

doi:10.13866/j.azr.2014.05.15

我国北方 TOMS 气溶胶光学厚度与地面 沙尘天气频数的比较^①

任霄玉^{1,2}, 任国玉², 魏明建¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心 北京 100081)

摘要: 利用卫星监测和反演沙尘天气频率或沙尘气溶胶光学厚度, 检验卫星监测和反演结果是否与地面观测一致。采用地面观测记录获得全部沙尘天气事件频数(DF)资料, 对 1979—2002 年 TOMS(臭氧总量绘图系统)反演的气溶胶光学厚度指数(AI)进行检验分析。结果表明:① AI 高值区基本与我国北方地面观测的沙尘天气频数高值分布区一致, 两者均在我国西北部极端干旱的盆地和高原地区出现最高值, 相对低值一般分布在气候湿润的东部地区, 但东北平原和华北平原 AI 值相对较高, 冬季尤其明显, 与地面沙尘观测差异很大;② AI 和 DF 年内变化也具有很高的一致性, 均在春季最大, 4 月达到峰值以后减小, 但前者在冬季 12 月和 1 月出现次高值, 而后者冬季为全年低谷;③ 相关性分析表明, AI 和 DF 相关系数一般在夏季最大, 冬季最小, 年和季节的相关系数具有随时间呈下降的趋势;④ TOMS AI 数据在反映我国北方沙尘天气频数时空变化特征方面, 区域上西北干旱区效果最好, 东部季风区的华北和东北较差; 季节上夏季、初秋和春季较好, 冬季效果较差。同时还对 AI 和 DF 资料时空分布差异的可能原因及其潜在应用意义进行了讨论。

关键词: TOMS(臭氧总量绘图系统); 气溶胶; 光学厚度; 沙尘天气; 时空分布; 北方地区; 中国

沙尘天气是我国北方干旱、半干旱地区经常发生的低能见度天气现象。频繁的冷空气和气旋活动是引起我国北方春季沙尘天气频繁发生的直接原因^[1-6], 而大范围气候变暖及其由此引起的中纬度地带大气环流纬向性加强、径向性减弱、近地面平均风速和大风频率减小、降水量增多, 则构成了我国北方最近半个世纪沙尘天气发生频率下降的气候背景^[1,7-9]。沙尘天气现象传统上利用地面气象站网通过瞬时风速和能见度来进行观测及分析^[4,10], 或者通过卫星遥感技术监测单一沙尘天气过程。近年来, 卫星遥感由于其较高的空间覆盖率, 成为沙尘监测和研究中不可或缺的技术, 得到广泛应用。卫星遥感技术可采用近红外或可见光以外光谱探测器反演沙尘气溶胶光学厚度。1999 年 12 月发射的 EOS-Terra 卫星以及 2002 年初发射的 Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器, 已被用来监测和反演陆地气溶胶的光学厚度^[11-12], 并通过地面不同的气溶胶性质来区分气溶胶类型。

利用卫星监测和反演沙尘天气频率或沙尘气溶

胶光学厚度, 一个关键的问题是监测和反演结果是否与观测一致, 是否能够明确反映实际的沙尘天气发生频率的时空特征。地球观测科学计划(earth observation science, EOS)的 Terra 卫星平台搭载的多角度成像光谱仪(multi-angle imaging spectra radiometer, MISR), 通过云筛选等算法反演覆盖陆地和水域的大气中气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD), 没有区分沙尘气溶胶、生物燃烧气溶胶、火山灰以及当地产生的烟雾, 陆地反演结果较水上好一些, 但在区分气溶胶类型上还需要改进^[13]。Gonzalez 等^[14]通过将 ERS-2/ESA 反演的欧洲气溶胶资料与模式计算结果对比, 得到两者监测结果具有可互补的结论。Levy 等^[15]比较了 AERONET 中的 AOD 以及搭载在 CLAMS 卫星上的 MODIS 传感器反演的海陆气溶胶数据, 发现两者在海洋的相关性较好, 误差在允许范围内, 但在陆地的相关性没有达到预期。

美国国家航空航天局(NASA)利用 Nimbus 和地球探测器 EPtoms 卫星遥感资料搭载的臭氧总量

① 收稿日期: 2013-11-27; 修订日期: 2014-02-24
基金项目: 国家公益性行业专项(GYHY201206012)和北京市自然科学基金重点项目(KZ201210028034)共同资助
作者简介: 任霄玉(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为第四纪地质专业。E-mail: 714195363@qq.com
通讯作者: 任国玉。E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

