

中国气溶胶分布的地理学和气候学特征

郑小波¹, 罗宇翔¹, 赵天良², 陈 娟¹, 康为民¹

(1. 贵州省山地环境气候研究所 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. Air Quality Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, Ontario, M3H 5T4, Canada)

摘要: 中国人口地理分界线——胡焕庸线根据人口、地理、气候和经济等特点把中国(不包括港、澳、台地区)分为东、西两部分。用2000~2010年MODIS大气气溶胶光学厚度(AOD)资料,分析气溶胶分布的地理学和气候学特征后发现,胡焕庸线还可被视为中国气溶胶地理学的分界线,在其两侧气溶胶的性质和浓度都有明显差别。在人口稠密和海拔较低的东部,由人类活动产生的气溶胶为主,年平均AOD约为0.45;在西部,自然过程释放的气溶胶主导的AOD约为0.25。近10 a来东部AOD的年际间变化呈现增加趋势,西部AOD出现微弱减少的趋势。东部人为气溶胶年际间变化受亚洲季风影响。西部自然气溶胶年际间变化主要受沙漠地区沙尘气溶胶排放源的影响,沙尘天气过程主要控制其气溶胶的释放。

关键词: 大气气溶胶光学厚度; MODIS; 胡焕庸线; 地理; 气候

中图分类号: P407 **文章标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)03-0265-08

气溶胶是大气中悬浮的液态或固态微粒的总称,是大气中的重要组成部分。它能吸收和散射太阳辐射,从而影响到地球辐射平衡^[1,2];同时作为云凝结核,它影响云的光学特性、云量和云的寿命,以及降水量^[3,4]。由于上述气溶胶的直接和间接气候效应,使其成为气候变化中最不确定的因素^[5,1]。气溶胶还参与多种大气化学过程,在工业发达和人口稠密地区,近些年来灰霾、轻雾(霪)、烟雾等天气现象增多,以及能见度普遍下降和辐射的减少都是与人为造成的大气气溶胶浓度增加有关^[6,7]。另外,大气气溶胶对人体健康有很大影响,其中的可吸入颗粒物被人体吸入后,引发呼吸道和心血管等许多疾病^[8]。因此,气溶胶是研究全球气候和大气环境的一个关键的因子,而这些研究都依赖于对气溶胶时空分布状况的了解,由于全球范围大气气溶胶的直接观测资料很少,无法得到其时空分布的详细特征。气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)能反映气溶胶的信息,其定义为气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分,描述了气溶胶对光的衰减作用。作为一个表征大气气溶胶的重要参量, AOD通常用以推算

气溶胶含量,评价大气环境变化及研究气溶胶辐射气候效应。

为了观测大气气溶胶的变化情况,美国国家航空和航天局(NASA)在全球建立了地面太阳光度计观测网(AERONET),对气溶胶的变化特征进行长期观测^[9]。虽然地基气溶胶观测精度较高,但是站点的分布过于稀疏,如AERONET目前在中国地区(不包括港、澳、台地区,全文同)仅有几个观测站点,不能获得全国的空间分布特征。卫星遥感可以弥补地基网站观测空间分辨率不足问题。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),为大范围进行遥感大气气溶胶监测提供了手段,为研究区域和全球尺度的气溶胶输送和分布提供了极大帮助。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。通过与AERONET观测值的比较,认为MODIS遥感反演气溶胶数据与同期AERONET监测数据验证结果表明,除在高反照率地表上空反演结果较差外,在其他区域吻合较好^[10,11]。因仪器标定和反演算法带来的估计误差大约为15%左右^[12-14]。在国外,MODIS_AOD已经被用于对化学

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40965009)、黔科合计 Z20094006、黔科合人才团队 20104012 资助。

作者简介: 郑小波(1954-),男,湖南宁远人,研究员,主要研究方向气候、遥感应用。E-mail: zxb-816@126.com

传输模式模拟出来的气溶胶光学厚度结果进行比较和验证^[15, 16]。对中国区域 MODIS_AOD 验证的结果表明 MODIS 陆地气溶胶光学厚度产品的精度达到设计目标^[17-19], 即在 AOD 厚度 >0.25 时, 相对误差在 20% 以内。AOD 厚度 <0.25 时, 绝对误差达到 0.05。

