

近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征

罗宇翔¹, 陈娟¹, 郑小波^{1*}, T. L. Zhao²

1. 贵州省山地气候与资源重点实验室/贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002;

2. Air Quality Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, 4905 Dufferin Street, Toronto, Ontario, M3H 5T4 Canada

摘要: 应用 2001—2010 年 MODIS 大气气溶胶光学厚度 (AOD) 资料, 分析中国 550 nm AOD 年和季节平均分布。还选取了 10 个代表性区域, 分析 AOD 变化特征。这些分析建立起了近 10 年来中国气溶胶光学厚度的气候学特征: 中国年平均 AOD 空间区域分布中心大体呈现两低两高。两低中心位于植被覆盖度高和人烟稀少的 (1) 黑龙江和内蒙古东北高纬度地区 (~0.2); (2) 川、滇与青藏高原交界的西南高海拔地区 (0.1~0.2)。一个 AOD 低值带 (0.2~0.3) 连接这两个低中心, 呈东北西南走向跨过中国大陆。在此低值带两侧, 各有一片 AOD 高值中心 (~0.8): (1) 人口密集和工业化发展带来的大量人为气溶胶形成了一个覆盖了华北、长江流域 (从四川盆地, 两湖地区到长三角) 到华南珠江三角洲相联的大片高 AOD 中心区域; (2) 以沙尘为主的自然气溶胶造就了西北塔克拉玛干沙漠及周边高 AOD 区。中国 AOD 这一两低两高区域分布特征基本保持四季不变, 但其中心强度呈现各自区域性季节变化。中国春季 AOD 高值区的面积最大, 其次是夏季, 然后是秋季, 面积最小的是冬季。南方 AOD 月变化规律多为双峰型, 即 3—5 和 8—9 月出现 2 次高峰, 5—7 月从南向北先后出现波谷, 变化规律与季风响应。北方为单峰型, 6—7 月为高峰, 11 到来年 2 月为低谷。用弱季风年 (2002) 和强季风年 (2003) 季风影响区域气象条件和气溶胶数据对比分析表明, 大陆 AOD 的月空间分布和变化与季风气候, 以及风速、风向、降水、温度和湿度等的变化有关。

关键词: 中国; 气溶胶光学厚度; 气候学特征; MODIS; 季风

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0876-08

大气中悬浮均匀分布的相当数量的固体微粒和液体微粒, 如海盐粉粒、灰尘、烟尘, 硫酸盐, 硝酸盐和有机物等多种物质, 所构成的稳定混合物, 统称为大气气溶胶, 它的直径一般在 0.001~100 μm 之间。主要集中在对流层尤其下边界层。大气气溶胶对人体健康和大气能见度有很大影响^[1], 其中小于 2.5 μm (又称 PM_{2.5}) 可吸入颗粒物被人吸入后, 会累积在呼吸系统中, 引发许多疾病^[2], 因此, 对 PM_{2.5} 的监测发布成为 2011 年中国最热烈的话题之一。大气气溶胶还是气候变化中最不确定的因素, 它的直接气候效应可以通过吸收和散射太阳辐射使到达地面的太阳辐射和日照减少^[3-5]。而间接气候效应方面, 气溶胶粒子又可以作为云的凝结核影响云的光学特性、云量以及云的寿命, 以及降水量, 产生间接影响^[6-7]。气溶胶可以改变大气化学过程, 进而影响温室气体浓度和分布。因此, 气溶胶作为影响全球气候变化的一个重要因子引起科学界的普遍重视^[8-10]。

为了观测大气气溶胶的变化情况, NASA 在全球建立了地面太阳光度计观测网即 AERONET, 对气溶胶的变化特征进行长期观测; 中国也建立了地

基气溶胶观测网 CARSNET^[11]。虽然地基大气气溶胶观测精度较高, 但是站点的分布稀疏, 如 CARSNET 目前在全中国大陆地区仅有约 40 个观测站点, 不能获取到全国的空间分布特征。卫星遥感是目前唯一可以提供区域和全球尺度气溶胶特性的探测手段。气溶胶光学厚度作为大气气溶胶最重要的参数之一, 表征大气混浊度或大气中气溶胶总含量的重要物理量。自 2000 年以来, 搭载在美国 EOS 系列卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 开展 MODIS 大气气溶胶光学厚度 (AOD) 反演业务, 为大范围进行遥感大气气溶胶监测提供了可能。对 MODIS 气溶胶产品的适用性验证, 国内外已经做了大量的工作^[12-14]。通过与 AERONET 观测值的比较, 认为 MODIS_AOD 仪器的系统误差为 ± 0.05 和反演算法带来的估计误差约为 15%, 达到设计目标。一些学者们对中国地区 MODIS 的 C005 版本 AOD 与 AERONET 监测的 AOD 资料比较研究后认为, 该版本 MODIS 陆地气溶胶光学厚度产品的反演精度在中国大部分站点比 C004 版产品有了较大提高, 能够反演中国地区满足暗目标算法条件下气溶胶光学厚度时空分布和变化^[15-22]。目前,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40965009); 黔科合人才团队 [2010]4012; 贵州省科学技术厅 S (2007) 1016; 黔科合重大专项 [2011]6003

作者简介: 罗宇翔 (1979 年生), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事气象、3S 技术应用。E-mail: lyx791009@hotmail.com