绘图系统(total ozone mapping spectrometer, TOMS), 通过近紫外射线的方法, 反演获得一套几乎覆盖全球海洋和陆地的沙尘及碳质气溶胶光学厚度指数(AI)长序列资料集。Torres 等^[16]曾比较了这套数据集与气溶胶自动观测网(AERONET)的分析结果, 发现在不同气溶胶类型占主导的区域中, 该数据集基本能够再现实际的气溶胶含量, 但不同地区反演效果差异比较明显。迄今, 已有一些研究者利用这套资料或其他卫星资料, 分析了中国部分区域和特定时段沙尘气溶胶时空分布规律, 并和实际观测的沙尘气溶胶资料进行了比较^[17-27], 发现 TOMS 在西北地区反演结果较好, 但在东部沿海等区域可能由于黑碳气溶胶影响结果不太理想。对于我国北方地区, 这套卫星资料在多大程度上能代表实际的沙尘天气发生频率的时空分布特征, 目前还没有开展系统研究。

本文利用 TOMS 光学厚度长序列资料, 以及同期地面气象站观测获得的沙尘天气日数记录, 比较分析中国北方卫星反演光学厚度与沙尘天气频率的时间和空间分布特征, 希望进一步了解 TOMS 反演数据在代表中国北方沙尘气溶胶方面的可靠性, 为进一步改进卫星反演技术和利用卫星资料分析我国北方沙尘天气频率和沙尘气溶胶光学厚度时空分布规律提供科学依据。

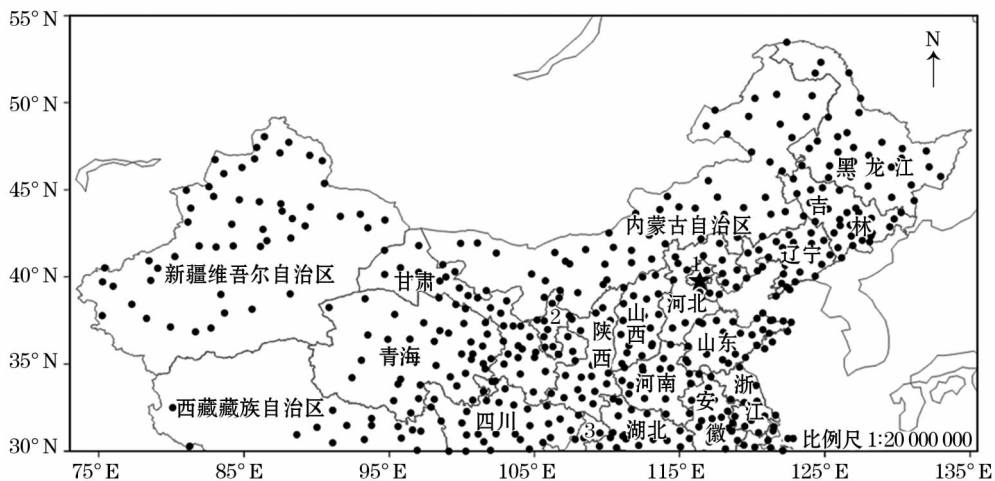
1 资料和方法

卫星资料来自于 NASANimbus 7 (1979—1992

年)和地球探测器(Earth-Probe)(1996—2005年)上搭载的 TOMS 逐日气溶胶光学厚度长序列资料集。由于航天器故障, 1994 年和 1995 年资料缺失, 2000 年资料存在严重质量问题, 因此, 在 2 套资料的处理过程中, 用多年逐月平均值代替缺失的 2 a 资料和 2000 年的资料。

沙尘天气地面观测资料来源于中国气象局国家气象信息中心的国家基准、基本站逐月沙尘日数数据集, 时间长度为 1954—2002 年。这套数据包括逐月浮尘日数、扬沙日数和沙尘暴日数。本文利用该数据集中北方地区 495 个站点观测资料(图 1)。由于浮尘、扬沙和沙尘暴天气均可造成大气沙尘气溶胶含量或光学厚度上升, 能见度下降, 取 3 种天气事件发生日数的总和, 称沙尘天气频数(DF), 与卫星资料比较。北方地区是指我国 30°N 以北区域(图 1)。

卫星反演资料为 1979—2005 年 1.25°×1°网格点逐日光学厚度, 而站点沙尘天气频数观测资料则为 1954—2002 年的逐月统计结果, 统一取 1979—2002 年为研究时段, 并将站点观测资料转换成与卫星资料相同尺寸和格式的网格点资料。采用简单算术平均方法分别统计 2 套资料的逐年月、季和年的要素值, 然后计算整个时期多年平均月、季、年要素值。利用相关系数方法对 2 套资料序列做月、季、年的相关性分析。四季划分采用气候学定义, 即春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季则为 12 月至翌年 2 月。年是指一年的 12 个月。



