

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

齐玉磊, 葛颢铭, 黄建平*

兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: hjp@lzu.edu.cn

2012-10-08 收稿, 2012-12-17 接受, 2013-05-29 网络版发表

国家重大科学研究计划(2012CB955302)、国家自然科学基金(41105019, 41175042)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110211120021)和兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2011-4)资助

摘要 通过对比 2006~2009 年, 搭载在 Terra 卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)和多角度成像光谱仪(MISR)传感器与我国北方 4 个地面 AERONET 站点观测的气溶胶光学厚度 AOD(aerosol optical depth), 发现在 SACOL 站和北京站, MISR 反演的气溶胶光学厚度优于 MODIS; 在香河站和兴隆站, MODIS 反演的气溶胶光学厚度优于 MISR. 总体上, MISR 反演的 Angstrom 值与地面观测相对误差为 14%, 而 MODIS 反演结果的相对误差为 30%. 因而在气溶胶辐射强迫研究中, 使用 MISR 反演的 Angstrom 值来计算不同波段的气溶胶光学厚度, 得到的结果误差较小. 同时, 利用卫星观测分析了我国大部分地区 AOD 季节平均分布特征: 主要有两个高值区, 分别是塔克拉玛干沙漠和华北南部以及华东北部地区. 高值区位置随四季变化不明显, 但在量值上有明显的季节变化. 塔里木盆地春季 AOD 值最大, 华北南部以及华东北部 AOD 值在夏季最大. MODIS 和 MISR Angstrom 指数分布均表明, 春季塔克拉玛干沙漠的气溶胶粒子半径最大; 夏季两个高值区的气溶胶粒径达到最小.

关键词

中分辨率成像光谱仪
(MODIS)
多角度成像光谱仪
(MISR)
AERONET
气溶胶光学厚度(AOD)

大气气溶胶是指悬浮在大气中的各种液态和固态粒子, 是地球-大气-海洋系统的重要组成部分. 它主要通过两种作用影响气候, 一是通过吸收和散射作用, 减少到达地球表面的太阳短波辐射, 即直接辐射强迫; 二是能够充当云凝结核和冰核, 通过与云相互作用影响云的微物理特性^[1], 从而影响云的辐射特性, 进而对气候造成影响, 即间接辐射强迫^[2-5].

气溶胶的生命周期较短, 只有几周甚至更短^[6], 且气溶胶源地在地理上分布也不均匀, 从而导致了大气气溶胶的时空分布很不均匀^[7]. 由于没有长期准确的气溶胶光学辐射特性及其时空分布的观测数据, 使得气溶胶对地气系统的辐射强迫研究一直都具

较大的不确定性^[8], 是影响气候模拟不确定性的重要因素之一.

气溶胶光学厚度是气溶胶光学特性的重要参数之一. 它是消光系数在垂直方向上对整层大气的积分, 反映了气溶胶对光的衰减作用, 并在一定程度上反映了空气的浑浊程度, 是定量描述气溶胶气候辐射强迫的重要参数. 通常获取气溶胶光学厚度的方法主要通过地面和卫星观测. 地面观测具有时间、光谱分辨率高, 反演方法简单、准确的特点, 但地面观测只能代表站点周围很小空间范围内的情况, 而卫星遥感能够在全局范围内对气溶胶进行观测, 具有高空间分辨率, 因此卫星遥感数据在当前气溶胶对

引用格式: 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. 科学通报, 2013, 58: 1670-1679
英文版见: 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. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5678-5

区域和全球气候辐射强迫的科学研究中得到了广泛使用. 然而卫星反演气溶胶光学厚度的算法复杂, 相对于地面观测精度较差, 很难满足气溶胶气候辐射效应的准确研究. 因此, 为了合理使用卫星资料, 需要首先通过地面观测对卫星的观测结果进行对比验证.

搭载在地球观测系统(EOS)卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)^[9]和多角度成像光谱仪(MISR)^[10]在气溶胶观测方面得到了广泛使用^[11]. 关于二者与地面 AERONET^[12]观测的对比验证, 国内外已有很多相关研究. 一些结果表明, 除了海岸地区, MODIS 在其他陆地上空反演的 AOD 误差都在 $\Delta\tau_a = \pm 0.05 \pm 0.2\tau_a$ 之内^[13]; 在非洲和东南亚少数站点, MODIS 气溶胶光学厚度比地面观测偏低, 其他站点均偏高^[14]; 在中国陆地区域, MODIS 反演的气溶胶光学厚度具有地域和季节性差异, 反演误差南方小于北方, 东部小于西部, 干季小于湿季^[15,16]; 在北京地区, MODIS 反演的气溶胶光学厚度和地面多波段光度计的观测结果相关性较好, 当气溶胶光学厚度较小时(0~0.5), MODIS 的反演值大于地面观测值, 当 AOD 较大时(0.5~1.0)则相反^[17-19]; 在我国沿海地区, MODIS 在东海沿岸与 AERONET 的观测结果基本一致, 在渤海和黄海近海岸一带反演值偏高^[20,21]; 此外, Mi 等人^[22]和 Li 等人^[23]对 MODIS C4, C5 产品在中国区域进行了对比分析, 并与地面站点进行了比较, 指出 C5 比 C4 产品有明显改善.

Diner 等人^[24]用 2000 年 8~9 月 MISR 反演的 AOD 在非洲南部与地面观测进行比较, 发现 MISR 反演的 AOD 有 0.02 的正偏差和 10% 的高估; Liu 等人^[25]用 MISR 反演的 AOD 与美国 16 个 AERONET 站点数据进行对比, 发现 MISR 的反演误差在 $\pm 0.04 \pm 0.18\tau_a$ 之内; 在沙漠地区, MISR 反演气溶胶光学厚度与地面观测的一致性较好^[26-28]; Kahn 等人^[29,30]用 MISR AOD 与 AERONET 的观测值进行比较, 发现大部分数据的反演误差都在 0.05 或光学厚度的 20% 之内; Liu 等人^[31]对 MISR 产品在中国区域进行了评估, 发现 MISR AOD 在 AOD<0.5 时与地面符合较好, 当 AOD>0.5 时, 会有系统性低估.

