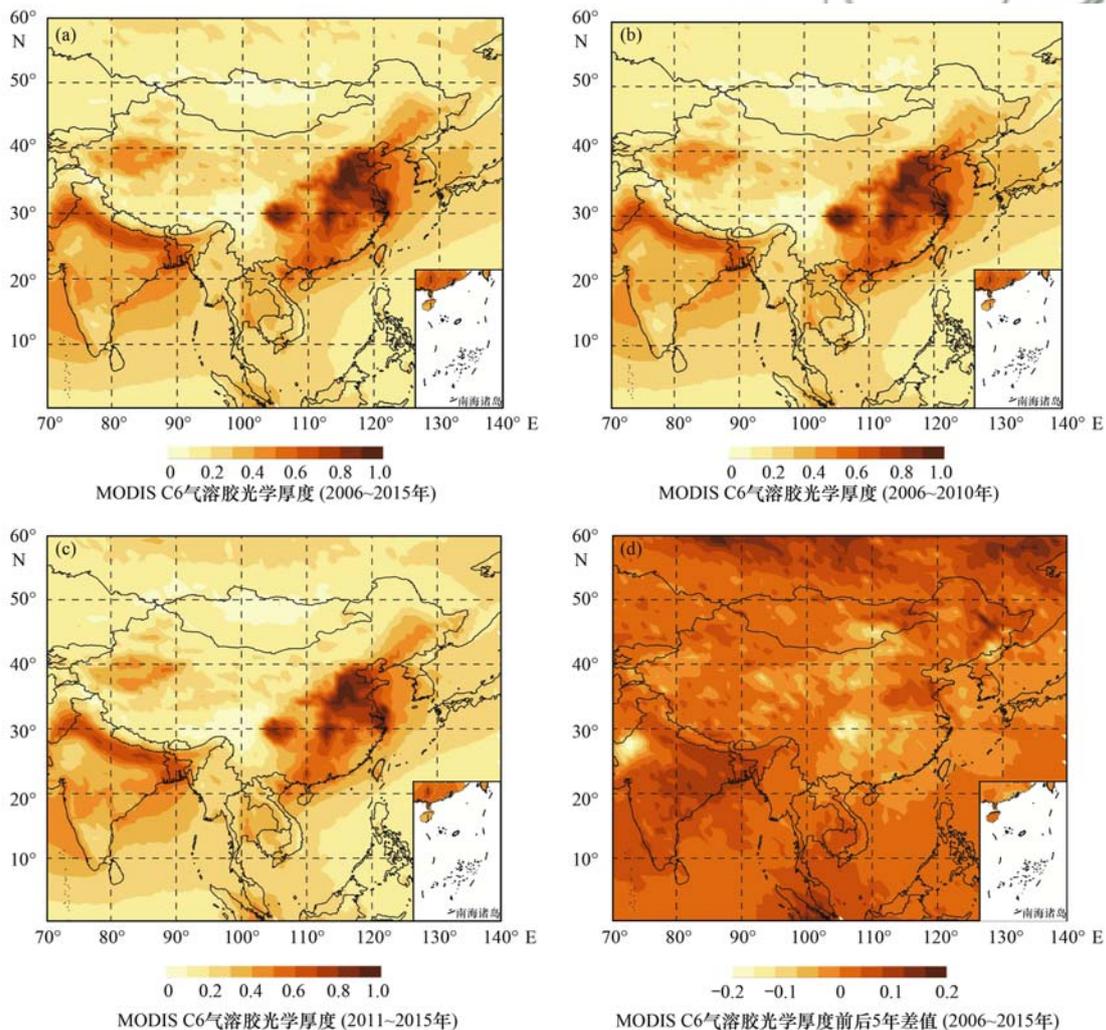


图 3 中国地区 2006~2015 年 MODIS AOD 年平均、前后 5 年平均及差值分布

Fig. 3 Distribution of yearly averaged AOD over China in 2006-2015, 2006-2010, 2011-2015 and the difference pattern of 2006-2010 and 2011-2015