1 代表北京市, 五角星代表北京站位置; 2 代表宁夏回族自治区; 3 代表重庆市。

图 1 研究区范围及其地面气象观测站点分布

Fig. 1 The study area and the distribution of meteorological stations

2 结果分析与讨论

图 2 给出了 1979—2002 年多年平均 TOM AI 和地面沙尘天气频数的空间分布情况。高值区的分布基本一致,均位于南疆盆地和内蒙古西部。地面观测资料的高值区域还包括青藏高原北部地区。在其他地区,2 套资料的差别较大,主要表现在 DF 的次高值区分布范围很小,局限于内蒙古中西部和南疆盆地外围地区;而 AI 次高值区位于更广大的区域,能够代表大气背景值的区域范围很小,主要在川、青、藏交界地带。 AI 分布在华北平原和东北平原形成明显的相对高值区域,达到 0.5~0.6,略低于内蒙古高原西部。造成两者空间分布不一致的原因,可能是卫星资料不仅反映了沙尘气溶胶,还包含碳质气溶胶的影响,是沙尘和碳质气溶胶的综合作用产物^[16]。东部地区特别是华北平原和东北平原等地区,人类排放的碳质气溶胶浓度高,致使 AI 呈现出相对高值。

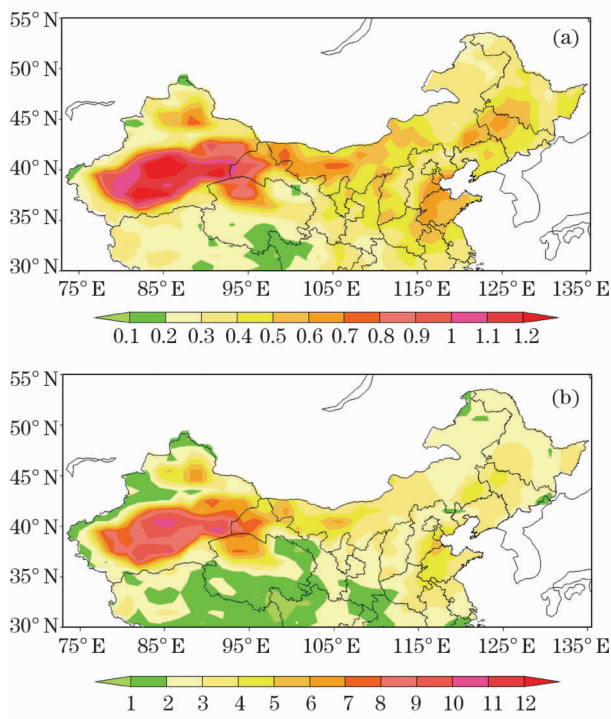


图 2 1979—2002 年多年平均 TOMS 气溶胶光学厚度 (AI) (a) 和地面观测沙尘天气频数 (DF) (b) 的空间分布
Fig. 2 Annual optical depth index of aerosols (a) and spatial distribution of frequency of dust weather (b) during the period of 1979 - 2002

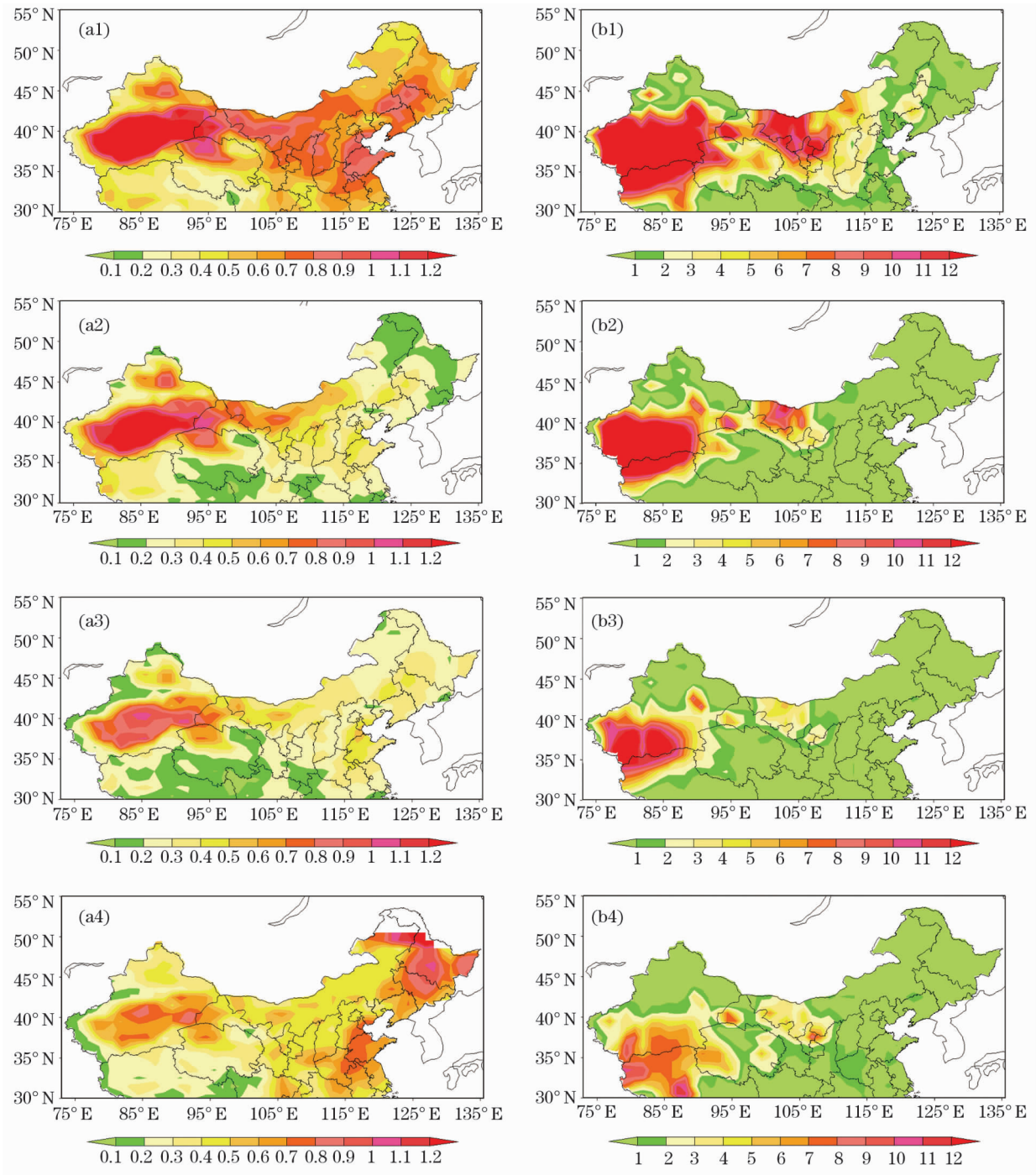
由图 3 可以看出,春季是我国北方沙尘天气现象最频繁的季节,总体上看,1979—2002 年四季