MODIS 气溶胶产品主要有 Level 2 和 Level 3 (以下简称 L2 和 L3), L2 的空间分辨率为 10×10 km。优点是分辨率高, 缺点是每幅(tile)图像受文件容量限制, 在对较大范围区域(如几个省区以上、省区跨越几个经纬度等)研究时需要进行多幅图像的拼接, 技术难度较大。因此, 目前仅应用于城市和区域研究^[20]。L3 的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 优点是适合应用于像中国这种纵横范围大的区域研究, 并且 L3 数据的处理过程中设定了比 L2 更高的质量控制阈值, 剔除更多的不合格数据。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等影响到气溶胶的传输和干湿沉降规律。Streets 等和 Lei 等在分析中国大气气溶胶时空分布和变化特征时主要考虑排放清单^[21-23]。有学者在研究区域 AOD 的变化及成因时还考虑了气候因素^[24-26]。目前还尚未见用最新 10 a 的 MODIS 卫星遥感资料对整个中国区域 MODIS 气溶胶光学厚度及变化的研究报道。本文应用 MODIS 的 L3 数据集近 10 a 数据, 得到中国区域多年来的空间分布和变化特征, 意在为气候变化、环境保护等研究提供参考。

1 材料及方法

本文采用的是 NASA 发布的 MODIS Level 3, 版本为 C005、波段为 550 nm 的气溶胶数据集^[27]。分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间从 2000 年 3 月到 2010 年 3 月, 来自 EOS-Terra 的月数据集。通过 C 语言编程和 HDF4 函数库对数据集进行处理, 得到月和年 AOD 序列。做年值分析时, 只采用了 2000~2009 年数据。分析季节变化时, 用 4 月代表春季, 7 月代表夏季, 10 月代表秋季, 2 月代表冬季(一般多用 1 月代表冬季, 因 1 月数据缺测较多, 故用 2 月数据)。为了分析亚洲夏季风气候对中国 AOD 的影响, 将受热带及副热带季风影响的主要区域以长江和淮河为界分为地理上的南北两部分, 比较这两个区域在弱南亚热带季风年(2002)和强季风

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

2 结果与分析

胡焕庸线(即黑河—腾冲分界线)与近代气候学的 400 mm 降水量等值线基本重合, 是中国半湿润区和半干旱区的分界线, 该线也揭示出气候与人口密度的高度相关性。年降水量不足 400 mm 的西部, 土地容易向荒漠化发展。如西北部的草原、沙漠、高原等景观, 人口稀少, 经济以农牧业为主。东南部则地理、气候迥异, 温度适宜, 降水充沛; 人口密集农耕和工业经济发达^[28]。因此, 可以设想胡焕庸线应该与中国天然和人为气溶胶的划分界限基本一致。

2.1 地理分布

图 1 为中国多年平均 AOD 空间区域分布。空白部分是由于地面覆盖达不到 AOD 遥感反演算法暗背景要求而出现的缺测。中国年平均 AOD 空间分布大体呈现两低、两高状态。其中两低值区, 一个位于植被覆盖度高和人烟稀少的黑龙江和内蒙古东北高纬度地区(约 0.2), 另一个在川、滇与青藏高原交界的中国西南高海拔地区(0.1~0.2)。在这两个低值区之间, 一个 AOD 低值带(0.2~0.3)基本上沿胡焕庸线连接这两个低中心, 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 高值区(>0.4), 以及数个 AOD“热点”中心(0.8~1.0)。

在中国东部, 除了黑龙江北部与俄罗斯交界的大小兴安岭森林区外, AOD 高值区与中国人口主要分布在胡焕庸线以东状况非常吻合(图 1 中红线)。中国科学院国情小组 2000 年资料统计显示: 在这条分界线以东的地区, 集聚着全国 93.8% 的人口和 95.7% 的 GDP; 而西半部人口仅占全国人口的 6.2%。文献[29, 30]表明, 这些年显然西部经济有发展, 人口流动加大, 但人口分布总体格局变化不大。将图 1 中胡焕庸线以东地区与该文献中绘制的基于 GIS 栅格化后 2000 年中国人口密度图比较可以知道, 除浙江和福建的沿海岸线地带外, 东部地区年 AOD 的分布与人口密度图基本一致。即在人口分布最多的华北平原、长江三角洲、珠江三角洲和四川盆地存在大片高 AOD 中心区域。因此可