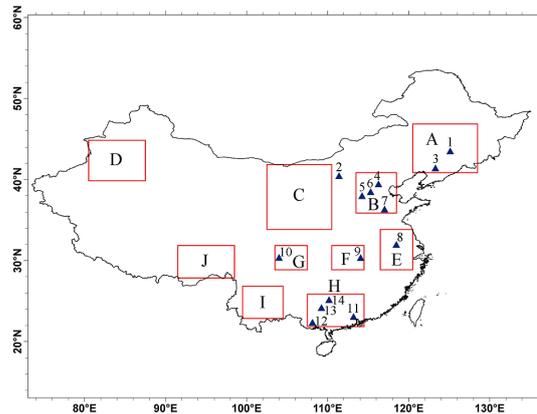
*通信作者: E-mail: zxb-816@126.com

收稿日期: 2012-03-08

除了 2010 年 Li 等用 2003—2006 年 4 年数据进行中国大陆 AOD 时空变化, 郑小波等进行中国各省市近 10 年 AOD 时空变化研究外^[23-24], 多见对较小区域(长三角, 珠三角等)研究^[25-26], 鲜见对中国全区域 10 年来多年和季节遥感气溶胶分布的研究。由于气溶胶的物理性质, 影响气溶胶时空分布的因素很多。首先是来源(人为产生和自然的), 其次大气环流和降水影响到气溶胶的传输和干湿沉降规律。2003、2008 年 Streets 等和 2009 年 Li 等在分析中国大气气溶胶时空分布和变化时主要考虑排放清单^[27-28]。有若干研究全球及区域 AOD 的变化及成因时考虑了气候因素^[29-31]。2010 年 Zhang 等用 Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS 资料对全球海上大气气溶胶光学厚度进行了反演, 分析了近 10 年来 AOD 的季节和年际间变化趋势^[32]。本文应用 MODIS 气溶胶 C005 数据集最新的改进版 C5.1 产品近 10 年的数据^[33], 统计分析中国地区遥感大气气溶胶光学厚度的详细分布状况, 以及季节变化特征。选取 10 个代表性区域, 分析研究各区域的月变化特征, 还研究了季风变化对中国气溶胶空间分布的影响, 为了解中国大气气溶胶光学厚度的时空变化规律提供参考。

1 材料及方法

本文采用的是 NASA 发布的 MODIS Level 3, 版本为 C5.1, 波段为 550 nm 的气溶胶数据集。分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间从 2001 年 1 月到 2010 年 12 月共 120 个月, 来自 EOS-Terra 的月平均数据。文中分析中国年平均 AOD 值空间分布是通过月平均值累加平均得到年或季节值, 然后再计算出多年平均值。分析季节变化时, 采用的划分标准是 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至来年的 2 月为冬季。为了分析中国不同区域 AOD 的空间变化特征。根据中国气溶胶分布特征, 本文还选取了 10 个代表性 AOD 分布地区(图 1), 它们是 A 东北, B 华北(含京、津、唐地区), C 西北, D 新疆, E 华东, F 华中, G 川渝地区(含四川盆地), H 华南, I 西南地区 and J 青藏高原。为了分析亚洲夏季季风气候对中国 AOD 的影响, 将受热带及副热带季风影响较大的中国中、东部部分气象台站 2001—2010 年同期观测资料及对应点的 AOD 值进行分析。这些台站是(参见图 1), A 区中的 1 长春和 3 沈阳, 2 呼和浩特; B 区中的 4 北京, 5 石家庄, 6 保定和 7 济南; E 区中的 8 南京; F 区 9 中的武汉; G 区中的 10 成都; H 区中的 11 广州, 12 南宁, 13 柳州和 14 桂林。在中国大陆中、东部, 以长江到淮河地区为界分为气候差异明显的南、北两部分。比较这两个区域在弱南亚热带季风年(2002 年)和



红色框为 10 个区域(A-J), 黑色三角形和数字(1-14)为气象台站位置

图 1 中国大陆研究的区域和站点

Fig.1 Distribution of the 10 regions over China used in this study

强季风年(2003 年) AOD 的空间分布特征。南亚季风指数(IMI)资料来自美国夏威夷大学国际太平洋研究中心(<http://iprc.soest.hawaii.edu/~ykaji/monsoon/index.html>)。

2 结果

2.1 中国气溶胶光学厚度的 10 年平均分布

图 2 表示了 2010 年 1 月至 2010 年 12 月, 中国 AOD 的 10 年平均分布(其中白色区域为 AOD 缺测区域)。根据中国区域多年平均 AOD 的空间分布进行分析得出:(1)东北地区。东三省和内蒙古东北部的年平均 AOD 较低为 0.1~0.3 之间, 其中与俄罗斯交界的大小兴安岭地区最低, 为 0.1~0.2 之间, 为中国 AOD 的低值中心之一;(2)华北地区。华北平原为 AOD 高值中心之一, 在济南至郑州地区出现 2 个 AOD 年平均 0.7 左右的高值区。这一区域为中国小麦的主产区, 不但人口稠密, 农民还有焚烧秸秆的习惯^[34-35]。因此, 在春末夏初人为为排放气溶胶量非常高。河北中南部、天津和北京附近为