TOMS AI 指数和 DF 的高值和低值分布基本一致,高值均位于南疆盆地及其甘肃西部、青海柴达木盆地等极端干旱地区, AI 值在 0.8 以上, DF 值一般在 9 d 以上。西部地区存在一些微小差异,主要包括 AI 的高值范围一般比 DF 要小,在塔里木盆地周边没有延伸到北部的天山山脉和南部的昆仑山脉,内蒙古西部分布也比较狭窄,且量值比高值区要小得多。造成这一差异的原因可能与地形等因素有关。 AI 指示卫星传感器感应的整个大气柱内沙尘气溶胶厚度,在盆地区域较大,山地和高原区域较小;而地面观测仪记录近地表的大气能见度和沙尘天气现象,在高山和高原区域仍然会有较低的能见度和较频繁的沙尘天气,但沙尘物质可能仅集中在近地面较薄的大气层,卫星探测的气溶胶光学厚度可能不大。同样,内蒙古西部的差异可能也与高原地形导致的 AI 值相对较小有关。

在北方的东部地区,两者差异比较大。 AI 值在内蒙古中东部、东北西部和华北大部特别是山东半岛等地也较高,达到 0.5 以上,个别地区甚至超过 0.8。 DF 的较高值区位于内蒙古中部、黄土高原、科尔沁沙地及其南部,而 AI 的较高值分布范围要大得多,且量值也较 DF 大,几乎涵盖了东部所有地区,一般在 0.3 以上。形成这一差异的原因一个是地形影响,东北平原和华北平原等区域一般气溶胶光学厚度比较大;另一个原因可能是东部人口密集,城市较多,经济相对发达,区域人类活动排放的碳质气溶胶数量大,导致 AI 值偏高。因此,东部地区 TOMS AI 资料用来反映沙尘气溶胶浓度和沙尘天气频率具有较大偏差。

夏季 AI 和 DF 空间分布与春季有相似性,两者高低值分布态势的差异是所有季节中最小的,具有较高的一致性。高值区仍均位于西部的干旱盆地和高原,东部和东南部数值较小。卫星资料在东部的平原和黄土高原地区仍维持次高值,仅东北北部、青海南部、四川西北部以及青藏高原东北部等小部分地区接近大气背景区域, AI 值很小,而 DF 值在季风区域都很小。这个差异主要与季风区夏季处于雨季,地面沙尘发生频率很低,但人类排放的碳质气溶胶仍然比较多,致使东部平原和半干旱区 AI 值仍旧偏高。

从秋季平均 AI 和 DF 空间分布看,2 套资料高值区域均呈明显的减小趋势。 DF 分布与夏季相似,高值区域范围甚至比夏季还小。 AI 高值区域范围缩



a1 ~ a4 和 b1 ~ b4 分别代表 AI 和 DF 春、夏、秋、冬四季平均值。

图3 1979—2002 年四季 TOMS 气溶胶光学厚度 (AI) (a) 和地面观测沙尘天气频数 (DF) (b) 的空间分布

Fig. 3 Seasonal optical depth index of aerosols(a) and spatial distribution of frequency of dust weather(b) during the period of 1979 – 2002

小不明显,但减小趋势比 *DF* 大。两者次高值区范围也呈减小趋势,低值区域范围增大。*DF* 次高值区基本位于南疆盆地周边地区以及内蒙古西部,而 *AI* 次高值区分布较 *DF* 广泛,包括准噶尔盆地、内蒙古高原、东北平原、青海西北部、黄土高原以及东部沿海地区,可能与东南部人类排放的碳质气溶胶有关。