代工业、农业、交通运输和科技等最为发达的核心区域,集中了全疆 83% 的重工业和 62% 的轻工业<sup>[29]</sup>,对近 5 年 AOD 增量具有一定贡献. 同时,准噶尔盆地中央地势较低,古尔班通古特沙漠形成的沙尘源气溶胶粒子不易向盆地外输送,从而导致准噶尔盆地不同类型气溶胶粒子累积,使得该区域表现出 AOD 年平均分布呈增加趋势;柴达木盆地和河套地区是 AOD 对比减量区. 有研究表明<sup>[30]</sup>:柴达木盆地的沙尘天气与大风天数有显著的相关性,而

造成柴达木盆地沙尘天气的冷空气路径主要为西向路径,即冷空气从帕米尔高原进入南疆盆地,翻越阿尔金山进入柴达木盆地. 近 5 年 AOD 年平均值减少,主要考虑为该地区冷空气活动减少所致. 河套地区为前后 5 年 AOD 对比显著减量区,该地区的生态环境综合治理、水土保持和退耕还林等生态建设工程的实施,使得土地利用和覆盖发生明显变化,地表植被不断丰富,降低了沙尘气溶胶对该地区常年 AOD 的贡献.

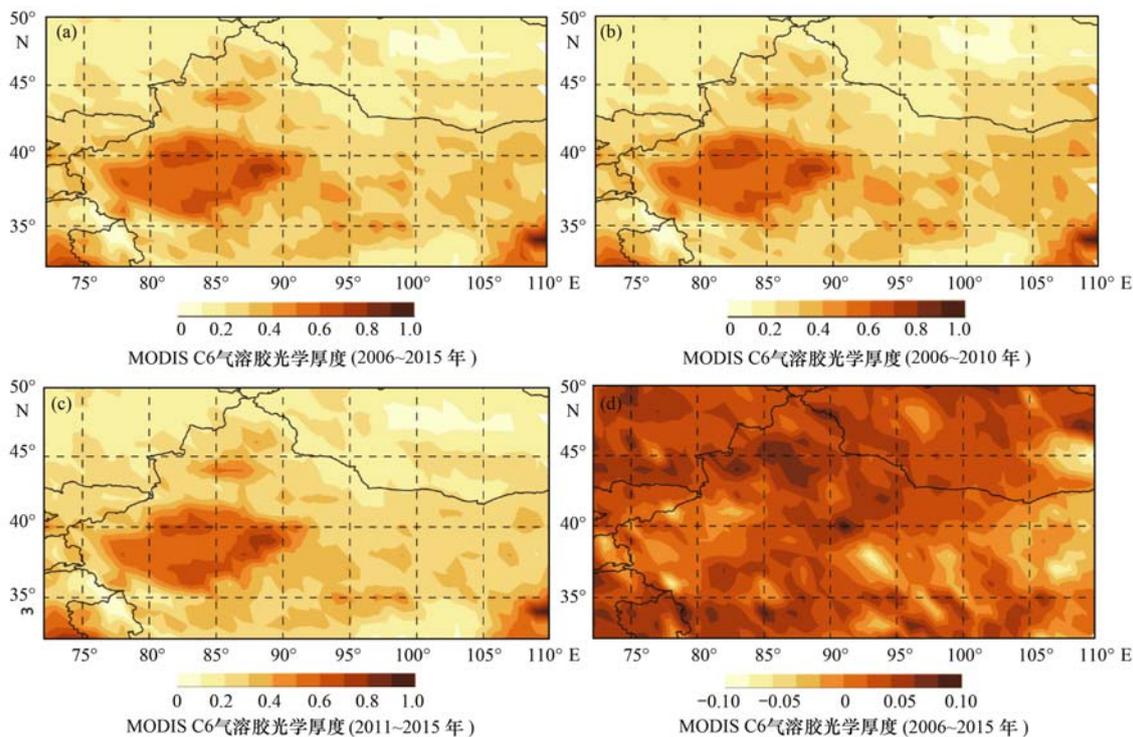


图 4 中国西北地区 2006~2015 年 MODIS AOD 年平均、前后 5 年平均及差值分布

Fig. 4 Distribution of yearly averaged AOD over the northwest of China in 2006-2015, 2006-2010, 2011-2015 and the difference pattern of 2006-2010 and 2011-2015