由于不同卫星传感器具有不同的特点且反演算法也不一样, 它们反演的气溶胶光学厚度也存在差异. Abdou 等人^[8]指出在 470 和 660 nm 通道, MODIS 反演的气溶胶光学厚度比 MISR 反演结果平均分别

要高 35% 和 10%. 张莹和孙照渤^[32]用月平均资料做了中国中东部 MODIS 与 MISR 气溶胶光学厚度的对比, 发现在东部地区 MODIS 的精度较高.

我国北方地区下垫面及气溶胶时空变化复杂, 特别是沙尘气溶胶分布广泛, 这对卫星观测反演气溶胶光学厚度带来了一定的难度, 本文主要通过比较分析 MODIS 和 MISR 卫星与地面站点 AERONET 观测的 AOD 以及 Angstrom 值, 确定不同卫星数据在我国北方地区观测的有效性和可靠性, 以及为合理利用数据进行深入研究提供依据. 此外, 还通过卫星观测研究了气溶胶在我国北方地区的时空分布特征.

1 数据

本文使用的 Terra 卫星上 MODIS 和 MISR 卫星观测数据, 时间范围为 2005 年 12 月到 2009 年 11 月, MODIS 使用的是 MOD04 C051 Level2 和 MOD08 Level3 数据. MISR 是 MIL2ASAE Level2 和 Level3 数据. Level2 气溶胶数据空间分辨率较高, 其中 MODIS Level2 分辨率为 10 km×10 km, MISR Level2 为 17.6 km×17.6 km, 因此用来与地面站点观测进行对比. MODIS Level3 的空间分辨率为 1°×1°, MISR Level3 的空间分辨率为 0.5°×0.5°, 主要用来分析气溶胶时空变化分布.

地面为 AERONET 观测数据. 太阳光度计具有很窄的视场角度, 反演的气溶胶光学厚度受地表参数及气溶胶前向散射^[33]的影响较小, 反演精度能达到 0.01~0.02^[34], 可以用来检验卫星反演的气溶胶光学厚度^[16]. AERONET 数据产品分为 3 级: L1.0 是没有云过滤和质量验证的数据; L1.5 是完成了云过滤但没有质量验证的数据; L2.0 是完成了云过滤和质量验证的数据. 本文使用的是 L2.0 的数据, 选取了我国北方 4 个有长期地面观测的站点, 分别是 SACOL 站^[35]、北京站、香河站和兴隆站, 地理位置等信息如表 1 所示.

表 1 地面 4 个 AERONET 站点的地理位置和下垫面类型

站点	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)	下垫面
SACOL	104.137	35.946	1965	草地
北京	116.381	39.977	92	城市
香河	116.962	39.754	36	城郊
兴隆	117.578	40.396	970	森林

2 MODIS 和 MISR 与 AERONET 站点对比验证

为了说明 MODIS 和 MISR 观测 AOD 资料在我国北方地区的适用性,我们将卫星数据与 SACOL,北京、香河以及兴隆这 4 个长期进行地面气溶胶观测的 AERONET 站点观测结果进行了比较.

2.1 波段插值

MISR 在 446, 558, 667 和 862 nm 4 个波段反演气溶胶光学厚度, MODIS 反演气溶胶光学厚度的波段主要有 470, 550 和 660 nm, 而地面站点太阳光度计观测的波段为 380, 440, 500, 675, 870 和 1020 nm. 为了卫星与地面观测值能进行比较,需要通过插值来获取在某一共同波长通道的气溶胶光学厚度. 气溶胶光学厚度和波长之间满足 Angstrom 经验表达式^[36].

$$\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

其中 $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度, λ 为相应的波长, β 是浊度系数, 相当于波长为 1 μm 时的气溶胶光学厚度, α 是 Angstrom 指数. 本文利用(1)式, 将地面太阳光度

计 440 和 675 nm 通道观测的气溶胶光学厚度插值到 550 nm, 并与卫星观测进行了对比.

2.2 空间和时间匹配

卫星观测的气溶胶光学厚度是空间上的一个平均值, 而地面观测气溶胶光学厚度是每 15 分钟一个单点值的时间序列. 因此在卫星与地面观测作对比时, 需要将 MODIS, MISR 的观测数据与地面站点的数据进行时间和空间的匹配. 本文采用以地面站点为中心, 取周围 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬度范围内卫星观测数据的空间平均, 和卫星过境前后 30 分钟地面观测的气溶胶光学厚度的时间平均进行对比^[22,23], 并且在选取的范围内 MODIS 至少要有 5 个反演值, MISR 至少要有 2 个反演值, 地面 1 h 内至少有 2 个观测值.

2.3 MODIS 和 MISR 与 AERONET AOD 观测的比较

图 1 和 2 分别给出了 MODIS 和 MISR 在 550 nm 通道观测的气溶胶光学厚度与 AERONET 观测数据匹配后进行线性回归分析的结果. 图 1 中可以看出, 除了兴隆站, MODIS 在其他 3 个站的观测值基本上都