冬季平均 *AI* 值和 *DF* 值空间分布的差异最大。*AI* 高值区移至东北北部,华北平原也是相对高值区,而 *DF* 的高值区则南移至青藏高原北部和塔里木盆地南部。冬季卫星资料和地面沙尘天气频率资料几乎相反的空间分布格局,可能与季节性取暖燃煤排放更多的碳质气溶胶有关,也与东北地区近地

面大气强烈发展的逆温层等因素有联系。这表明, AI 在冬季难以用来代表沙尘天气频率, 也难以表征大气里沙尘气溶胶浓度或光学厚度。

就整个北方地区来看(图 4), 沙尘天气的频发季节为春季, 因此, DF 值从 2 月开始明显增大, 4 月达到最高, 平均达 4.5 d, 此后连续下降, 最低值出现在秋冬季节。 AI 高值月份也出现在春季, 同样 4 月最高, 4 月和 5 月 AI 值均超过 0.5, 但最低值发生在

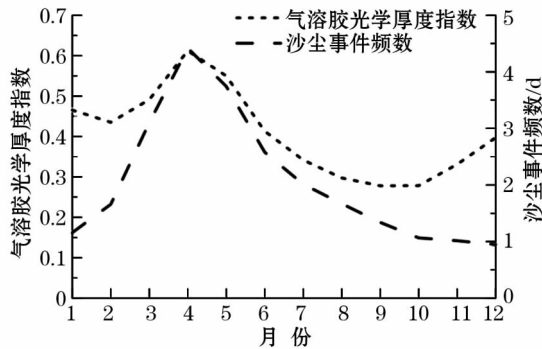
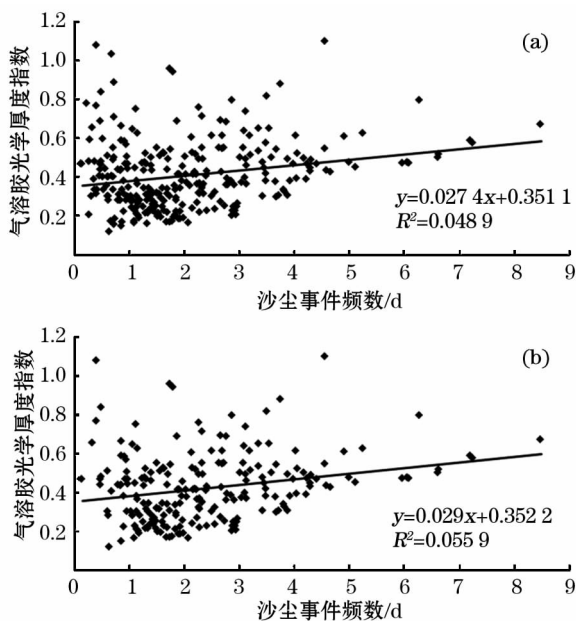


图 4 1979—2002 年北方地区月平均气溶胶光学厚度 (AI) 和地面观测沙尘天气频数 (DF) 的年内变化
Fig. 4 Monthly optical depth index of aerosols and monthly frequency of dust weather in north China during the period of 1979 - 2002



(a) 全年所有月; (b) 除冬季(12、1、2月)外其余月份。
图 5 1979—2002 年北方地区 TOMS 气溶胶光学厚度 (AI) 和地面观测沙尘天气频数 (DF) 月均值散点图
Fig. 5 Scatter diagram of monthly optical depth index of aerosols and monthly frequency of dust weather in north China during the period of 1979 - 2002

秋季, 冬季则是除春季外 AI 值的次高峰。可见, 除冬季外, 我国北方地区月平均 AI 和 DF 值年内变化具有较好的一致性。冬季 AI 值的相对峰值可能是东部区域人类活动排放大量碳质气溶胶, 造成卫星反演结果异常偏高。

由图 5 可以看到, 两者在沙尘天气频数高的月份关系较好, 而在沙尘频数低的月份分布较分散, 关系比较差; 另一个特点是, 在 AI 值偏小的月份, 两者关系常常很好, 而在 AI 值较大的月份, 两者关系较差。由于沙尘发生频次高的月份一般在春季和夏季, 此时东部地区碳质气溶胶浓度较低, 因此 AI 和 DF 关系较好; AI 值较高的情形在东部主要出现在冬季, 此时 DF 值很低, 是造成两者关系不佳的主要原因。