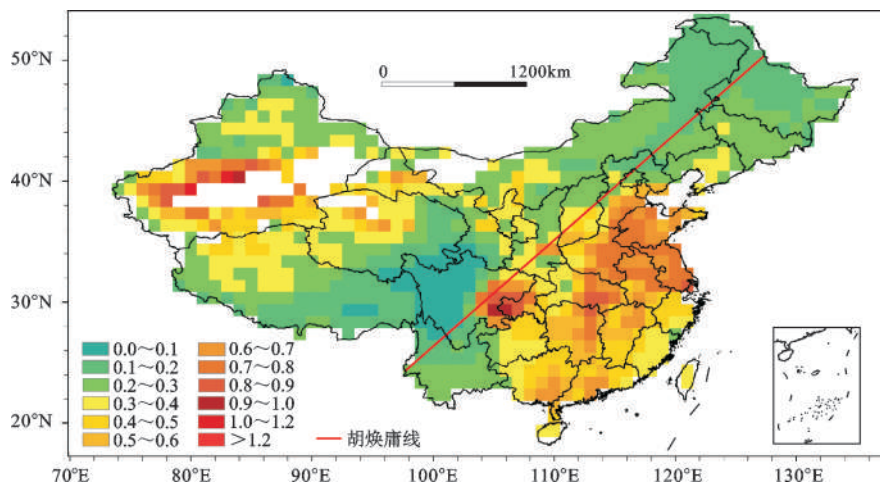


图1 中国多年平均遥感气溶胶光学厚度分布(NASA, 2000~2010年, 550 nm)

Fig.1 Annual mean Aerosol Optical Depth (AOD, 550 nm) over China in 2000-2010(Data from NASA)

以认为,东部AOD高值分布区是由于人口密集和工业化发展的结果,即东部的大气气溶胶主要是人为活动排放。

在胡焕庸线以西的地区,人口仅占全国人口6.2%^[29,31],工业不发达,多为山地和高原。因此,胡焕庸线以西西部大部份地区的AOD值都较低。但新疆中部、青海西北部、甘肃西部和内蒙西部等部分地区的AOD值相当高,在0.4到>1.0之间。究其原因与气候、地貌和地面覆盖有关。这些地区属于中国最干旱区域,年平均降水量<100 mm,部分地区年平均降水甚至不足30 mm,年平均相对湿度30%左右,植被指数<0.1^[32]。降水对气溶胶的清除和植被对沙尘的阻碍等作用非常微弱。已有研究表明,除蒙古国外,新疆塔克拉玛干沙漠,内蒙的巴丹吉林沙漠及青海柴达木盆地的沙漠对中国沙尘暴贡献率最大,是中国西部主要沙尘源^[33,34]。以沙尘为主的自然气溶胶造就了西北塔克拉玛干沙漠周边、柴达木盆区域,以及嘉峪关一带和内蒙西部高AOD值区域。

西部低值地区。四川西部高原、云贵高原西北部及青藏高原东部地区为中国年平均AOD的最低值区,AOD在0.1~0.2左右,比位于胡焕庸线另一侧的四川盆地低5~10倍。究其原因,与这一区域海拔较高(约3 000~4 000 m),人口密度低(约1~5人/km²),加之极少受沙尘天气影响等有关。因此,成为中国气溶胶最少的区域。其次,云贵高原西部,由于植被覆盖度高,人口密度相对中东部较低,年平均AOD在0.2~0.3之间。但是,在中国海拔最高(平均4 500 m),人口最少(约0~1人/km²)

的青藏高原唐古拉山以西、可可西里以南的西藏阿里地区却不是中国AOD的最低值区。这里大部地区年平均AOD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非常低。年平均AOD值偏高可能与青藏高原这一区域由于气候变暖,表面的冰川、雪盖、冻土,湖泊和河川退化演变等使高原沙漠化,其沙尘源排放的沙尘气溶胶有关^[32,35,36]。例如,同样在青藏高原的林芝地区,因其森林和草地覆盖较好,加之在沙尘发生较多的春季,该地区主要受西南风控制,沙尘天气很少^[37],因此年平均AOD非常低,在0.1左右。

东北低值地区。胡焕庸线以西的东北部,土地利用以草原和森林为主,人口较稀少(约5~10人/km²)。年平均AOD较低,为0.1~0.3间,其中与俄罗斯交界的大小兴安岭森林地区最低,约为0.1~0.2间,成为中国除青藏东南部和川西高原外另一个AOD低值中心。

综上所述,除排放源外,决定中国气溶胶年平均空间分布的地理因素主要是:人口密度、海拔和植被覆盖度。

2.2 四季变化

季节的交替影响人类活动,如北方的冬季取暖高峰期,南方的春秋季农事活动,及大小季交替间农民对秸秆等生物质大量燃烧排放,对人为气溶胶的排放源变化产生较大影响。

1) 春季。图2a表明,在胡焕庸线以东,由于北方取暖期还未结束,加上西部沙尘气溶胶通过高层大气向东输送,在东北一些AOD年平均值较低的地区,春季出现AOD>0.3的高值。从华北平原到