### 3.2 时间变化特征

考虑西北地区不同的地表、地形和植被特征,参照以往研究对西北地区气候区域的划分<sup>[31,32]</sup>,本文将西北地区划分为 4 个子区域(图 5):北疆地区(42°~50°N、80°~95°E, I 区),南疆地区(36°~42°N、72°~91°E, II 区),青藏地区(32°~40°N、91°~102°E, III 区),西北东部地区(33°~38°E、102°~110°E, IV 区).

#### 3.2.1 年际变化特征

图 6(a)是 2006~2015 年西北地区不同区域年均 AOD 变化情况,表 4 是年平均值及变化趋势结果. 从中可以看出,近 10 年西北地区年均 AOD 变化范围为 0.18~0.22,这与全球陆上气溶胶 AOD 均值(0.19)基本持平<sup>[33]</sup>,但明显低于我国其他气溶

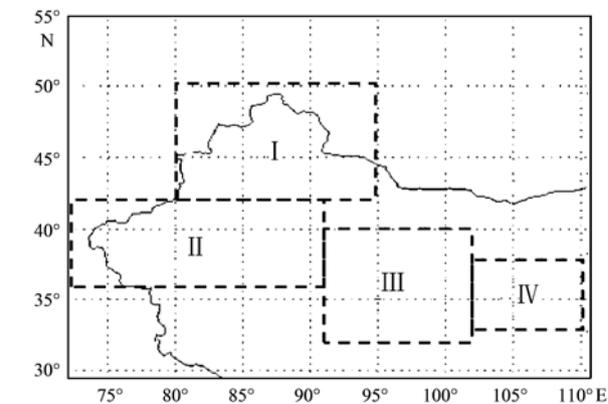


图 5 西北地区研究区域示意

Fig. 5 Divided research areas over the northwest of China

胶高污染区域. 2006 和 2010 年为最高值 0.22,此结果对应了这两个年份是沙尘高发年<sup>[34,35]</sup>. 从整体

变化趋势上看,2006~2010年,年均 AOD 基本保持不变,2011年起呈缓慢下降趋势,平均年降幅约为 0.32%,2015 年达到最低值 0.18;南疆地区呈现明显的年际变化特征,2006~2009 年间 AOD 降幅明显,2010 年因沙尘高发出现短暂上升后,2011~2015 年再次呈现缓慢下降趋势;东部地区年均 AOD 下降最为明显,平均年降幅达到 1.1%,特别是在 2011~2015 年,呈现了显著的下降趋势,这与前文所述空间分布特征中的明显减量区域有较好的对应;青藏地区与西北地区变化情况基本一致,年均 AOD 变化范围为 0.18~0.23,整体呈缓慢降低趋势,年降幅约为 0.46%;北疆地区年均 AOD 变化范围为 0.15~0.18,低于其他区域,10 年整体变化趋于平稳,说明北疆地区的空气污染水平最低. 2013 年起开始下降,源于该地区在 2013 年对主要污染区域实施了“煤改气”、热电联产和重点污染源防治等一系列大气污染防治措施,取得了一定效果.

### 3.2.2 季节变化特征

由于春季是西北地区沙尘天气高发期,西北地区不同区域年均 AOD 在春季显著升高[图 6(b)].