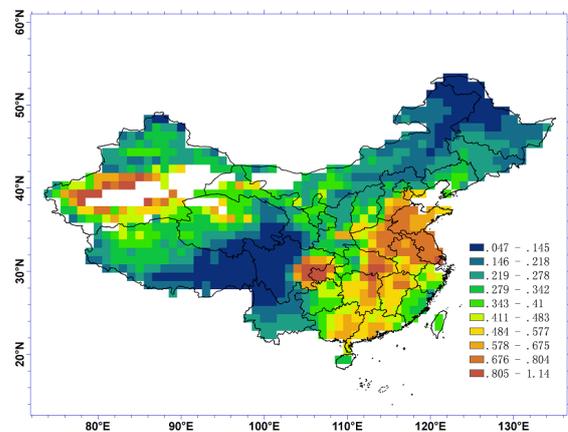


图 2 中国区域 2001—2010 年平均遥感气溶胶光学厚度(550 nm)分布

Fig.2 Annual mean AOD (550 nm) over China for 2001—2010

华北地区的另一个高值区,年平均 AOD 在 0.5~0.7 之间,表明城市化和人口密集对这些地区气溶胶增加起到了决定作用。(3) 华东地区。在长三角的沪宁地区形成一个较大的高值区,多年平均 AOD 在 0.7~0.9 左右,与人口密集和工业发达有关。(4) 华中地区。在长江流域中游,形成从武汉到长沙的一个 AOD 高值带。其中以武汉及周边地区为高值中心,年平均 AOD 为 0.8~0.9 左右,长沙地区的年平均 AOD 在 0.7~0.8 之间。(5) 华东地区。东部沿海的浙江和福建地区年平均 AOD 与长江中下游地区相比较低,在 0.3~0.4 左右。这可能与沿海地区风速大,大气扩散条件较好有关。如距海岸线较远,武夷山脉以西的江西,除了罗霄山脉地区为 0.3~0.4 左右外,大部分地区为 0.5~0.7 左右;(6) 华南地区:同样沿海的珠三角地区多年平均 AOD 却达到 0.7 左右,表明这一区域的气溶胶污染较为严重,这与地面的观测结果相一致^[36](2009 年,谭浩波等)。另外,除了桂西北山区外,广西低海拔地区的年平均 AOD 也较高,为 0.6~0.7 左右。但与广西沿海隔海相望的海南岛,年平均 AOD 较低在 0.2~0.3 左右。这与海岛生态环境良好,人口密度较低,风扩散条件好有关。(7) 西南地区。四川盆地是中国年平均 AOD 的最高值中心,年平均 AOD 在 0.9 左右。但是,在同纬度的四川西部与青藏高原相邻地区却为中国年平均 AOD 的最低值区,在 0.1~0.2 左右,比四川盆地低 5~10 倍。究其原因,与这一区域海拔较高,人口密度低,加之受沙尘天气影响的日数少^[37](2002 年,颜宏等)有关。因此,成为中国大气气溶胶最少的区域。西南地区的云贵

高原植被覆盖度高,人口密度相对中东部较低,年平均 AOD 在 0.2~0.4 之间,在云贵高原的西北部滇、川和藏交界的高海拔地带为中国年平均 AOD 最低的区域。(8) 西北地区:由于受沙尘天气影响,在新疆塔克拉玛干沙漠出现一高值区,年平均 AOD 在 0.8 到 >1.0 之间。青藏高原除东南部外大部地区为 0.2~0.4 之间,在如此高海拔和人烟稀少地区,人为气溶胶的排放应该较低,年平均 AOD 值偏高与沙尘天气有密切关^[38]。例如,同在青藏高原的林芝地区,由于在沙尘发生较多的春季主要受西南风控制,沙尘天气很少^[39],且森林覆盖较好,因此与川西和滇西北一样,年平均 AOD 非常低在 0.1~0.2 之间。

图 2 的多年平均气溶胶光学厚度分布反映了中国大气气溶胶平均气候特征。中国气溶胶光学厚度区域分布中心大体呈现两低两高。两低中心位于植被覆盖度高和人烟稀少的(1)东北内蒙北部地区,(2)云贵高原的西北部滇、川和藏交界及青藏高原东南部一带。一个 AOD 较低值带(0.2~0.3)连接这两个低值中心,以东北西南走向跨过中国大陆。在此低值带两侧,各有一片大气气溶胶排放源不同的 AOD 高值中心:(1)人口密集和工业发达带来的大量人为气溶胶形成了一个覆盖了华北,长江流域(从四川盆地,两湖到长三角)到华南相联的 AOD 高中心区域;(2)以沙尘为主的自然气溶胶造就了西北新疆塔里木盆地和柴达木盆地高 AOD 区。图 3 显示了 2000—2010 年中国春夏秋冬 4 季的多年平均 AOD 分布。对照图 2 和图 3,中国气溶胶光学厚度两低两高区域分布特征 1 年 4 季基本保