长江流域AOD保持较高水平。在长江以南,开始春播耕种,秸秆燃烧和森林火险事件等生物质燃烧产生的气溶胶使南方地区的AOD增加明显^[38,39]。在四川盆地和重庆地区,AOD达到一年中的最高值(>1.0),云南南部因旱季高森林火险频发使AOD增加到0.3~0.4。另一方面,春季(3~5月)是中国西部沙尘暴发生的高峰期。与年平均值相比,沙尘气溶胶出现使西部春季的AOD明显增加。

2) 夏季。图2b表明,由于季风影响,长江以南地区进入主汛期,雨水的冲刷作用使南方的平均AOD比春季的减少了0.2~0.3左右。其中,以四川盆地、华南地区减少最为明显。与春季相比,华北平原,胶东半岛和京津唐地区的AOD比春季略有增加,这与夏季人类活动增加以及空气湿度增高有利于雾霾形成有关^[25,40]。西部的塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地AOD较高(0.4~0.7)青藏高原西部阿里地区也较高(0.3~0.4)。这与夏季强太阳辐射引起的局地近地面干热粉尘对流有关^[41]。

3) 秋季。图2c表明,在胡焕庸线以东,东北地区的气溶胶大量减少,AOD在0.3以下,达到一年中最低值。华北平原,胶东半岛和京津唐地区也略有减少。西南云贵高原西部的AOD减少到0.2。中国西部的青藏高原大部及川西高原的AOD达到一年中最低值(0.1~0.2)。另外,福建沿海地区AOD也减小到0.2左右,为一年的最小值。

4) 冬季。图2d表明,在有数据的地方,东北

部分地区AOD增加到0.3左右。京津唐地区AOD基本达到一年中最低(0.2~0.3左右)。华南地区比秋季略有下降,四川盆地比秋季略有增加。西部和黑龙江部分地区由于冬季积雪等原因,可靠的反演数据少,在一定程度上影响了对这部分地区AOD的评估。从已有数据看,青藏高原东部、川西高原和云贵高原继续保持较低AOD值。新疆有数据地方显示AOD较高,为0.3~0.5。

2.3 气候对气溶胶分布影响

除了人口、海拔和地理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。大气垂直和水平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;大气边界层条件,空气湿度和降水影响气溶胶的干湿沉降。

胡焕庸线以东的中国地区具有典型的季风气候。季风强度变化体现在大气环流和降水的差异,二者决定了气溶胶的传输和清除从而影响到气溶胶的分布。以弱南亚夏季风年(2002年)和强南亚夏季风年(2003年)为例(图3),将这两年7月的AOD分别与10 a(2000~2009年,2010年数据只到3月)平均7月AOD值相减,即求这两年的AOD距平,结果见图3。从图可知,在弱季风的2002年7月份,与常年相比,中国大陆东部的AOD空间分布特征为:在105°E以东,34°N(淮河)以南地区为

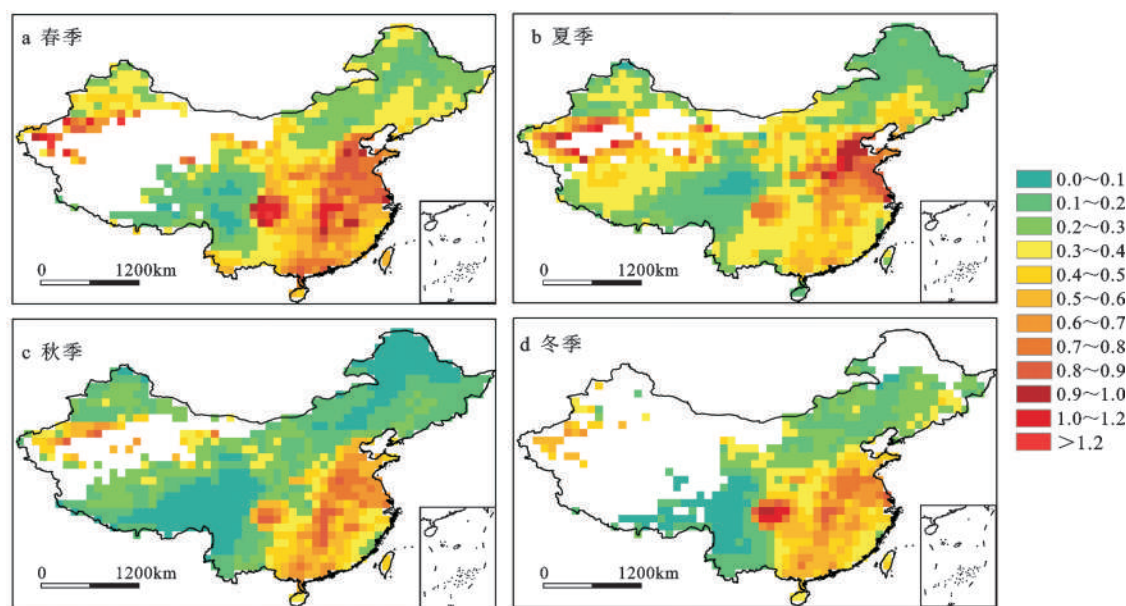


图2 中国大陆四季AOD分布

Fig.2 Seasonal mean AOD over China in spring (a), summer(b), fall(c)and winter(d) in 2000-2010