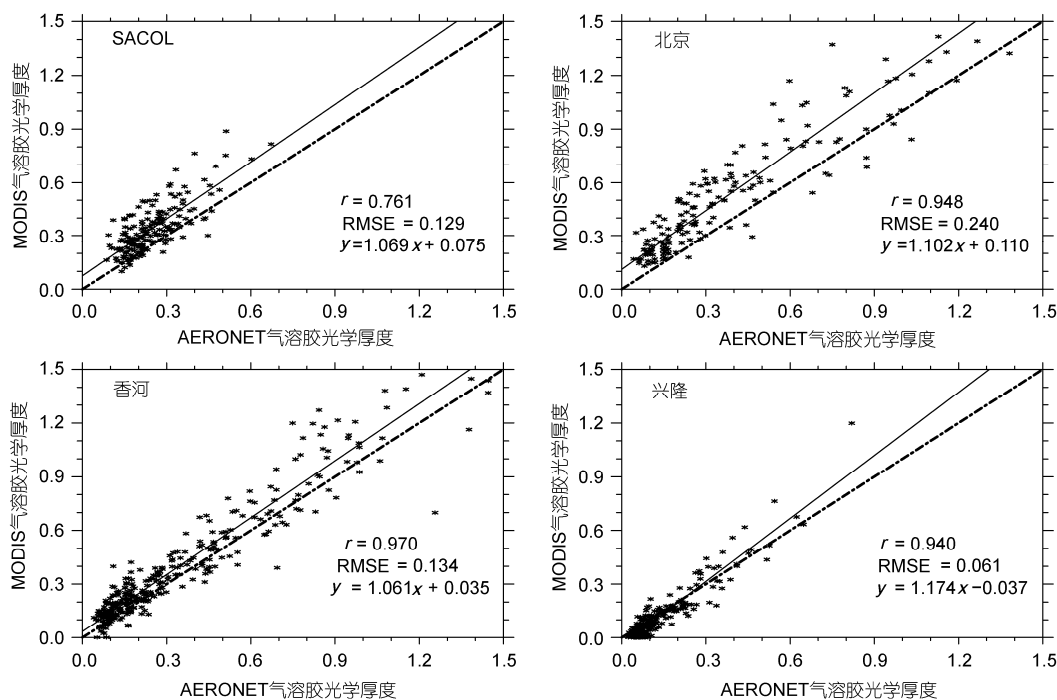


图 1 MODIS 气溶胶光学厚度与 AERONET 观测对比

图中实线为拟合线, 虚线为 $y=x$ 线, r 为相关系数, RMSE 是均方根误差, 下同

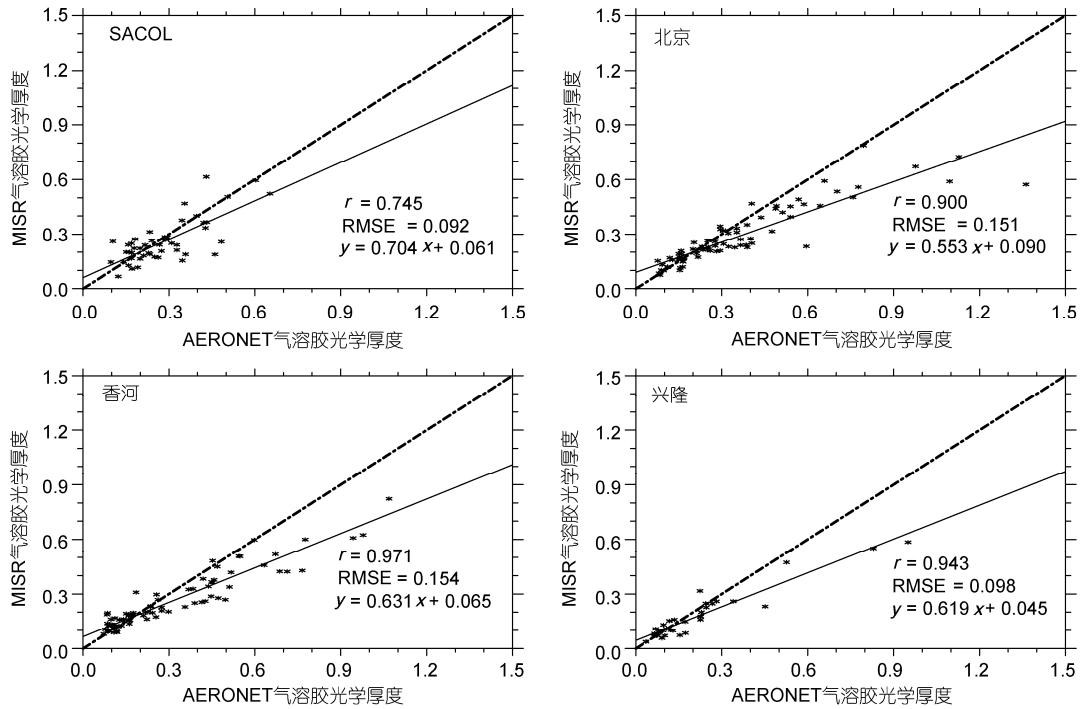


图 2 MISR 气溶胶光学厚度与 AERONET 观测对比

位于 $y=x$ 线的上方, 说明在这 3 个站高估了气溶胶光学厚度. 在 SACOL 站和北京站, MODIS 比 AERONET 偏高最为显著, 拟合方程截距大于 0.07. 在香河站, 卫星 MODIS 观测的 AOD 比地面观测略微偏高, 截距为 0.035. 在兴隆站, 卫星观测的 AOD 与地面观测一致性非常好, 相关系数达到了 0.940, 均方根误差为 0.061. 图 2 中 MISR 观测的 AOD 与 4 个站点均偏低, 在 SACOL 和北京站均方根误差都小于 MODIS 的均方根误差, 在香河和兴隆均大于 MODIS 的均方根误差. 因此, 在 SACOL 站和北京站, MISR 与地面观测的 AOD 误差要小于 MODIS 与地面的误差; 在香河站和兴隆站, MODIS 观测的 AOD 优于 MISR. 这可能是由于在 SACOL 和北京站, 地表植被相对很少, MODIS 的暗像元算法在这些地表上空反演气溶胶光学厚度的效果较差, 而 MISR 利用它的多角度特点, 不需要考虑植被变化对地表反照率的影响, 因此在这两个地区 MISR 的反演效果相对较好.

2.4 MODIS 和 MISR 与 AERONET 气溶胶光学厚度和 Angstrom 指数季节平均的比较

图 3 给出了 MODIS, MISR 与地面 AERONET 观测匹配的气溶胶光学厚度的季节平均. 在 SACOL 站,

春、夏、秋三季 MODIS 观测的 AOD 比地面值高, 夏季偏高最多为 0.13; MISR 观测的 AOD 与地面观测的一致性较好, 偏差均在 0.04 以内. 在冬季, MISR 与地面没有匹配点, MODIS 与地面也只有 1 个匹配点, 无法得出确定的结论. 在北京站, MODIS 观测的 AOD 的季节平均在四季都大于地面的观测值, 其中春季和夏季偏高 0.2, 相对误差在 50% 以上, 秋季和冬季分别偏高 0.07 与 0.02 左右. MISR 观测的 AOD 季节平均值在四季都低于地面的观测值, 偏差为 0.02~0.09, 冬季较小, 在 0.02 左右. 在香河站, MODIS 观测的 AOD 春季比地面观测值偏高 0.14, 在夏季和冬季偏高 0.06 和 0.04 左右, 秋季偏差最小, 在 0.01 以内; MISR 的 AOD 在四季都小于地面观测值, 冬季偏差在 0.02 以内, 春、夏和秋季偏差为 0.04~0.11. 兴隆站 MODIS 观测的气溶胶光学厚度四季均比地面观测值小, 在春、冬季节偏差在 0.01 以内, 夏、秋季节比地面偏低 0.06 和 0.02. MISR 在春季和夏季比地面偏低 0.03 左右, 在秋季和冬季比地面偏高 0.02 和 0.01.