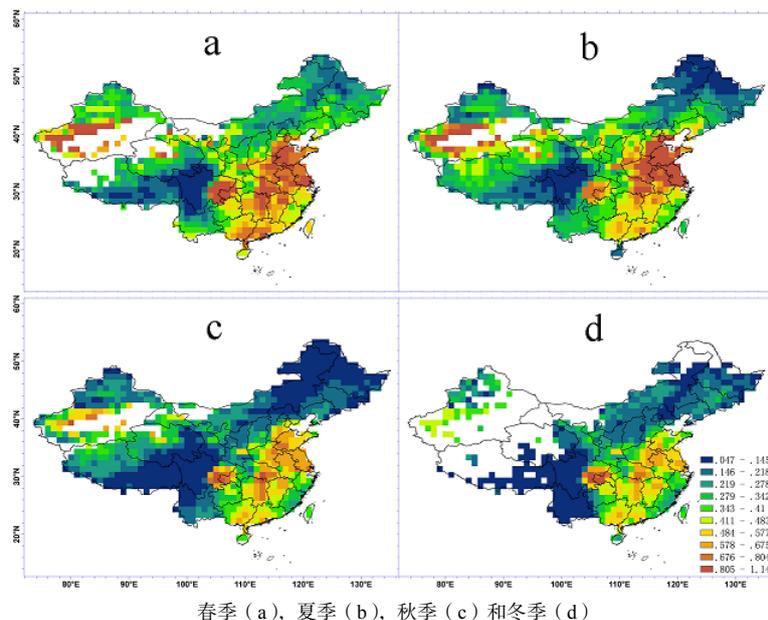


图 3 中国区域 2001—2010 年季节平均遥感气溶胶光学厚度分布

Fig.3 Seasonal mean AOD (550 nm) over China for 2001—2010

持不变,但其中心强度呈现各自区域的季节变化。

如图 3a 所示,春季中国中东部(除浙江和福建部分地区)南部以及四川盆地的 AOD 值非常高,在 0.6~1.2 之间,其中在长三角地区、长江中游(武汉—长沙—线)和四川盆地最高均达到 1.0 以上;珠三角、安徽东部、江苏、河南和河北南部较高,在 0.7~0.9 之间;另外,在新疆也存在一个 0.9~1.0 左右面积较大的高值区,黄河河套地区 AOD 也较高为 0.4~0.5 左右,与这段时间大风沙尘天气最多有关。春季 AOD 的最低值区仍然出现在川、滇与青藏高原交界地区,西藏与尼泊尔交界地区,以及东北黑龙江等地。

图 3b 表明,夏季 AOD 在四川盆地,长江中游和珠三角地区比春季有所改善。这可能与季风气候有关。但江苏、山东(胶东半岛除外)、河南、河北、天津及唐山地区等地的 AOD 比春季有明显增加,成为中国最大值出现区域。可能与夏季华北高温天气极大地提高了二次有机气溶胶的化学转化有关。

图 3c 表明,秋季华北地区的 AOD 明显下降,可能与 8 月以后该地区降水增加,大气气溶胶湿沉降加大有关。同时,由于四川盆地汛期逐渐结束,AOD 值开始上升。

图 3d 表明,冬季中国 AOD 的最高值出现在四川盆地,长江中游和长三角地区;江西东部、广西部分和珠江三角洲地区为次高值区。最低值出现在四川、云南和青藏高原部分地区,新疆部分地区也出现低值区,可能与冬季沙尘天气最少有关。另外,东北和内蒙的冬季 AOD 值也较低。

根据图 3 还可知,如果将季节平均 AOD > 0.5 定义为高值,按面积划分,中国大陆春季 AOD 高值区的面积最大,其次是夏季,然后是秋季,面积最小的是冬季。若按季节 AOD 高低值划分,夏季的 AOD 最高,其次是春季,然后是秋季,最后是冬季。也就是说,冬季不论是 AOD 高值区域面积,还是 AOD 值都是全年中最低的。

2.2 区域 AOD 月平均变化特征

将 10 个区域 2001—2010 年以来的月平均 AOD (550 nm, 下同) 进行统计分析,发现在长江以南地区及青藏高原的 AOD 月变化均为双峰型(图 4a),而长江以北地区 AOD 的月变化全部为单峰型(图 4b)。从两图可知,在这 10 个区域中,月平均 AOD 最大值多出现在 4—7 月。中国北部最大值出现在华北地区的 6 月(图 4b),AOD 为 1.03;南部最大值出现在华东地区,同样在 6 月,为 1.01(图 4a)。在这两个人口稠密区域,除人类活动排出的一次气溶胶外,夏季高温最大限度地推进了二次有

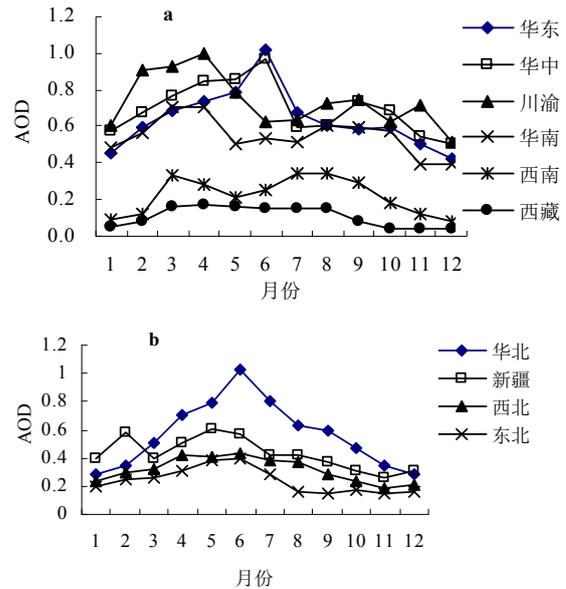


图 4 中国各区域 AOD 月平均变化 (a) 南方, (b) 北方
Fig. 4 Monthly AOD time series averaged over 2001—2010 in (a) 6 regions in southern China and (b) 4 regions in Northern China

机气溶胶的化学转化,加之每年的 6 月华北平原、华中和华东等地区处于小麦收获后的秸秆焚烧高峰期,大量人为气溶胶排入大气是导致这段时间 AOD 值为最高的主要原因。

低纬度的华南地区在 3—4 月出现 AOD 最大值 (0.71)。之后,随着华南地区前汛期到来 AOD 开始下降,8 月当副热带高压北进,月平均 AOD 又回升到 0.61。从 4 月份开始,中国南方的月平均 AOD 出现这一有规律的随东亚季风雨带由南向北递进的明显下降现象。如华南从 4 月以后,川渝地区从 5 月以后,长江流域(华东、华中)从 6 月以后,月平均 AOD 均出现了显著下降趋势,并在接下来的一二个月里到达该地区 1 年中 AOD 的低值时段之一。在月平均 AOD 较低的西南地区(图 4a),也可发现这种明显的变化规律。在 8—9 月份南方地区随着降雨带北进和高温、高湿度天气出现,月平均 AOD 普遍开始增加,出现了 1 年中的第 2 个 AOD 高峰。在青藏高原东侧地区,虽然 AOD 非常低,但由于受孟加拉湾来的暖湿气流影响,5—6 月 AOD 仍然出现下降。所以,亚洲季风季节变化影响了中国季风地域大气气溶胶的季节变化特征。北方、西北和新疆地区(图 4b),由于受季风的影响较弱,或本身处在干旱、半干旱的非季风区,AOD 的月变化规律均呈现出单峰型。在每年的春夏季 3—7 月达到最大值,秋冬季 11 月到来年的 2 月达到最小值。春季是每年中国北方沙尘天气最频繁的时段,AOD 开始明显上升;夏季由于二次有机气溶胶的化学转化和大量人为气溶胶排入大气使 AOD 达到最