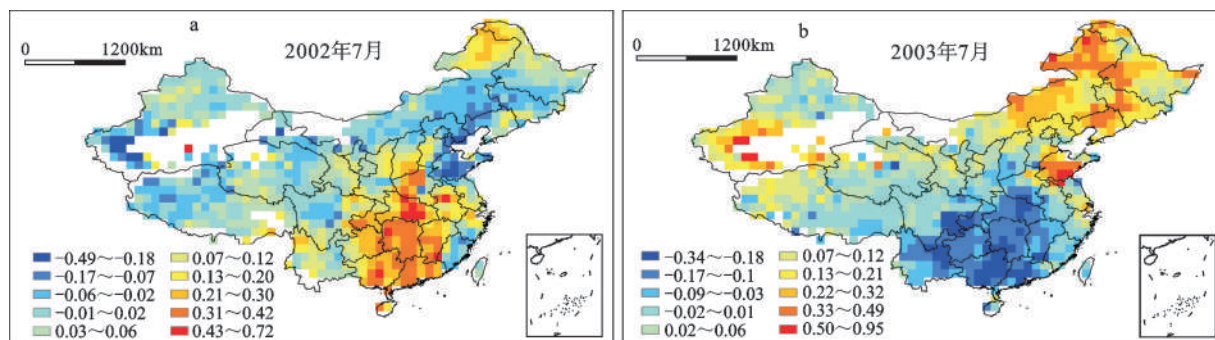


图3 AOD距平空间分布

Fig.3 Distributions of anomaly AOD over China in July, 2002(a) and July, 2003(b)

明显的正距平,这一区域的 AOD 比常年偏高约 0.3~0.6; 在 35°~46°N 之间为负距平, AOD 比常年偏低约 0.1~0.4; 在 46°N 以北地区, AOD 比常年增加了 0.2~0.4, 形成“南高北低”型分布。

在强南亚夏季风的 2003 年 7 月(图 3b), 中国大陆 AOD 距平的空间分布正好与 2002 弱夏季风年反位相, 即“北高南低”型。由于排放清单不可能在相邻的 2 年间发生较大改变, 因此 2002 年及 2003 年 7 月份中国大陆 AOD 空间分布的反相异常可能主要反映了亚洲夏季风对中国气溶胶年际变化的影响。

2.4 中国大陆气溶胶月和年际间变化趋势

将中国以胡焕庸线为界(见图 1)划分为不同性质(人为和自然)大气气溶胶为主的两个区域, 分别分析每个区域的月 AOD 变化特征。从图 4a 可知, 近 10 a 来, 中国大陆东部的月 AOD 在 0.31~0.57 之间变化, 月际间的变幅较大, 具有季节性变化周期。低值(AOD 约 0.31 左右)出现在 11~12 月, 高值(AOD>0.50)多出现在每年的 3~6 月, 即秋末冬初低, 春夏季高。从图 5a 还知, 中国东部 AOD 的平均值为 0.45, 与全球陆上平均 AOD 为 0.19 相比^[42], 表明中国东部的气溶胶浓度非常高。

从图 4b 可知, 西部月 AOD 在 0.14~0.35 之间, 也呈现明显的季节变化。低值(<0.17)多出现在 10 月至来年 1 月, 高值(>0.3)多出现在每年的 4~7 月, 除与沙尘天气有关, 还与这时段人类活动频繁有关。西部多年平均 AOD 约为 0.25, 明显低于东部地区。根据图 4 还可以知道, 尽管其沙漠地区存在强沙尘排放, 西部的 10 a 平均 AOD 比东部低了约 0.20。

由于在胡焕庸线以东地区以人为气溶胶排放为主, 主要成分为黑碳, 有机碳, 硫酸盐和氮化物

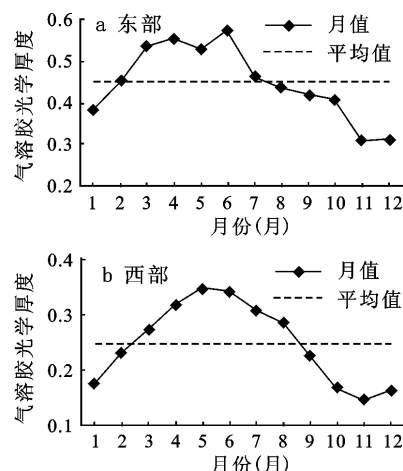


图4 2000年3月~2010年3月中国大陆AOD月变化特征

Fig.4 Monthly AOD time series in Eastern China (a) and Western China (b) from 2000 to 2010