表 4 2006~2015 年西北地区不同区域 AOD 年平均值及变化趋势

Table 4 Yearly averaged AOD and variation tendency in different areas of the northwest China from 2006 to 2015

区域	AOD 全年			AOD 春季		
	平均值	变化范围	趋势/%	平均值	变化范围	趋势/%
西北地区	0.21	0.18~0.22	<b>-0.32</b>	0.30	0.25~0.34	<b>-0.81</b>
北疆地区	0.17	0.15~0.18	0	0.21	0.18~0.22	-0.24
南疆地区	0.31	0.28~0.35	-0.37	0.54	0.45~0.67	<b>-1.5</b>
东部地区	0.26	0.19~0.33	<b>-1.1</b>	0.34	0.25~0.44	<b>-1.5</b>
青藏地区	0.21	0.18~0.23	<b>-0.46</b>	0.34	0.28~0.41	<b>-1.3</b>

1) 粗体字表示结果已通过 95% 信度相关系数显著性检验

表 5 2015 年西北地区不同区域 AOD 季节变化

Table 5 Seasonal changes of AOD in different areas of the northwest China in 2015

区域	气溶胶光学厚度(AOD)				
	春季	夏季	秋季	冬季	全年
北疆地区	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.16 ± 0.05	0.17 ± 0.06
南疆地区	0.48 ± 0.06	0.35 ± 0.03	0.14 ± 0.03	0.18 ± 0.09	0.32 ± 0.22
东部地区	0.25 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.13 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.19 ± 0.08
青藏地区	0.29 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.11 ± 0.01	0.16 ± 0.06	0.22 ± 0.12

### 3.2.3 月际变化特征

图 6(c) 是 2015 年西北地区不同区域 AOD 月均值变化情况. 从中可以看出,南疆和东部地区呈现了比较相似的月际变化特征,3~11 月下降明显,12 月至次年 2 月再次回升,而北疆和青藏地区 4 月达到最大值,春季至夏季下降明显,秋季缓慢上升. 南疆地区在 3 月出现最大值 0.54,东部和青藏地区

其中,南疆地区由于受沙尘源区的影响,在局地天气系统扰动和扩散机制的作用下,整体波动较大,春季年均 AOD 达到 0.54(表 4),明显高于全年平均水平(0.31). 不同区域在春季的变化关系与全年呈现了比较相似的情况,说明西北地区由于春季的气候特征形成的沙尘气溶胶对全年区域性大气气溶胶光学厚度贡献很大. 对比前后 5 年年均春季 AOD 的变化情况,西北地区不同区域后 5 年的整体变化趋势较前 5 年趋于平缓,说明在 2006~2010 年间,西北地区受沙尘暴强弱、频次的影响较大,呈现了相对明显的波动特征. 从 2015 年西北地区不同区域 AOD 季节变化情况来看(表 5),春季 AOD 最大,均高于其他季节,说明西北地区春季受沙尘天气影响,大气污染水平最高. 秋季 AOD 最小,仅为 0.13 左右,说明在沙尘频数明显减小和降水增多的共同作用下,西北地区秋季空气质量最好. 在冬季,由于西北地区大气层结稳定,供暖引起的污染物不易扩散,使得 AOD 再次升高,特别是在北疆、东部和青藏地区,冬季 AOD 大多高于夏、秋季,接近于全年平均水平,说明西北地区除受自然源气溶胶影响外,人为源气溶胶同样是大气污染的主要来源.

分别在 11 月和 9 月出现最小值 0.1. 各区域在 3 月和 4 月的 AOD 显著高于其他月份,再次说明西北地区春季沙尘天气对空气质量污染的贡献. 南疆地区在 3~8 月月均 AOD 处于较高水平,说明该地区受春、夏两季的沙尘天气影响显著. 北疆和青藏地区由于夏季云量增加、降水增多,AOD 下降趋势明显,在秋季出现最低值;东部地区全年变化相对平稳,月