图 4 给出了 MODIS, MISR 与地面 AERONET 观测 Angstrom 值季节平均的比较. Angstrom 指数表征了气溶胶粒子谱分布的大小, Angstrom 指数越大, 小

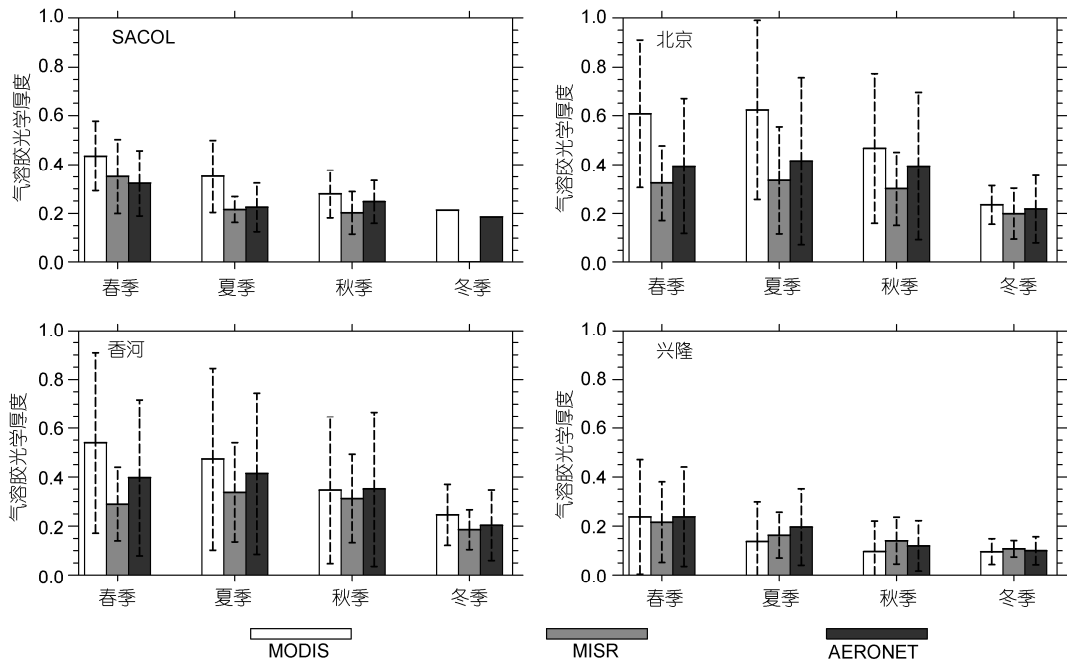


图3 MODIS 和 MISR 与 AERONET 观测气溶胶光学厚度季节平均值的比较

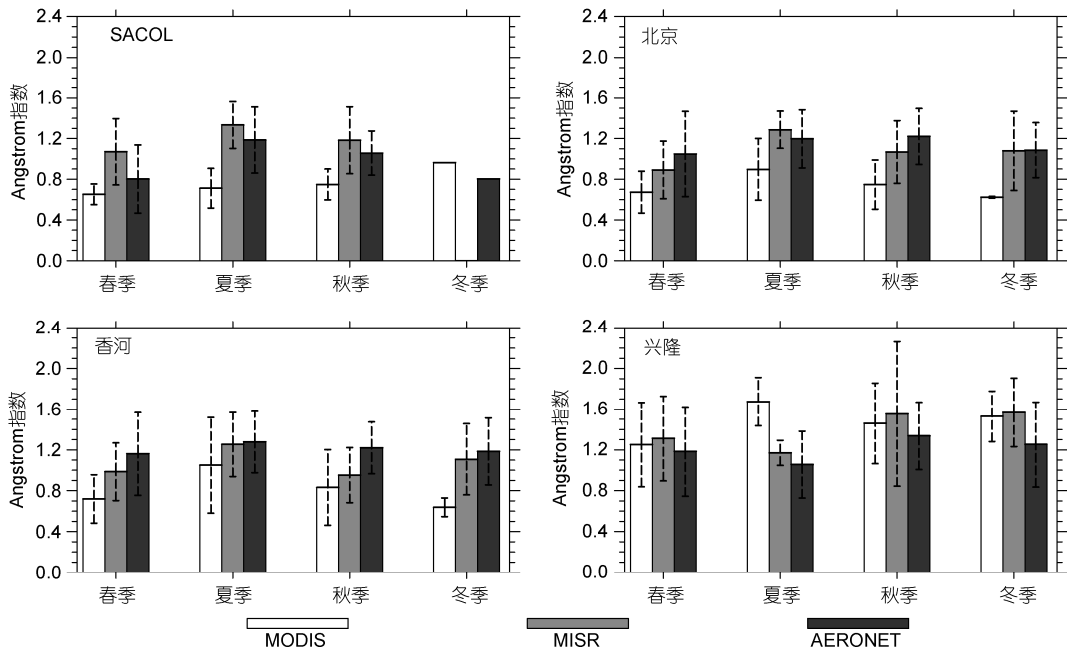


图4 MODIS 和 MISR 与 AERONET 观测 Angstrom 指数季节平均值的比较

粒子气溶胶所占比例越多. 在 SACOL 站, Angstrom 值在春季最小夏季最大, 这主要与春季的沙尘天气和夏季降水有关^[37], 春季MODIS观测的 Angstrom 值比地面观测值偏低 0.15, MISR 比地面高出 0.27, 在夏季和秋季 MODIS 偏低 0.47 和 0.31, 相对误差为

40%和 30%, MISR 比地面分别高出 0.15 和 0.13, 相对误差均为 12%左右. 在北京站, Angstrom 指数季节变化与 SACOL 相同. 春、夏、秋三季 MODIS 的观测值比地面值偏低 0.30~0.47, 相对误差为 25%~39%, MISR 与地面偏差都在 0.16 以内, 相对误差小于 15%.