等。这些地区亚洲季风气候具有显著的多尺度变化特征, 特点表现在东亚夏季风环流及其温度、湿度和降水等气象变量^[43]。由于这些人为排放和气象因素对气溶胶的影响交织在一起, 使东部 AOD 的月变化较为复杂。胡焕庸线以西人口稀疏, 沙尘排放源单一, 加上其干旱气候等因素, 自然气溶胶 AOD 的月变化呈现有规律的正弦分布特征, 基本与沙尘天气的出现的规律一致。

近 10 a 来, 中国东、西部 AOD 的变化趋势略有不同(图 5)。图 5a 表明, 东部的年 AOD 呈现增加的趋势, 增加的速率为 0.032/10 a。其中, 在 2000~2007 年间的增加比较显著(通过了 95% 的置信度), 2008 年以后开始明显下降。西部的年 AOD 出现微弱减少的趋势, 减少的速率为 0.017/10 a。西部 AOD 的减少与近些年来沙尘天气呈先减少后略微增加但总体呈缓慢下降的变化趋势有关, 西

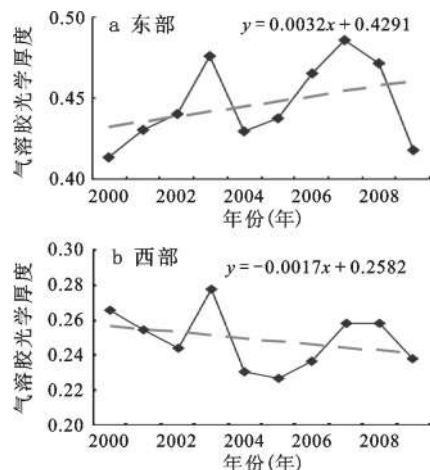


图5 中国AOD年变化

Fig.5 Interannual variation of AOD over China in Eastern China (a) and Western China (b) from 2000 to 2010

部地区AOD的减少与沙尘影响天气出现的次数趋于减少的变化基本一致^[44]。

作为中国大陆天然和人为气溶胶的划分界,胡焕庸线东西两侧地区影响气溶胶年际间变化的因子也不同。其东部人为气溶胶年际间变化受亚洲季风气候影响。亚洲季风异常主要改变大气中气溶胶的传输和降水清除;而其以西地区自然气溶胶年际间变化主要受其沙尘气溶胶释放的影响。沙尘天气过程主要控制其沙漠地区的起沙强弱。

3 结论和讨论

中国大陆大气气溶胶光学厚度的分布与人口、地理、季节和气候有关。其空间分布可用胡焕庸线把大陆分为东、西两部分。依据以上对中国大陆AOD的分析,中国气溶胶的地理和气候学特点可归纳如下:

1) 胡焕庸线与中国大陆人为和自然气溶胶的划分界限基本一致。在其以东地区人口稠密和经济发达,以人类活动产生的排放源为主,多年平均AOD约为0.45。约为全球陆上平均AOD的2.4倍。在其西部人口稀少和较高海拔地区,以干旱地区自然沙尘气溶胶为主。多年平均AOD约为0.25,东西两地区的年平均AOD差异达到0.20。

2) 在人为气溶胶主导的东部地区,AOD最大值多出现在3~6月,约0.5以上;最低值多出现在11~12月,约0.3左右。西部最大值多出现在4~6月,AOD约0.3左右,高值出现的时间与沙尘暴多

发季节有关。最低值多出现在10月至来年1月,AOD值小于0.2。

3) 中国大陆季风区气溶胶变化受到亚洲季风气候强烈影响。以弱夏季风年(2002)和强夏季风年(2003)为例,弱季风年的7月,淮河以南大部分地区的AOD比10 a平均值偏高0.3~0.6。而北方正好相反,月AOD比10 a平均值偏低0.1~0.4。另一方面,在强季风年,7月AOD空间分布与弱季风年正好反位相,即淮河以南为负距平,东北地区为正距平。

4) 胡焕庸线东西两侧地区气溶胶年际间变化及其控制因子明显不同。近10 a来东部AOD的年际间变化呈现增加趋势,其中,在2000~2007年间的增加比较显著(通过了95%的置信度),2008年以后开始明显下降。西部的AOD却出现微弱减少的趋势,减少的速率为0.017/10 a。东部地区气溶胶年际间变化主要取决于大气中气溶胶的传输和降水清除异常;而胡焕庸线以西地区气溶胶年际间变化主要受控于干旱地区气溶胶地表起沙过程。