大。这些北方气溶胶春夏季节变化特征同样体现在其 AOD 的春夏季单峰型分布上 (图 4b)。

2.3 季风对 AOD 变化的影响

除了排放源、地型和海拔等条件对气溶胶的空间分布影响外,气候条件对气溶胶的分布也具有较大影响。如大气运动决定气溶胶的扩散和传输;由于大气气溶胶的物理和化学特性,温度条件影响气溶胶前体转化为二次气溶胶的速率;大气边界湿度和降水影响气溶胶的干湿沉降。

2.3.1 季风强度的影响

以南亚夏季风弱季风年(2002年,IMI = -2.726)和强季风年(2003年,IMI = 1.7)为例,将中国 104°E 以东(即受季风影响较大地区)14个气象台站(参见图 1)所对应区域这 2 年 7 月的 AOD 分别与 10 年平均 7 月 AOD 求距平,结果见表 1。从表 1 可知,在弱季风的 2002 年 7 月份,与常年相比,在长江—淮河流域以南地区(以下简称南方),各站点(即 8—14 号站)的 AOD 为正距平,这一区域站点的 AOD 比常年偏高约 0.08~0.42;在长江—淮河流域以北(以下简称北方)的各站点(即 1—7 号站),除 3 号沈阳外(该地 2002 年风速大于 2003 年),AOD 均为负距平,AOD 比常年偏低约 0.01~0.27,形成了“南高北低”型分布。在强南亚夏季风的 2003 年,上述各站点 AOD 距平正好与 2002 弱夏季风年反位向,即北方站点全部为正距平,南方站点全部为负距平,即“北高南低”型。由于排放清单不可能在相邻的 2 年间发生急剧改变。因此 2002 年及 2003 年 7 月份中国大陆 AOD 空间分布的较大差异,主要反映了亚洲夏季风年际变化对中国气溶胶空间分布的影响。

表 1 南、北方 2001—2010 年 7 月份平均 AOD 及 2002、2003 年距平

Table 1 Averaged AOD in July over 2001—2010 and AOD-anomalies for 2002 and 2003 in northern and southern China

编号	站点	10 年平均	2002 年距平	2003 年距平
1	长春	0.3934	-0.0374	0.4686
2	呼和浩特	0.4051	-0.0091	0.1829
3	沈阳	0.5058	0.1532	0.2502
4	北京	1.0644	-0.1604	0.0386
5	石家庄	0.8556	-0.0746	0.0734
6	保定	0.9504	-0.0324	0.1046
7	济南	0.8129	-0.2659	0.3871
8	南京	0.8051	0.1759	-0.0211
9	武汉	0.8322	0.3058	-0.1742
10	成都	0.9633	0.0827	-0.2573
11	广州	0.8036	0.3734	-0.3106
12	南宁	0.4786	0.4194	-0.2526
13	柳州	0.5400	0.3150	-0.2270
14	桂林	0.4770	0.3310	-0.2120

2.3.2 风速和风向

2002、2003 年 14 个站点地面风速和 850 hPa 风向见表 2。从表 2 知:(1)2002 弱季风年,南方站点除 8 南京外,所有站点的风速均比 2003 年小,不利于这些区域的高浓度气溶胶稀释和扩散;同时,长江以南地区盛行东南风,使东南部的高气溶胶浓度吹向华中,使武汉、成都、南宁和桂林等地 AOD 增加(参见图 3b);北方站点的 7 站中除长春、北京外,呼和浩特风速持平,另有 4 站风速大于 2003 年,并且风速较小的长春、北京和呼和浩特,及风速较大的济南等地的主导风向都是从大气环境较干净的西部向东吹(参见图 3b)。因此,2002 年形成了 AOD“南高北低”的分布形式;(2)2003 强季风年,南方风速较大,并且风向多为西南风,即主导风是由气溶胶低浓度的中国西南地区吹向高浓度的华中和华东等地区,使这些区域 AOD 下降;同时,南方的高浓度气溶胶顺着主导西南风和南风向北方输送(参见图 3b),使北方区域的 AOD 大增。即形成了 AOD 空间分布的“北高南低”形式。

表 2 南北方 2002 和 2003 年 7 月平均风速和 850 hPa 风向比较
Table 2 Comparisons of surface wind speed and wind direction at 850hPa in July between year 2002 and 2003

编号	站点	2002 年		2003 年	
		风速	风向	风速	风向
1	长春	2.8	W	3.2	SW
2	呼和浩特	1.0	NW	1.0	SW
3	沈阳	2.6	W	2.4	SW
4	北京	2.1	NW	2.5	SW
5	石家庄	1.4	SE	1.0	S
6	保定	1.6	SE	1.3	S
7	济南	3.3	NW	3.2	SW
8	南京	1.9	S	1.6	SW
9	武汉	1.3	SE	1.5	SW
10	成都	1.5	SE	1.7	S
11	广州	1.5	SW	2.1	SE
12	南宁	1.3	SE	1.8	SW
13	柳州	1.4	SE	3.0	S
14	桂林	0.9	SE	2.2	S