均值变化范围仅为  $0.19 \pm 0.08$ , 说明该地区受自然源气溶胶影响较小。

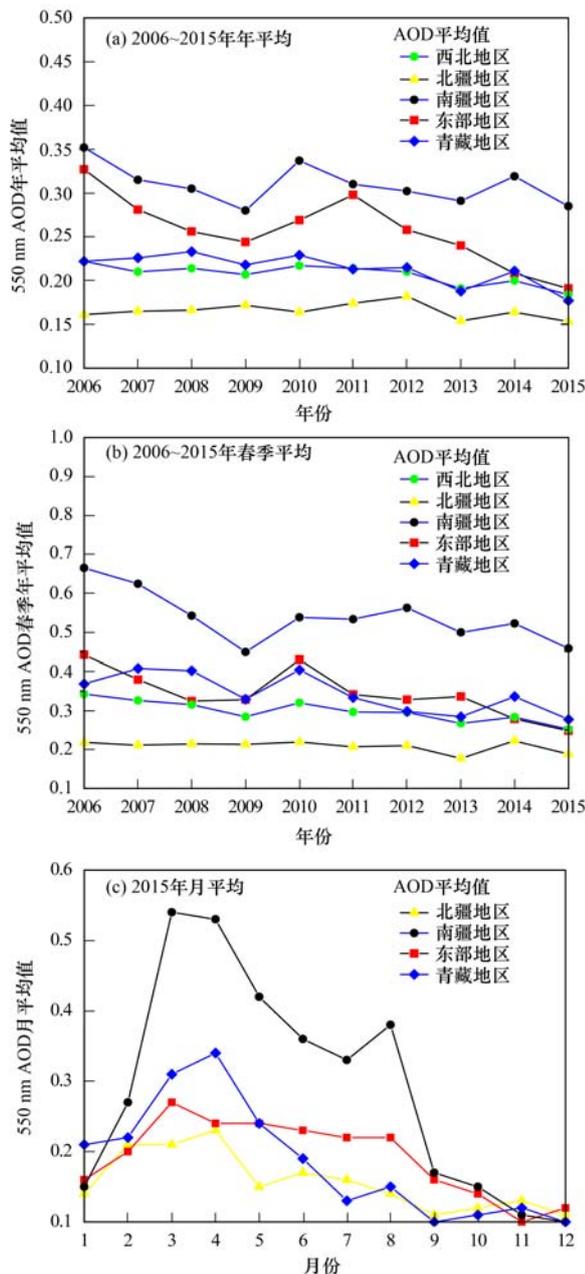


图6 西北地区不同区域 MODIS AOD 时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of MODIS AOD in different areas of the northwest China

## 4 结论

(1) MODIS AOD 融合产品具有较好的覆盖度, 数据相关性较好, 误差分布相对集中, 小误差出现的比例较高。虽然部分样本存在低估现象, 但产品整体具备一定的精度, 可用作研究区域性气溶胶光学特性和气候效应的基础数据。

(2) 西北地区 AOD 高值区主要位于南疆盆地

和关中盆地, 受地形影响显著, 具有明显的“盆地”效应。塔克拉玛干沙漠东侧的若羌和周边地区, 年平均值在 0.7 以上, 这与该地区受自然源气溶胶排放直接相关, 当地的地形和气候特征也是造成 AOD 常年偏高的主要原因。陕西关中地区由于人口密集度较高, 受人为源气溶胶影响较大, 盆地地形使污染物不易扩散, 年平均值在 0.6 以上, 也是西北地区气溶胶典型的高值区域; 准噶尔盆地大部分区域为前后 5 年 AOD 对比增量区, 柴达木盆地和河套地区为减量区。

(3) 西北地区年均 AOD 在 2006 ~ 2010 年, 基本保持不变, 2011 年起呈缓慢下降趋势, 平均年降幅约为 0.32%; 南疆地区呈现了较为明显的年际变化特征, 这与沙尘天气强弱、频次的年份分布直接相关; 东部地区在 2011 ~ 2015 年, 下降趋势显著, 平均年降幅达到 1.1%, 这与文中所述前后 5 年 AOD 差值减量区域有明显对应; 各区域在春季的变化关系与全年呈现了比较相似的情况, 说明春季沙尘气溶胶对全年区域性大气气溶胶光学厚度贡献很大; 各区域的月际变化特征基本一致, 从春季至秋季逐步下降, 冬季再次回升。

致谢: MODIS 气溶胶产品由 NASA 戈达德太空飞行中心 (GSFC) 提供, 地基太阳光度计站点数据由全球气溶胶自动观测网 AERONET 提供, 在此感谢。