5) 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,以及高反照率地表上空AOD精度较低,用于气溶胶空间分布的比较还存在不确定性。今后还需要做进一步的地面验证和不断改进,NASA已经开始发布更新的C5.1版AOD数据,有助于今后继续对中国气溶胶分部和变化进行深入研究。

感谢:本文应用NASA的MODIS数据,审稿人提出非常有益的修改意见,特在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. Inverse Relations Between Amounts of Air Pollution and Orographic Precipitation[J]. Science,2007,315:1396.
- [4] 段 婧,毛节泰.气溶胶与云相互作用的研究进展[J].地球科学进展,2008,23(3):252~261.
- [5] 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.
- [6] Che H,Zhang X,Li Y,et al.Horizontal visibility trends in China 1981-2005[J]. Geophys. Res. Lett., 2007,34, L24706, doi:10.10-

- 29/2007GL031450.
- [7] 查良松.我国地面太阳辐射量的时空变化研究[J].地理科学, 1996,16(3):232~237.
- [8] Carmichael G R,Adhikary B,Kulkarni S,et al.Asian Aerosols: Current and Year 2030 Distributions and Implications to Human Health and Regional Climate Change. Environ[J].Sci. Technol,2009,43:5811-5817.
- [9] 延 昊,矫梅燕,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.
- [10] Mi W, Li Z, Xia X, et al. Evaluation of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products at two Aerosol Robotic Network stations in China[J]. J. Geophys. Res., 2007,112, D22S08, doi:10.1029/2007JD008474.
- [11] Kaufman Y J, Boucher O, Tanré D, et al. Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data[J]. Geophys. Res. Lett., 2005, 32, L17804, oi:10.1029/2005GL023125.
- [12] Levy R C,Remer L A,Mattoo S,et al.Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance[J]. J. Geophys. Res., 2007,112, D13211, doi:10.1029/2006JD 007811.
- [13] Li Z,Niu F,Lee K H,et al.Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China[J].J.Geophys. Res.,2007,112, D22S07,doi:10.1029/ 2007 JD008479.
- [14] Levy R C,Remer L A,Dubovik O.Global aerosol optical properties and application to Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol retrieval over land[J].J.Geophys.Res., 2007, 112,D13210, doi:10.1029/2006JD007815.
- [15] Adhikary B,Kulkarni S,Dallura A,et al.A regional scale chemical transport modeling of Asian aerosols with data assimilation of AOD observations using optimal interpolation technique[J]. Atmospheric Environment,2008,42:8600-8615.
- [16] Carnevale C,Finzi,G Mannarini G,et al.Comparing mesoscale chemistry-transport model and remote-sensed Aerosol Optical Depth[J]. Atmospheric Environment,2011,45:289-295.
- [17] Jaein I,Rokjin J,Park J,et al.Effects of Siberian forest fires on air quality in East Asia during May 2003 and its climate implication[J].Atmospheric Environment,2008,42:8910-8922.
- [18] He Q,Li C,Tang X,et al.Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta[J]. Remote Sensing of Environment,2010,114:1649-1661.
- [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.
- [20] 黄文声,李 真,李权锦,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.
- [21] Streets D G.An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. Geophys. Res ,2003,108 (D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- [22] Streets D G,Yu C,Wu Ye,et al.Aerosol trends over China, 1980-2000[J].Atmospheric Research, 2008,88:174-182.
- [23] Lei Y,Zhang Q, He K B, et al. Primary aerosol emission trends for China, 1900-2005[J]. Atmos. Chem Phys Discuss, 2010, 10: 17153-17212.
- [24] Bao Z, Z Wen,R Wu.Variability of aerosol optical depth over east Asia and its possible impacts[J]. J. Geophys. Res.,2009, 114, D05203, doi:10.1029/2008JD010603
- [25] 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,2001, doi: 10.1175/2010JAMC2414.1.
- [26] 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].J.Geophys. Res.,2009, 114,D10206,doi:10.1029/ 2008JD010648.
- [27] Levy R C,Leptoukh G G,Kahn 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.
- [28] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系[J].地理科学,2005,25(4): 441~447.
- [29] 葛美玲,封志明.中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J].地理学报, 2009, 64(2): 202~210.
- [30] 王国霞,鲁 奇.中国近期农村人口迁移态势研究[J].地理科学, 2007,27(5): 630~635.
- [31] 殷培红,方修琦,马玉玲,等.21世纪中国粮食短缺地区的空间格局和区域差异[J].地理科学,2007,27(4):465~471.
- [32] Lina Meng-Lung, Chub Chieh-Ming, Shiha Jyh-Yi, et al. Assessment and monitoring of desertification using satellite imagery of MODIS in East Asia[J]. Proc. of SPIE, 2006. Vol. 6411 641123-1-9
- [33] Zhao T L,Gong S L,Zhang X Y,et al.A Simulated Climatology of Asian Dust Aerosol and Its Trans-Pacific Transport. Part I: Mean Climate and Validation[J].Journal of Climate,2006,19: 88-103.
- [34] 汪爱华,李 丽,迟耀斌,等.基于北京1号小卫星的全国沙漠与沙漠化土地监测研究[J]. 地理科学, 2010,30(3): 409~414.
- [35] Hana Yongxiang,Fanga Xiaomin,Kang Shichang,et al.Shifts of dust source regions over central Asia and the Tibetan Plateau: Connections with the Arctic oscillation and the westerly jet[J]. Atmospheric Environment,2008,42:2358-2368.
- [36] Fang X M,Han Y X,Ma J H.Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: a case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa[J].Chinese Science Bulletin,2004,49(9): 953-960.
- [37] 颜 宏,沈国权,毛耀顺,等.中华人民共和国气候图集[M].北京:气象出版社,2002:90~100.
- [38] 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.