2.3.3 降水和温湿度

在中国大陆夏季风盛行期和主要影响区域,降水、温度和湿度对 AOD 月分布的影响见图 5。根据图 5a-5b 可以看出,在南方以 E 区中的南京(图 5a),F 区中的武汉(图 5b)和 H 区中的广州为例(图 5c),当进入春季后,由于人类活动的增加,月平均 AOD 逐渐增加。当季风和雨季来临,长江流域南京和武汉的月降水达到 200~250 mm 时,月平均 AOD 出现明显下降。在年降水量较多珠三角地区的广州,当月降水超过 200 mm 后,月平均 AOD 开

始明显下降。北方以 B 区中的北京为例 (图 5c), 入春后人类活动增加, 以及西北地区沙尘气溶胶随大气环流向东输送共同作用下, 使月 AOD 从 0.5 明显增加到 1.1 左右。夏天当雨季来临, 月降水量超过 100 mm 后, 月 AOD 出现明显下降。8—9 月以后, 南方地区的降水逐步减少, 由于这些地区的夏秋季高温酷热天气 (8 月份的月平均温度 28~29 °C, 9 月平均温度 24~28 °C), 加上这些区域长时间地保持相对湿度在 70%~80% 的高湿度条件 (图 6), 使大气中二次气溶胶转化增加, 因此月 AOD 又出现增加现象。这也是中国南方地区的 1

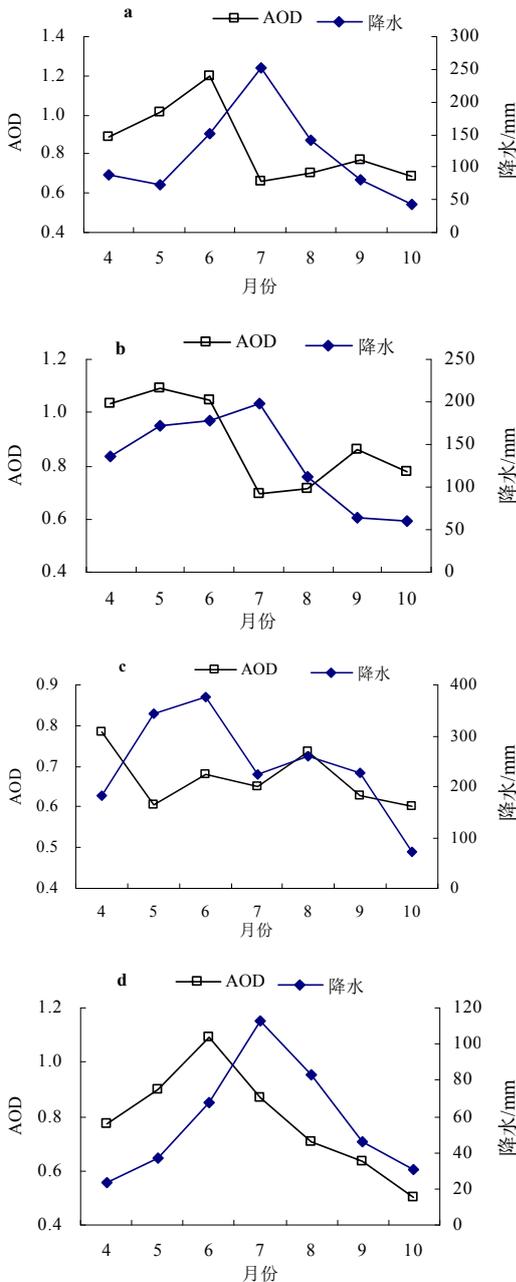


图 5 主汛期 (4—10 月) 各地月 AOD 变化与降水关系 (a) 南京, (b) 武汉, (c) 广州和 (d) 北京

Fig.5 Monthly Changes of AOD and precipitation from April to October at a) Guangzhou, b) Wuhan, c) Nanjing and d) Beijing

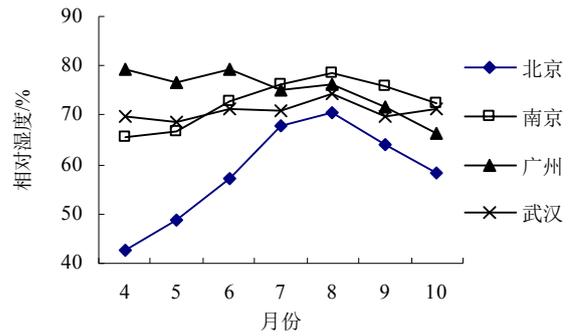


图 6 主汛期各地相对湿度 (%)

Fig.6 Monthly mean relative humidity in the flood season (%)

年中月 AOD 分布形态为双峰值的气候学原因。而华北地区入秋后大气温度下降较为迅速, 同时相对湿度小于 60%, 二次气溶胶的转化远不如淮海—长江以南地区。所以 8—9 月降水减少后, AOD 也呈现减少的分布状态。这也是中国大陆北部地区的月 AOD 分布呈现单峰值的部分原因。

3 结论和讨论

应用 2001 到 2010 年 MODIS-Terra 数据分析了中国大陆上大气气溶胶光学厚度的时空分布特征, 以及 10 个主要区域的变化特征。结果表明:

(1) 中国多年平均 AOD 高值区在四川盆地、长江中下游、华北平原和珠江三角洲地区, 以及新疆的塔克拉玛干沙漠, 在 0.8~1.0 左右。低值区在川西、滇西北与青藏高原交界的高海拔地区在 0.1~0.2 之间, 以及黑龙江和内蒙古的高纬度地区 0.2 左右。