## 参考文献:

- [1] 未来 10 年展望: 新挑战与机遇[A]. 见: 中国科学院. 2015 科学发展报告[R]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应方面的研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.  
Zhang X Y. Aerosol over China and their climate effect[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(1): 12-16.
- [3] 李明华, 范邵佳. 中国大气气溶胶气候效应研究进展[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200603-134>, 2006-03-08.  
Li M H, Fan S J. Advances in the study of aerosol climate change in China[EB/OL]. Beijing: Science Paper Online. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200603-134>, 2006-03-08.
- [4] Ramachandran S. Aerosol optical depth and fine mode fraction variations deduced from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over four urban areas in India[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D16): D16207, doi: 10.1029/2007JD008500.
- [5] 刘玉杰, 牛生杰, 郑友飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.  
Liu Y J, Niu S J, Zheng Y F. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE-318 sun tracking spectrophotometer data[J]. Journal of Nanjing Institute of

- Meteorology, 2004, **27**(5): 615-622.
- [ 6 ] Kaufman Y J, Tamré D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**(D14): 17051-17067.
- [ 7 ] 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, 2007, **112** ( D13 ), doi: 10.1029/2006JD007815.
- [ 8 ] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. 科学通报, 2003, **48**(19): 2094-2100.  
Li C C, Mao J T, Lau K H A, *et al.* Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(22): 2488-2495.
- [ 9 ] 邓学良, 潘德炉, 何冬燕, 等. 卫星遥感中国海域人为和沙尘气溶胶时空分布的研究[J]. 海洋学报, 2009, **31**(4): 58-68.  
Deng X L, Pan D L, He D Y, *et al.* Anthropogenic and dust aerosol components estimated by satellite data over the China's seas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, **31**(4): 58-68.
- [ 10 ] 罗宇翔, 陈娟, 郑小波, 等. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(5): 876-883.  
Luo Y X, Chen J, Zheng X B, *et al.* Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(5): 876-883.
- [ 11 ] Huang J P, Minnis P, Lin B, *et al.* Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [ J ]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(6): L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.
- [ 12 ] 闭建荣. 西北地区气溶胶特征及其直接辐射强迫的观测模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. 1-2.  
Bi J R. Observation and simulation study of aerosol features and their direct radiative forcing over northwestern China [ D ]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. 1-2.
- [ 13 ] 胡蝶, 张镭, 沙莎, 等. 西北地区 MODIS 气溶胶产品的对比应用分析[J]. 干旱气象, 2013, **31**(4): 677-683.  
Hu D, Zhang L, Sha S, *et al.* Contrast and application of MODIS aerosol products over the arid and semiarid region in northwest China [ J ]. Journal of Arid Meteorology, 2013, **31**(4): 677-683.
- [ 14 ] 李晓静, 高玲, 张兴赢, 等. 卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化[J]. 科技导报, 2015, **33**(17): 30-40.  
Li X J, Gao L, Zhang X Y, *et al.* Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data[J]. Science & Technology Review, 2015, **33**(17): 30-40.
- [ 15 ] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm; the second generation [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(16): 9296-9315.
- [ 16 ] Remer L A, Mattoo S, Levy R C, *et al.* MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective [ J ]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, **6**(1): 69-112.
- [ 17 ] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, **6**(1): 159-259.
- [ 18 ] 延昊, 矫海燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. 气象科学, 2006, **26**(1): 110-117.  
Yan H, Jiao H Y, Bi B G, *et al.* Advances in aerosol observation network and corresponding science plan[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, **26**(1): 110-117.
- [ 19 ] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 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, 2009, **20**(2): 147-156.  
Li X J, Zhang P, Zhang X Y, *et al.* Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC [ J ]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, **20**(2): 147-156.
- [ 20 ] Eck T F, Holben B N, Reid J S, *et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [ J ]. Journal of Geophysical Research, 1999, **104**(D24): 31333-31349.
- [ 21 ] Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, *et al.* MODIS Collection 6 aerosol products: comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, **119**(24): 13965-13989, doi: 10.1002/2014JD022453.
- [ 22 ] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [ J ]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [ 23 ] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization [ J ]. Remote Sensing of Environment, 1998, **66**(1): 1-16.
- [ 24 ] Xie Y, Zhang Y, Xiong X X, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements [ J ]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(33): 5970-5978.
- [ 25 ] Qi Y L, Ge J M, Huang J P. Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(20): 2497-2506.
- [ 26 ] Han X, Zhang M G, Han Z W, *et al.* Model analysis of aerosol optical depth distributions over East Asia [ J ]. Science China Earth Sciences, 2010, **53**(7): 1079-1090.
- [ 27 ] 韩永翔, 方小敏, 宋连春, 等. 塔里木盆地中的大气环流及对沙尘暴成因探讨——根据沙漠风积地貌和气象观测重建的风场[J]. 大气科学, 2005, **29**(4): 627-635.  
Han Y X, Fang X M, Song L C, *et al.* A study of atmospheric circulation and dust storm causes of formation in the Tarim Basin—the restructured wind field by shapes of dune and observed prevailing wind [ J ]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, **29**(4): 627-635.
- [ 28 ] Dong Z P, Yu X, Li X M, *et al.* Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(35): 4486-4496.
- [ 29 ] 黄观, 刘志红, 刘伟, 等. 北疆地区气溶胶光学厚度的时空特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(3): 286-292.  
Huang G, Liu Z H, Liu W, *et al.* Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth in north Xinjiang [ J ]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(3): 286-292.