总体上看, 各月平均 AI 和 DF 之间存在显著正相关关系, T -检验均达到 0.01 的显著性水平。不考虑冬季的 12、1、2 月, 两者的正相关性有所增加(图 5b), 在一定程度上说明由于冬季东部地区碳质气溶胶排放等原因, 削弱了 TOMS 气溶胶光学厚度与地面观测沙尘天气频数的对应关系。图 6 给出了北方地区各月沙尘天气频数与 AI 值的相关系数年内变化情况。春季虽为沙尘天气的高发季节, 但两者相关系数并不是最高的, 4—5 月高于 0.3, 未通过 0.05 的显著性水平检验。相关系数最高季节在夏季和初秋, 7—9 月均在 0.4 以上, 通过了 0.05 的显著性水平检验。冬季特别是 12 月和 1 月相关系数最低, 没有通过显著性水平检验。总体上, 月平均 AI 和 DF 的相关性比预期的要小, AI 值在春季、夏季和秋季大致可以反映沙尘天气事件频率的时空变化, 但与地面气象观测的沙尘天气还有一定差异。造成这种现象的原因, 可能与地面观测站点比较稀疏以及地面观测仅局限于近地表很浅大气层次有关, 也与沙尘天气定义比较严格, 没有包括部分地区和季节程度较轻、但频数很高的大气含尘现象有关。

由图 7 可见, 多数年份, 特别是 20 世纪 80 年代早、中期和 90 年代中期以后, AI 和 DF 之间的相关系数较高, 达到 0.30 以上, 通过了 0.01 显著性水平检验。逐年相关系数总体呈下降趋势, 这与人为碳质气溶胶排放增加, AI 值越来越受到人类活动干预的事实相符。20 世纪 80 年代后期和 90 年代初期, 两者关系最差, 多数年份没有通过统计显著性检验, 可能与我国北方甚至全球尺度大气“变暗”现象有

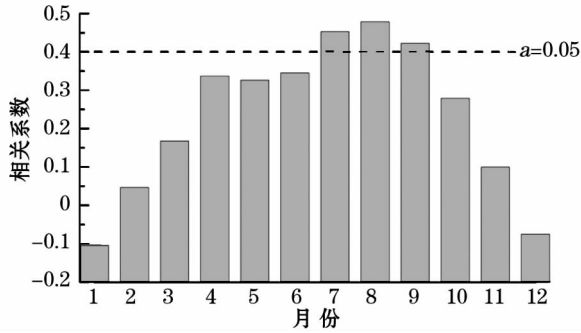


图6 1979—2002年北方地区沙尘天气频数与卫星资料AI值的逐月相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between frequency of dust weather and optical depth index of aerosols in north China during the period of 1979 - 2002

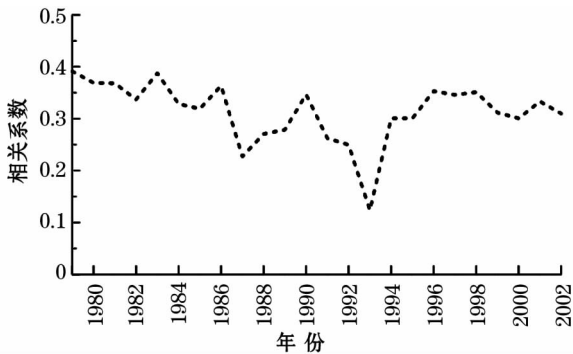


图7 1979—2002年北方地区沙尘天气频数与卫星资料AI值相关系数逐年变化

Fig. 7 Annual change of correlation coefficients between frequency of dust weather and optical depth index of aerosols in north China during the period of 1979 - 2002

关^[28-30]。1993年相关系数出现明显的低谷,可能与卫星的转换有关,也可能与1991年皮纳图博火山喷发^[31]的后续影响有关,需要进一步调查。值得说明的是,在资料处理过程中,发现2000年的AI和DF相关系数接近0,根据年内变化规律分析判断,应该是当年卫星数据有误,因此,本文用多年平均值代替2000年的月平均AI值。

3 结论

利用1979—2002年美国NASA TOMS反演的AI资料及其中国地面观测的逐月沙尘日数资料,比较分析了卫星反演沙尘气溶胶及碳质气溶胶光学厚度与地面沙尘天气频数的时空分布特征,得到以下结论:

(1) AI高值区与DF高值区分布一致,尤其在中国西北部极端干旱区,两者对应很好;相对低值区

主要分布在东部地区,但东北平原和华北平原的AI值明显高于DF值,且AI高值分布范围大于DF,这种情况在冬季尤为明显。造成分布不一致的原因可能是受东部平原地区碳质气溶胶排放的影响。

(2) 春、夏季,2套资料高值区均分布在南疆盆地及其甘肃西部、青海柴达木盆地等气候干燥地区,空间分布特征基本一致,但北方地区的东部AI次高值区范围大于DF;秋季,2套资料高值区域范围明显减小,AI高值区的减小趋势比DF大;冬季2套资料高低值空间分布差异较大,AI高值区移至东北北部,华北地区也是相对高值区;而DF的高值区移至青藏高原北部、塔里木盆地南部。

(3) 就整个北方地区的年内变化来看,DF与AI高值均出现在春季以及初夏季节,最高在4月和5月;DF的低值出现在秋、冬季,但AI最低值发生在秋季,冬季是除春季外的次高峰。因此,除冬季外,北方地区月均AI和DF值年内变化具有较好的一致性。