在香河站, MODIS 四季的观测值均比地面偏低, 年平均相对误差为 33.5%. MISR 的观测值在夏季和冬季比地面仅偏低 0.02 和 0.06, 在春季和秋季偏低 0.17 和 0.26, 相对误差为 15% 和 22%. 在兴隆站, MODIS 和 MISR 四季的观测值均比地面高, 其中春季 MODIS 与地面误差最小为 0.07, 夏季误差最大为 0.62, 相对误差达到 59%. MISR 夏季与地面误差最小为 0.11, 冬季误差最大, 比地面偏高 0.3, 相对误差达 25%.

总体上, MODIS 观测的 Angstrom 值与地面的相对误差在 30% 左右, 而 MISR 为 14%, 与地面观测值更接近. 这可能与 MODIS, MISR 获取各个波段地表反射的方法不同有关. 可以推断, 在利用辐射传输模式计算宽波段气溶胶辐射强迫时, 如果假定 550 nm 波段的光学厚度值是准确的, 那么通过波长指数计算其他波段的光学厚度, 使用 MISR 的 Angstrom 值得到的光学厚度造成的误差会明显小于使用 MODIS Angstrom 值得到的结果.

3 MODIS 和 MISR 气溶胶光学厚度以及 Angstrom 指数的时空分布

3.1 2006~2009 年 MODIS 和 MISR 气溶胶光学厚度季节平均分布特征

图 5 和 6 分别给出了 2006~2009 年 MODIS 和 MISR 的 550 nm AOD 季节平均分布情况. 从图中可以看出, MODIS 在胡焕庸线^[38]以北广大区域四季都不能有效反演气溶胶光学厚度, 而 MISR 在这些区域都能成功反演. 在胡焕庸线以南地区, MODIS 与 MISR 得到的 AOD 分布特征基本一致: 高值区都位于四川盆地(对应西南涡位置), 华中地区以及华东地区北部, 低值区都分布在内蒙古东部以及东北北部. MISR 观测还表明新疆塔里木盆地也是气溶胶光学厚度的高值区, 青藏高原东南部是低值区. 在气溶胶低值区, MODIS 和 MISR 观测的气溶胶光学厚度均低于 0.2, 差别在 0.1 以内; 在气溶胶高值区, MODIS 的观测值超过了 0.7, 部分地区可达 0.9 以上, 比 MISR 观测的 AOD 值大 0.2 左右.

图中白色代表 AOD 无值区域. 在新疆塔里木盆地以及内蒙古西部地区, MODIS 没有反演值. 这是因为这些地区是沙漠、戈壁, 地表反照率较高, MODIS 陆地气溶胶反演暗像元算法无法在 2.13 μm 通道找到

地表反照率数值在 0.01~0.25 之间的暗像元点^[39], 或者可见光波段与近红外波段地表反照率的经验关系在亮地表不成立, 因此在这些地区无法进行反演; 而 MISR 利用它的多角度信息来获取可见光波段地表反射太阳辐射的贡献, 没有假定各波段之间的关系, 可以在亮地表地区进行反演. 因此在 MODIS 无法反演的一些区域内, MISR 成功地获得了这些地区的 AOD 分布. 从 MISR 反演的图中可以看出, 塔里木盆地的 AOD 明显高于周边地区, 这主要是沙漠中沙尘气溶胶所导致的^[40,41].

从图 5 中可以看出 MODIS 观测的气溶胶光学厚度高值区基本位于四川盆地(对应西南涡位置)、华中地区、华东北部以及华北南部, 分布区域随四季变化不明显. 从量值上看, 华北南部和华东北部春夏季节比秋冬季节高出 0.2 以上, 四川盆地以及华中地区变化不明显. 在青藏高原东部, 四季的气溶胶光学厚度都相对较低, 值在 0.2 以下; 在内蒙古东部以及东北北部, 春季的气溶胶光学厚度最高, 比夏季和秋季高出 0.1 以上. AOD 无值区域冬季范围最大, 包括在新疆、青藏高原、甘肃北部、内蒙古以及东北大部分地区, 春季和秋季次之, 夏季最小, 仅在新疆南部、甘肃北部、内蒙古西部以及青海北部小部分区域. 这可能是因为冬季植被覆盖较小^[42], 且有积雪存在使地表反照率增加, 从而导致 MODIS 在这些地区无法进行反演.

图 6 可以看出, MISR 观测的气溶胶光学厚度的高值区分布与 MODIS 基本一样, 且随四季变化也不明显. 从量值大小上看有明显的季节变化, 塔里木盆地春季 AOD 在 0.5~0.7 之间, 夏季在 0.4~0.5 之间, 秋冬季节在 0.3 以下. 这可能是因为塔里木盆地在春夏两季起沙比较频繁, 秋冬相对较少. 在华中以及华东北部, 气溶胶光学厚度在夏季最大, 可达 0.7 以上, 春季和秋季, 在 0.5 左右; 冬季最小, 在 0.3~0.4 之间. 这一地区主要是人为气溶胶, 且受东亚季风活动影响较大, 气溶胶季节变化的原因可能是由于夏季对流活动多, 有利于低层气溶胶向上传输, 且温度和湿度较高有利于气-粒转化, 同时夏季水汽充足, 气溶胶吸湿后散射效率增强^[43], 从而导致夏季气溶胶光学厚度较高. 冬季由于受北方干洁冬季风的影响较大, 扩散条件非常好, 从而导致气溶胶光学厚度较低. 在青藏高原、甘肃、内蒙古以及东北地区秋冬季节气溶胶光学厚度在 0.2 以下, 而在春季和夏季, 青藏高