(2) 春夏秋冬 4 个季节 AOD 的空间分布基本相似。春、夏的高值中心主要在四川盆地、华北、华中和华南地区; 秋、冬季的高值中心主要在四川盆地和长江中游地区。中国大陆春季 AOD 高值区的面积最大, 其次是夏季, 然后是秋季, 面积最小的是冬季。

(3) 大气气溶胶的季节和月变化除了与排放源有关外, 与东亚夏季风气候相关, 在强季风年夏季, 中国月 AOD 的空间分布呈现“北高南低”形态, 即南方 AOD 较常值年低, 北方的较常年值偏高。在弱季风年 AOD 的分布正好反位相, 即分布形态为“南高北低”型。影响 AOD 空间分布的主要因素是风速和风向。

(4) 中国南方地区一年中 AOD 月变化规律为双峰型。即在 3—5 月出现高峰, 5—7 月从南向北先后出现波谷, 8—9 月出现次高峰。北方的 AOD 月变化规律为单峰型, 在每年的 6—7 月达到高峰, 11 月到来年 2 月为低谷。影响中国中、东部 AOD 月变化的主要气候因子是降水、温度和湿度。

近 10 年 MODIS 遥感分析给出了中国气溶胶光学厚度的气候学特征, 可以为研究中国区域气溶胶提供有力的依据, 同时也有助于深入研究气溶胶的辐射强迫及其气候效应。由于 MODIS 遥感陆地上空大气气溶胶光学厚度的算法和传感器的校正问题, 计算出来的高纬度地区冬季 AOD 精度较低, 作为趋势分析尚可, 但用于同一时期大气气溶胶空间分布比较还存在某些不确定性。今后还需要应用融合 MODIS 气溶胶亮目标反演算法的 Deep Blue (DB) 数据集, 对中国遥感大气气溶胶的研究分析做进一步改进。

致谢: 本文利用了 NASA 的 MODIS 数据, 以及国家气象信息中心资料, 在此特表示感谢。

参考文献:

- CHE H, ZHANG X, LI Y, et al. Horizontal visibility trends in China 1981—2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 10: 2470.
- 肖钟湧, 江洪, 陈健等. 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.
- XIAO Zhongyong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al. The retrieval of aerosol optical thickness with high spatial resolution using MODIS data over Guangzhou[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(5): 577-584.
- WILD M, GILGEN H, ROESCH A, et al. From Dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface[J]. *Science*, 2005, 308: 847-850.
- KAISER D P, QIAN Y. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954—1998: Indication of increased haze pollution?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 9: 2042.
- ZHANG X, KANG W, ZHAO T, et al. Long-term trends in sunshine duration over Yunnan-Guizhou Plateau in Southwest China for 1961—2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(15): 1-4.
- ROSENFELD D, DAI J, YU X, et al. Inverse Relations Between Amounts of Air Pollution and Orographic Precipitation[J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1396-1399.
- LI ZHANQING, NIU FENG, FAN JIWEN, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 10(1038): 1-14.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.
- SHI Guangyu, WANG Biao, ZHANG Hua, et al. The Radiative and Climatic Effects of Atmospheric Aerosols[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840.
- 丁一汇, 孙颖. 国际气候变化研究新进展[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(4): 161-167.
- DING Yihui, SUN Ying. Recent Advances in Climate Change Science[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 161-167.
- 赵小锋, 叶红. 热岛效应季节动态随城市化进程演变的遥感监测[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1817-1842.
- ZHAO Xiaofeng, YE Hong. Monitoring the changes of urban heat island seasonal dynamics in the process of urbanization by remote sensing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1817-1842.
- XIE YONG, ZHANG YAN, XIONG XIAO XIONG, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 5970-5978.
- REMER L A, KAUFMAN Y J, TANRÉ D. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62: 947-973.
- ICHOKU C, REMER L A, ECK T F. Quantitative evaluation and intercomparison of morning and afternoon Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol measurements from Terra and Aqua[J]. *Geophys*, 2005, 10(3): 454-459.
- LEVY R C, LEPTOUKH G G, KAZHN R, et al. A Critical Look at Deriving Monthly Aerosol Optical Depth From Satellite Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2942-2956.
- 李本纲, 冉阳, 陶澍. 北京市气溶胶的时间变化与空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(7): 1425-1429.
- LI Bengang, RAN Yang, TAO Peng. Seasonal variation and spatial distribution of atmospheric aerosols in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7): 1425-1429.
- HE QIANSHAN, LI CHENGCAI, TANG XU, et al. Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1649-1661.
- 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.
- LI BENGANG, YUAN HUI Shi, FENG NAN, et al. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1801-1817.
- XIE YONG, ZHANG YAN, XIONG XIAO XIONG, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 5970-5978.
- 周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 863-872.
- ZHOU Cunyan, LIU Qinhuo, TANG Yong, et al. Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 863-872.
- 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 Xiaojin, ZHANG Peng, ZHANG Xinyin, 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.
- 王宏斌, 张镭, 刘瑞金, 等. 中国地区两种 MODIS 气溶胶产品的比较分析[J]. *高原气象*, 2011, (3): 772-783.
- WANG Hongbing, ZHANG Lei, LIU Ruijin, et al. Comparison and Assessment of the MODIS C005 and C004 Aerosol Products Over the China[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, (3): 772-783.
- Li Bengang, Yuan Huishi, Feng Nan, et al. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1801-1817.
- 郑小波, 周成霞, 罗宇翔, 等. 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.
- ZHENG Xiaobo, ZHOU Chengxia, LUO Yuxiang, et al. Chinese province-level variations and trends in aerosol optical depth from recent 10 years of remote sensing data[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 595-599.
- 段婧, 毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4): 537-543.
- DUAN Jing, MAO Jietai. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over Yangtze River delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4): 537-543.
- 黄文声, 李真, 李权镐, 等. 香港及珠三角地区 MODIS 高分辨率气溶胶光学厚度的反演[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 1372-1380.
- WANG Wensheng, LI Zheng, LI Quanguo, et al. Retrieval of aerosol optical thickness over Hong Kong and Pearl River Delta region using MODIS satellite data[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(7):