(4) 北方地区DF与AI值的月相关只在夏季和初秋通过了0.05的显著性检验,春季的相关性也较高,冬季相关最差。总体来看,两者相关性要比预期的小,AI值在春、夏、秋季大致可以反映地面沙尘天气事件频数的时空变化特征,但与地面观测仍有较大的不一致性。

(5) 2套资料的逐年相关系数年际变化总体表现出下降趋势,这与人为碳质气溶胶排放增加的事实相符,其年代变化也与大气“变暗”和“变亮”的观测事实基本一致。

综上所述,TOMS反演的AI资料与地面观测的沙尘天气频数资料各自均有优缺点。AI资料的不足主要是卫星转换等造成的资料序列时间非均一性和不完整性,也难以完全分离自然沙尘气溶胶和人为碳质气溶胶,但能够反映出从地面到大气高层整层气柱的光学厚度;而地面观测的主要缺陷是对轻度和高频的沙尘天气现象没有记录,也无法反映近地面层以上整个气柱的气溶胶浓度和分布情况,但大体反映了与人类活动关系密切的地面附近空气质量,并具有连续的较长时间序列。合理使用两类观测资料,对于沙尘天气气候研究和业务具有现实意义。

参考文献(References):

- [1] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513-521. [Ye

- Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyan, et al. Causes of sand-stormy weather in northern China and control measures [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 513 - 521.]
- [2] 吴晓京, 陆均天, 张晓虎, 等. 2001 年春季沙尘天气分析 [J]. *国土资源遥感*, 2001, 13(3): 8 - 10, 24 - 25. [Wu Xiaojing, Lu Juntian, Zhang Xiaohu, et al. Synoptic analysis on the sand-dust storm in spring, 2001 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2001, 13(3): 8 - 10, 24 - 25.]
- [3] 方翔, 郑新江, 陆均天, 等. 2002 年春季北京沙尘天气成因及源地分析 [J]. *国土资源遥感*, 2002, 14(4): 17 - 22. [Fang Xiang, Zheng Xinjiang, Lu Juntian, et al. Origin and source region of the dust storm in fluencing Beijing in spring of 2002 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2002, 14(4): 17 - 22.]
- [4] 陆均天, 邹旭恺, 王锦贵, 等. 近 3 年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析 [J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 107 - 113. [Lu Juntian, Zou Xukai, Wang Jingui, et al. Analyses of the causes for frequent dust weather occurred in China during the last three years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 107 - 113.]
- [5] 韩忠辉, 郑军. 我国北方地区沙尘天气的起因及预防 [J]. *林业勘查设计*, 2010, 30(4): 58 - 59. [Han Zhonghui, Zheng Jun. The causes and prevention measures of sand-dust weather of Northern China [J]. *Forestry Prospect and Design*, 2010, 30(4): 58 - 59.]
- [6] 薛占金, 秦作栋, 孟宪文, 等. 2010 年 3 月我国沙尘天气的若干特征 [J]. *干旱区研究*, 2011, 28(4): 694 - 698. [Xue Zhanjin, Qin Zuodong, Meng Xianwen, et al. Characteristics of sandstorm weather in China in march 2010 [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(4): 694 - 698.]
- [7] 张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频发演化及其气候成因分析 [J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 744 - 750. [Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storm frequency and the climatic controls in Northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 744 - 750.]
- [8] 孟猛, 宗美娟. 中国 20 世纪干旱化趋势分析 [J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 705 - 712. [Meng Meng, Zong Meijuan. Study on aridity trend in China in 20th century [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 705 - 712.]
- [9] 朱晓炜, 杨建玲, 崔洋, 等. 1961—2009 年西北地区东部降水时空分布及成因 [J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 1 094 - 1 099. [Zhu Xiaowei, Yang Jianling, Cui Yang, et al. The spatial and temporal distribution of the precipitation in the east of northwest China from 1961 to 2009 [J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(6): 1 094 - 1 099.]
- [10] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中国北方沙尘暴研究的若干进展 [J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(增刊): 1 - 8. [Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao, et al. Some advances in dust storm researchs in Northern China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(Suppl.): 1 - 8.]
- [11] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C. et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *Geophysical Research Letter*, 2002, 29(12): MOD2 - 1 - MOD2 - 4.
- [12] Levy R C, Remer L A, Oleg D. Global aerosol optical properties and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D13210).
- [13] Martonchik J V, Diner D J, Crean K A, et al. Regional aerosol retrieval results from MISR [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(7): 1 520 - 1 531.
- [14] Gonzalez C Robles, Schaap M, de Leeuw G, et al. Spatial variation of aerosol properties over Europe derived from satellite observations and comparison with model calculations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3: 521 - 533.
- [15] Levy R C, Remer L A, Martins J V, et al. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over Ocean and land during CLAMS [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences-Special Section*, 2005, 62: 974 - 992.
- [16] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D14): 17 099 - 17 110.
- [17] Li Chengcai, Mao Jietai, Kai-Hon Alexis Lau, 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): 2 488 - 2 495.
- [18] 张鹏, 石广玉. 从反射太阳光谱反演大气气溶胶体积谱分布的理论研究 [J]. *气象学报*, 2003, 61(1): 85 - 94. [Zhang Peng, Shi Guangyu. The theoretic study on the retrieval of aerosols' volume distribution from solar spectral reflectance [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(1): 85 - 94.]
- [19] Xu Jin, Bergin M H, Liu X Y, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(2): 161 - 173.
- [20] David G Streets, Carolyne Yu, Ye Wu, et al. Aerosol trends over China, 1980 - 2000 [J]. *Atmospheric Research*, 2008, 88(2): 174 - 182.
- [21] Wen Mi, Zhanqing Li, Xiangao Xia, et al. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22S08).
- [22] Lin I-I, Chen Jenping, George T F, et al. Aerosol input to the South China Sea; Results from the moderate resolution imaging spectroradiometer, the quick scatterometer, and the measurements of pollution in the troposphere sensor [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(14/15): 1 589 - 1 601.
- [23] 申彦波, 王标, 石广玉. 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 290 - 298. [Shen Yanbo, Wang Biao, Shi Guangyu. Aerosol optical depth and dusty weather over Eastern China seas in spring of 2006 [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(3): 290 - 298.]
- [24] 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 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 86 - 90. [Zhu Aihua, Li Chengcai, Liu Guiqing, et al. Validation and application of MODIS remote aerosol information in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1): 86 - 90.]
- [25] 黄珏, 陈晓玲, 田礼乔, 等. 渤海海域 CALIOP 与 MODIS 气溶胶光学厚度相关性分析 [J]. *海洋科学*, 2013, 37(1): 113 - 118. [Huang Jue, Chen Xiaoling, Tian Liqiao, et al. Correlational research on aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS/Aqua over the Bohai Sea [J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(1): 113 -