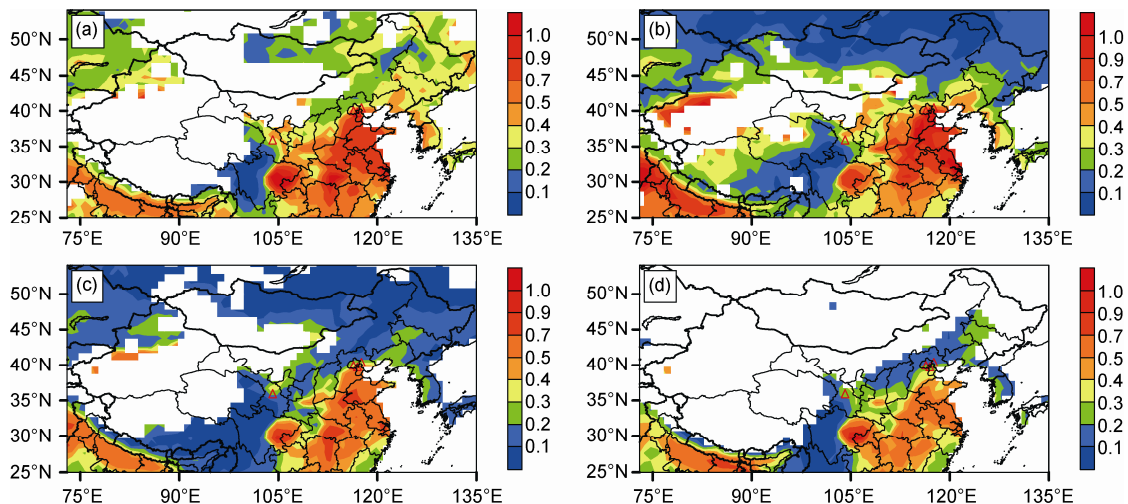


图5 2006~2009年MODIS气溶胶光学厚度(550 nm)的季节平均分布

白色部分为无值区域,红色三角是AERONET站所在的位置.(a)春季(MAM);(b)夏季(JJA);(c)秋季(SON);(d)冬季(DJF),下同

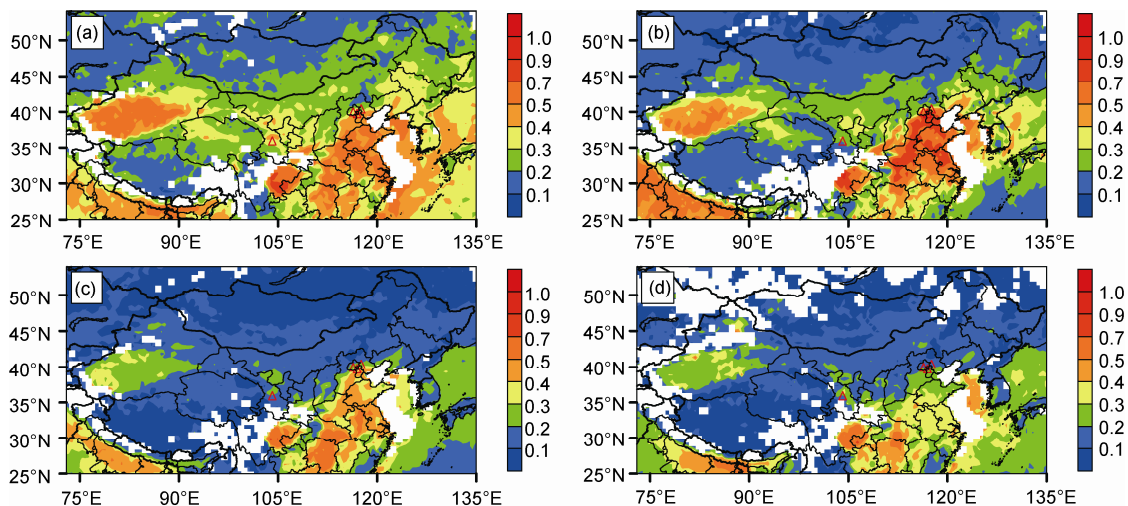


图6 2006~2009年MISR气溶胶光学厚度(550 nm)的季节平均分布

原北部、甘肃、内蒙古中西部以及东北南部地区在0.3左右,部分地区更高.

3.2 2006~2009年MODIS和MISR Angstrom指数季节平均分布特征

图7和8给出的是2006~2009年MODIS和MISR的Angstrom指数的季节平均分布.从图中可以看出MODIS的Angstrom指数高值区都主要分布在西南地区东部、华中西南部、华东南部、内蒙古东部以及东北东部,Angstrom值在1.4左右,部分地区可达1.6,即这些地区的气溶胶以小粒子为主;低值区主要分布在新疆北部、青藏高原西部、宁夏以及内蒙古中部,

在0.6左右,即这些地区的气溶胶以大粒子为主.MISR Angstrom指数高值区主要分布在内蒙古东部和东北地区,在1.4左右;低值区主要分布在塔里木盆地和内蒙古西部,大小为0.5左右.MODIS和MISR的Angstrom指数低值区位于塔克拉玛干沙漠和腾格里沙漠的区域,这一区域主要为沙尘气溶胶,粒子半径较大.而在Angstrom高值区,基本是人类生产生活发达的中东部,以人为气溶胶为主.

图7中MODIS观测的Angstrom值基本在夏季最大,秋季高于春季,冬季值最小.即夏秋季节气溶胶粒子较小,冬春季节气溶胶粒子较大.在华中地区,华东北部以及华北南部,夏季Angstrom值在1.2左右,

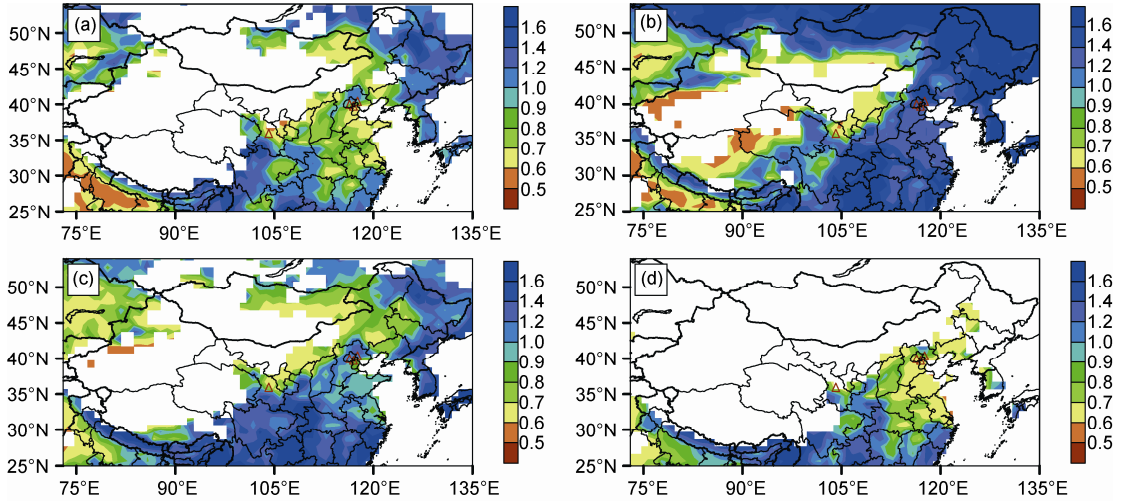


图7 2006~2009年 MODIS Angstrom 指数的季节平均分布
(a) 春季(MAM); (b) 夏季(JJA); (c) 秋季(SON); (d) 冬季(DJF), 下同