- 1372-1380.
- [27] STREETS D G. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *Geophys*, 2003, 21: 309-313.
- [28] LI BENGANG, YUAN HUISHI, NAN FENG, et al. Comparing MODIS and AERONET aerosol optical depth over China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(24): 6519-6529.
- [29] BAO Z, WEN Z, WU R. Variability of aerosol optical depth over east Asia and its possible impacts[J]. *Geophys*, 2009, 114: 603-609.
- [30] LIU X, YAN L, YANG P, et al. Influence of Indian Summer Monsoon on Aerosol loading in East Asia[J]. *Journal of Applied Meteor. and Clim*, 2011, 1075: 414-419.
- [31] YU H, CHIN M, REMER L A, et al. Variability of marine aerosol fine mode fraction and estimates of anthropogenic aerosol component over cloud-free oceans from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. *Geophys*, 2009, 1029: 648-653.
- [32] ZHANG J, REID J S. A decadal regional and global trend analysis of the aerosol optical depth using a data-assimilation grade over-water MODIS and Level 2 MISR aerosol products[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, 10: 10949-10963.
- [33] SHI Y, ZHANG J, REID J S, et al. Where do we need additional in situ aerosol and sun photometer data?: a critical examination of spatial biases between MODIS and MISR aerosol products[J]. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2011, 4: 4295-4323.
- [34] 厉青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(1): 32-37.
LI Qing, ZHANG Lijuan, WU Chuanqing, et al. Satellite-Remote-Sensing-Based Monitoring of Straw Burning and Analysis of Its Impact on Air Quality[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 32-37.
- [35] 陶金花, 王子峰, 韩冬, 等. 华北地区秸秆焚烧前后的 NO₂ 卫星遥感监测分析[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(10): 1016-1020.
TAO Jinhua, WANG Zifeng, HAN Dong, et al. Analysis of crop residue burning and tropospheric NO₂ vertical column density retrieved from satellite remote sensing in North China[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10): 1016-1020.
- [36] 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1146-1155.
TAN Haobo, WU Dui, DENG Xuejiao, et al. Observation of aerosol optical depth over the Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 1146-1155.
- [37] 颜宏, 沈国权, 宋连春, 等. 中华人民共和国气候图集 a[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 235-236.
YAN Hong, SHEN Guoquan, SONG Lianchun, et al. *Climatological Atlas of the People's Republic of China a*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 235-236.
- [38] HAN Y, FANG X, ZHAO T, et al. Suppression of precipitation by dust particles originated in the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 10: 180-185.
- [39] 颜宏, 沈国权, 宋连春, 等. 中华人民共和国气候图集 b[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 90-100.
YAN Hong, SHEN Guoquan, SONG Lianchun, et al. *Climatological Atlas of the People's Republic of China b*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 90-100.

Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data

LUO Yuxiang¹, CHEN Juan¹, ZHENG Xiaobo^{1*}, T. L. Zhao²

1. Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resource/Guizhou Institute of Mountainous Climate and Environment, Guiyang 550005, China;

2. Air Quality Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, 4905 Dufferin Street, Toronto, Ontario, M3H 5T4 Canada

Abstract: Using the recent 10 year (2001—2010) MODIS data of aerosol optical depth (AOD), the distributions of 10-year annual and seasonal mean AOD at 550 nm over China are presented, and the seasonal variations in AOD over 10 regions in China are analyzed. A 10-year climatology of AOD over China is constructed. The spatial pattern of annual mean AOD is characterized generally with two low value centers and two high value centers over China. Two low AOD centers are located in the areas with a high vegetation cover and a sparse population in (1) the high-latitude Heilongjiang and Inner Mongolia in Northeast China with the AOD of about 0.2 and (2) the high-altitude Sichuan, Yunnan and Xizang in Southwest China with the AOD from 0.1 to 0.2. These two low AOD centers are connected by a low AOD ozone (0.2-0.3) in a northeast-southwest direction across China. Beside this low AOD ozone, two high centers with the AOD of about 0.8 are situated in (1) the most densely populated and industrialized regions in China with high anthropogenic aerosols stretching from North China Plain, Sichuan Basin, Hubei-Hunan and Yangtze River Delta to South China with Pearl River Delta region and (2) Taklimakan desert and the surrounding area in Northwest China with high natural aerosols dominated by desert dust. The spatial structures of seasonal AOD pattern over China remain unchanged, but the strengths of AOD-centers vary seasonally. Seasonally averaged over China, the area of high AOD is biggest in spring followed by summer and autumn with the minimum in winter. The monthly AOD values in Southern China peak twice respectively from March to May and from August to September and drop between May and July accompanied by Asian summer monsoon rain belt movement from the south to north. The monthly AOD in Northern China change with a single peak in June and July and a low during November and February. Taking example of the AOD anomalies and meteorological data in July 2002 and 2003 for a weak and strong year of south Asian summer monsoon, compared to the 10-year mean, the monthly AOD spatial distribution and change pattern relates to monsoon, wind speed and direction, precipitation, temperature and humidity in mainland of China.

Key words: China; AOD; climatology; MODIS; monsoon