118.]
- [26] 郑新江,陈渭民,方翔,等. 利用 NOAA 卫星资料估算陆地沙尘量的方法[J]. 国土资源遥感,2008,20(2):35-38. [Zheng Xinjiang, Chen Weimin, Fang Xiang, et al. A method for estimating the amount of air borne sand over the land[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008, 20(2):35-38.]
- [27] 吴序鹏,杨军,车慧正,等. 塔克拉玛干沙漠地区气溶胶光学厚度卫星遥感产品验证[J]. 气候与环境研究,2012,17(2):149-159. [Wu Xupeng, Yang Jun, Che Huizheng, et al. Verification for the satellite remote sensing products of aerosol optical depth in Taklimakan desert area[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(2):149-159.]
- [28] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47:1 006 - 1 016.
- [29] 申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能气候效应的最新研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(9):915-923. [Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(9):915-923.]
- [30] You Q L, Sanchez-Lorenzo A, Wild M, et al. Decadal variation of surface solar radiation in the Tibetan Plateau from observations, re-analysis and model simulations [J]. Climate Dynamics, 2013, 40(7/8):2 073 - 2 086.
- [31] 陈洪滨,吕达仁,许丽生. 利用 SAGE II 资料分析皮纳图博火山爆发前后平流层气溶胶的变化特征[J]. 科学通报,1994,39(22):2 084 - 2 087. [Chen Hongbin, Lv Daren, Xu Lisheng. Using the SAGE II to analyze the variation of stratospheric aerosol before and after Pinatubo eruption[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(22):2 084 - 2 087.]

Comparison between TOMS Optical Depth Index of Aerosol and Dust Weather Frequency in North China

REN Xiao-yu^{1,2}, REN Guo-yu², WEI Ming-jian¹

(1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Open Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: It is necessary to examine whether the satellite monitoring results are consistent with the ground-based observations if satellite data are used in studying dust weather frequency (*DF*) or dust aerosol optical thickness. In this paper, the dust weather frequency data from the ground-based observations and the values of aerosol optical thickness index (*AI*) from TOMS for the time period of 1979-2002 were analyzed. The results are as follows: ① The areas with high *AI* value were basically consistent with those with high *DF* value in north China, these areas were located in the extremely arid basins and plateaus in northwest China; the areas with low value were generally distributed in humid east China except the Northeast Plain and North China Plain where the *AI* value was relatively high, especially in winter; ② Change of monthly *AI* and *DF* values was highly consistent, the highest *AI* and *DF* values occurred in spring, the second highest *AI* values occurred in December and next January; ③ The correlation coefficient between *AI* and *DF* was generally the highest in summer but lowest in winter; ④ The TOMS *AI* data could be used to ideally reflect the spatiotemporal patterns of *DF* in arid northwest China but poorly in north China and northeast China.

Key words: TOMS; aerosol; optical depth; dust weather; spatiotemporal distribution; north China