- [39] 王 玲,田庆久,包 颖.基于HJ卫星IRS遥感数据的农作物秸秆火点提取模式研究[J].地理科学, 2011,31(6): 661~667.
- [40] Liu P F, Zhao C S, Hallbauer E, et al. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the north china plain[J].Atmos.Chem.Phys.,2011, 11,3479-3494,10.5194/acp-11-3479-2011,
- [41] 邓祖琴,韩永翔,白虎志,等.沙漠地区沙尘气溶胶含量变化的原因分析[J].中国环境科学, 2009,29 (12):1233~1238.
- [42] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C,et al.Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. J. Geophys. Res.,2008,113,D14S07, doi:10.1029/2007JD009661.
- [43] 陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等.东亚季风[M].北京:气象出版社, 1991:12.
- [44] 杜吴鹏,高庆先,王跃思,等.沙尘天气对我国北方城市大气环境质量的影响[J].环境科学研究,2009,22(9):1021~1026.

Geographical and Climatological Characterization of Aerosol Distribution in China

ZHENG Xiao-bo¹, LUO Yu-xiang¹, ZHAO Tian-liang², CHEN Juan¹ KANG Wei-min¹

(1. Guizhou Institute of Mountainous Climate and Environment, Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resource, Guiyang, guiyang 550002, China; 2.Air Quality Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, Ontario, M3H 5T4, Canada)

Abstract: The demarcation line of China's population geography, the Aihui-Tengchong Line or the internationally known "Hu Line" divides China into the east and west parts, based on differences in China's population, geography, climate and economy, all of which are closely associated with the aerosols over China. By using the aerosol optical depth (AOD) data of MODIS during 2000 to 2010, the geographical and climatological distributions of aerosols over China are presented, and the "Hu Line" is found also to describe a geographic division of aerosols over China. On the east of "Hu Line" with high population densities in the low-elevation China, the monthly AOD varies from the peak (>0.5) during March and June to the low of around 0.3 in November and December with an annual mean of about 0.45, mostly contributed by anthropogenic aerosols from the human activities. On the west of "Hu Line" with a sparse population in the high elevation regions, the AOD is dominated by the naturally emitted aerosols with an annual mean of 0.25 changing between the high (about 3.0) in the period of April to July and the low (<0.2) from October to January. The positive and negative trends in annual AOD in 2000-2010 are respectively found in the regions on the east and west of "Hu Line". Asian monsoon has a notable impact on the interannual variability of aerosols over the east region by modulating the atmospheric transport and precipitation washout. Taking example of the AOD anomalies in July 2002 and 2003 for a weak and strong year of south Asian summer monsoon, compared to the 10-year mean value, the AOD values in a weak summer monsoon year (2002) were (0.3-0.6) higher and (0.2-0.4) lower respectively in south and north of Huaihe River. In a strong summer monsoon year (2003), the opposite AOD pattern to the weak summer monsoon year 2002 was distributed over the east region with negative (positive) AOD anomalies in south (north) of Huaihe River. The interannual aerosol variations in the west of "Hu Line" are strongly influenced by dust emission sources in the deserts. The dust weather processes control the natural dust emissions. The maximal AOD of 3.0 in the west China could be brought by the frequent dust storm events from April to July.

Key words: aerosol optical depth (AOD); MODIS; the "Hu Line"; geography; climatology