- [30] 张焕平, 张占峰, 金惠瑛, 等. 柴达木盆地沙尘天气的气候特征及与气象要素的关系[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(5): 1382-1384, 1538.  
Zhang H P, Zhang Z F, Jin H Y, *et al.* Correlation between climate feature and meteorological elements of dust storm in Qaidam basin [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, **42**(5): 1382-1384, 1538.
- [31] 徐兴奎, 陈红, 张凤, 等. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 41-47.  
Xu X K, Chen H, Zhang F, *et al.* Temporal and spatial change of vegetation cover in the northwest of China and factors analysis influencing on vegetations variation[J]. Environmental Science, 2007, **28**(1): 41-47.
- [32] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(5): 1359-1370.  
Huang X Y, Li Y H, Feng J Y, *et al.* Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(5): 1359-1370.
- [33] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C, *et al.* Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(D14): D14S07, doi: 10.1029/2007JD009661.
- [34] 单楠, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 基于 MODIS 的中国陆地气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, **10**(5): 24-30.  
Shan N, Yang X H, Shi Z J, *et al.* Spatial and temporal distribution of aerosol optical depth in China based on MODIS [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, **10**(5): 24-30.
- [35] 许秀玲. 基于 MODIS 产品的中国陆地气溶胶时空特征分析[D]. 南京: 南京师范大学, 2012. 14-19.  
Xu X L. Analysis of temporal and spatial characteristics of aerosol over land in China based on MODIS product [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. 14-19.



## CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry .....	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product .....	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM <sub>1</sub> in North China During the Autumn and Winter Polluted Period .....	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Hangzhou .....	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China .....	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM <sub>2.5</sub> in Xi'an, China During Haze and Clean Days .....	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM <sub>10</sub> from Mt. Huangshan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM <sub>2.5</sub> of Quanzhou .....	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China .....	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit .....	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014 .....	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China .....	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China .....	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment .....	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay .....	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO <sub>2</sub> Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China .....	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River .....	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu .....	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources .....	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir .....	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China .....	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution .....	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO <sub>2</sub> .....	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks .....	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed .....	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water .....	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber .....	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol .....	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes .....	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell .....	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta .....	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization .....	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K <sup>+</sup> Addition in Saline Surroundings .....	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria .....	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process .....	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling .....	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge .....	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment .....	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO <sub>2</sub> -Brine-Sandstone Interaction Process .....	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems .....	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils .....	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains .....	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area .....	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination .....	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil .....	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014 .....	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area .....	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost .....	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw .....	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China .....	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO <sub>x</sub> by CH <sub>4</sub> .....	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)