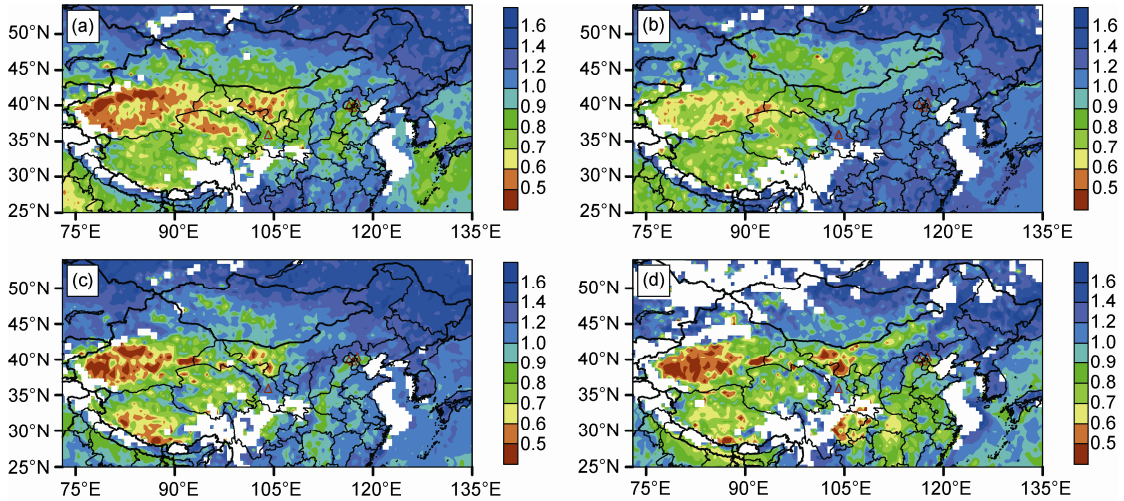


图8 2006~2009年 MISR Angstrom 指数的季节平均分布

秋季为 1.0, 春季下降到 0.8, 冬季最低, 在 0.7 以下, 对应图 5 气溶胶光学厚度的分布, 可以看出尽管夏季的 AOD 值较大, 但 Angstrom 值说明这些气溶胶粒子半径相对都较小, 因此我们可以进一步推断夏季由于季风带来的降水将低层粒子半径较大的气溶胶清除出了大气, 而通过大气垂直运动将更多半径较小的粒子留在了对流层上层大气^[44], 并且夏季气-粒转化较强, 二次人为气溶胶增多, 导致 Angstrom 指数较大。

在图 8 塔里木盆地, MISR 观测的 Angstrom 值在夏季最大, 平均在 0.7 左右, 春季、秋季和冬季基本都在 0.6 以下, 季节变化不明显, 结合图 6 的气溶胶

光学厚度分布, 可以看出尽管夏季塔克拉玛干沙漠的沙尘气溶胶光学厚度很大, 但这些沙尘与春季比, 粒子半径相对较小, 从而说明夏季塔克拉玛干沙漠中的辐射热对流^[45]只能维持半径相对较小粒子悬浮在大气中, 而冬春季节的大风可以将粒子半径更大的沙尘卷入大气。在青藏高原西南部, Angstrom 值在秋季最小, 在 0.6 左右; 在青海西北部, Angstrom 值在春季最小, 在 0.5 左右; 在华中、华东北部以及华北南部, Angstrom 在冬季最小, 在 0.8 左右, 春季和秋季次之, 夏季最大, 在 1.2 左右。在内蒙古东部以及东北地区, Angstrom 值基本都在 1.2 左右, 无明显的季节变化。

在华中、华北南部、华东北部, MODIS 和 MISR 观测的 Angstrom 值都为冬春季较小, 夏秋季最大, 即这些地区冬春比夏秋季节的气溶胶粒子偏大. 这可能是因为冬季和春季风沙天气较多并影响到这些地区, 而沙尘气溶胶是大粒子, 从而导致冬季和春季的 Angstrom 值较小, 而夏季受季风带来的降水等作用影响, 粒子半径较小.

4 结论

通过 MODIS, MISR 卫星与地面 AERONET 观测气溶胶光学厚度 AOD 的比较, 发现在 SACOL 站和北京站, MISR 观测的气溶胶光学厚度要优于 MODIS; 在香河站和兴隆站, MODIS 观测的气溶胶光学厚度优于 MISR. 在 4 个站点, MISR 观测的 Angstrom 与地面一致性更好, MISR 观测的 Angstrom 值与地面的相对误差为 14%, 而 MODIS 与地面 Angstrom 值的相对误差为 30%, MISR 观测的 Angstrom 值与地面一致性更好.

在胡焕庸线以北广大地区 MODIS 四季都不能很

好地反演 AOD 值, 而 MISR 在这些区域可以较好地反演. MODIS 和 MISR 观测的我国大部气溶胶光学厚度的分布的高值区位于新疆塔里木盆地、四川盆地、华中地区以及华东地区北部, 低值区都分布在青藏高原东部, 内蒙古东部以及东北北部. 在二者都有反演值的高值区, MODIS 的 AOD 比 MISR 大 0.2 左右, 低值区二者差别在 0.1 以内. 高值区域的位置分布随四季无明显变化, 但在量值上有明显的季节变化, 塔里木盆地的 AOD 在春季达到最大, 而华北南部和华东北部地区 AOD 值在夏季最大.

由 MODIS 观测得到的 Angstrom 指数分布特征显示, 在西南地区东部、华中西南部、东北东部、内蒙古东部以及华东南部气溶胶以小粒子为主; 在内蒙古中部、宁夏、新疆北部、塔里木盆地、青藏高原西部等地, 以大粒子为主. MISR 的观测结果显示, 在内蒙古东部和东北地区, 以小粒子为主; 在塔里木盆地和内蒙古、甘肃西部, 以大粒子为主, 有效粒子半径春季最大, 夏季最小. 在华北南部、华中以及华东北部, 冬春季节气溶胶粒子较大, 夏季粒子较小.

致谢 感谢北京、香河和兴隆站陈洪滨研究员、王普才研究员及其团队成员对 AERONET 站点的建立、维护和数据提供. 感谢 NASA 大气数据中心和 Goddard 中心提供 MISR/MODIS 卫星资料.

参考文献

- 1 卢广献, 郭玉良. 环北京春季大气气溶胶分布、来源及其与 CCN 转化关系的飞机探测. 科学通报, 2012, 57: 1334–1344
- 2 Andrews E, Ogren J A, Bonasoni P, et al. Climatology of aerosol radiative properties in the free troposphere. Atmos Res, 2011, 102: 365–393
- 3 Huang J, Wang Y, Wang T, et al. Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia. Prog Nat Sci, 2006, 16: 1084–1089
- 4 Huang J, Lin B, Minnis P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia. Geophys Res Lett, 2006, 33, doi: 10.1029/2006GL026561
- 5 Huang J, Minnis P, Lin B, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES. Geophys Res Lett, 2006, 33: L06824
- 6 Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. Science, 2001, 294: 2119–2124
- 7 Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. Rev Geophys, 2000, 38: 513–543
- 8 Abdou W A, Diner D J, Martonchik J V, et al. Comparison of coincident multiangle imaging spectroradiometer and moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol optical depths over land and ocean scenes containing aerosol robotic network sites. J Geophys Res, 2005, 110, doi: 10.1029/2004JD004693
- 9 Salomonson V V, Barnes W L, Maymon P W, et al. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the earth as a system. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1989, 27: 145–153
- 10 Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, et al. Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR)—Instrument description and experiment overview. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1998, 36: 1072–1087
- 11 Xiao N, Shi T, Calder C A, et al. Spatial characteristics of the difference between MISR and MODIS aerosol optical depth retrievals over mainland Southeast Asia. Remote Sens Environ, 2009, 113: 1–9
- 12 Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. Remote Sens Environ, 1998, 66: 1–16

- 13 Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, doi: 10.1029/2001GL013205
- 14 夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高. *科学通报*, 2006, 51: 2297–2303
- 15 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性. *科学通报*, 2007, 52: 477–486
- 16 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. *应用气象学报*, 2009, 20: 147–156
- 17 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊): 127–135
- 18 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. *科学通报*, 2003, 48: 2094–2100
- 19 朱爱华, 李成才, 刘桂青, 等. 北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用. *环境科学学报*, 2004, 24: 86–90
- 20 陈本清, 杨燕明. 台湾海峡及周边海区 MODIS 气溶胶光学厚度有效性验证. *海洋学报*, 2005, 27: 172–178
- 21 董海鹰, 刘毅, 管兆勇. MODIS 遥感中国近海气溶胶光学厚度的检验分析. *南京气象学院学报*, 2007, 30: 328–337
- 22 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 Geophys Res*, 2007, 112, doi: 10.1029/2007JD008474
- 23 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 Geophys Res*, 2007, 112, doi: 10.1029/2007JD008479
- 24 Diner D J, Abdou W A, Bruegge C J, et al. MISR aerosol optical depth retrievals over southern Africa during the SAFARI-2000 dry season campaign. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 3127–3130
- 25 Liu Y, Sarnat J A, Coull B A, et al. Validation of multiangle imaging spectroradiometer (MISR) aerosol optical thickness measurements using aerosol robotic network (AERONET) observations over the contiguous United States. *J Geophys Res*, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JD003981
- 26 Martonchik J V, Diner D J, Kahn R, et al. Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi: 10.1029/2004GL019807
- 27 Christopher S A, Wang J. Intercomparison between multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) and sunphotometer aerosol optical thickness in dust source regions over China: Implications for satellite aerosol retrievals and radiative forcing calculations. *Tellus Ser B*, 2004, 56: 451–456
- 28 Ge J M, Su J, Ackerman T P, et al. Dust aerosol optical properties retrieval and radiative forcing over northwestern China during the 2008 China-U.S. joint field experiment. *J Geophys Res*, 2010, 115, doi: 10.1029/1009JD013263
- 29 Kahn R A, Gaitley B J, Martonchik J V, et al. Multiangle imaging spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident aerosol robotic network (AERONET) observations. *J Geophys Res*, 2005, 110, doi: 10.1029/2004JD004706
- 30 Kahn R A, Gaitley B J, Garay M J, et al. Multiangle Imaging spectroradiometer global aerosol product assessment by comparison with the aerosol robotic network. *J Geophys Res*, 2010, 115, doi: 10.1029/2010JD014601
- 31 Liu J, Xia X, Li Z, et al. Validation of multi-angle imaging spectroradiometer aerosol products in China. *Tellus Ser B*, 2010, 62: 117–124
- 32 张莹, 孙照渤. 中国中东部 MODIS 与 MISR 气溶胶光学厚度的对比. *气象科学*, 2010, 30: 48–54
- 33 Ge J M, Su J, Fu Q, et al. Dust aerosol forward scattering effects on ground-based aerosol optical depth retrievals. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2011, 112: 310–319
- 34 Xia X A, Chen H B, Wang P C. Validation of MODIS aerosol retrievals and evaluation of potential cloud contamination in East Asia. *J Environ Sci*, 2004, 16: 832–837
- 35 Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25: 1–16
- 36 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 Geophys Res*, 1999, 104: 31333–31349
- 37 Bi J R, Huang J P, Fu Q, et al. Toward characterization of the aerosol optical properties over Loess Plateau of northwestern China. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2011, 112: 346–360
- 38 胡焕庸. 中国人口的分布、区划和展望. *地理学报*, 1990, 45: 139–145
- 39 Remer L, Kaufman Y, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products and validation. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 947–973
- 40 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究. *中国沙漠*, 2006, 26: 389–393
- 41 Huang J P, Minnis P, Yi Y H, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, doi: 10.1029/2007GL029938
- 42 柳艺博, 居为民, 陈镜明, 等. 2000~2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征. *科学通报*, 2012, 57: 1435–1445
- 43 Xia X, Chen H, Wang P, et al. Variation of column-integrated aerosol properties in a Chinese urban region. *J Geophys Res*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JD006203
- 44 段婧, 毛节泰. 华北地区气溶胶对区域降水的影响. *科学通报*, 2008, 53: 2947–2955
- 45 Huang J, Minnis P, Yan H, et al. Dust aerosol effect on semiarid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10: 6863–6872