

长三角地区颗粒物浓度时空分布特征

蔡 垚¹, 董文韬², 孙飞飞¹

¹贵州省榕江县气象局, 贵州 榕江

²贵州省黔东南州气象局, 贵州 凯里

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年3月17日; 发布日期: 2022年3月23日

摘 要

本文利用2017年中分辨率成像光谱仪MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)资料研究了长三角地区气溶胶光学厚度(AOD)、细粒子比例(FMF)、大气柱的颗粒物浓度(CMC)的时空分布特征, 并利用上述资料计算了地面处PM_{2.5}质量浓度。结果表明, 长三角地区AOD平均为0.5, 表现出南低北高的分布特征, 其中, 武汉、南昌、合肥、南京、杭州、上海为高值区, 杭州以南地区为低值区; AOD表现出明显的季节变化特征, 整体变化为南低北高的分布特征, 其中, 6月最大, 12月最小。FMF平均为0.6, 高低值交叉分布, 高值区在长江中下游地区, 低值区在上海、江苏、安徽中部和江西中部; FMF春、秋、冬季为“北低南高”, 夏季为“北高南低”, 其中, 最大月为2月, 最小月为5月。长三角地区CMC平均为30, 表现为北高南低的分布特征, 武汉、南昌、合肥三个地区之间相互连接, 成为北部柱质量浓度高值区, 其他地区为低值区; CMC的季节变化呈北高南低的分布, 夏半年略高于冬半年, 其最大月和最小月分别为6月、12月。长三角地区PM_{2.5}平均为40, 表现为北高南低的分布特征, 其中, 高值主要分布在上海、江苏、安徽北部、武汉、南昌地区, 低值主要分布在六安、长江中下游地区; PM_{2.5}具有明显季节变化, 夏秋两季低于冬春两季。通过对比计算的PM_{2.5}与地面监测PM_{2.5}质量浓度, 发现两者的相关系数平均值为0.69。

关键词

大气气溶胶, 气溶胶光学厚度, PM_{2.5}

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Particulate Matter Concentration in the Yangtze River Delta

Yao Cai¹, Wentao Dong², Feifei Sun¹

¹Rongjiang Meteorological Bureau of Guizhou Province, Rongjiang Guizhou

²Qiandongnan Meteorological Bureau of Guizhou Province, Kaili Guizhou

Abstract

This paper uses the data of the MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) in 2017 to study the temporal and spatial distribution characteristics of aerosol optical depth (AOD), fine particle fraction (FMF), and atmospheric particle concentration (CMC) in the Yangtze River Delta region. And using the above data to calculate the mass concentration of PM_{2.5} on the ground, the results show that the average AOD in the Yangtze River Delta is 0.5, showing the distribution characteristics of low in the south and high in the north. Among them, Wuhan, Nanchang, Hefei, Nanjing, Hangzhou, and Shanghai are high-value areas, and the area south of Hangzhou is low-value areas. AOD shows obvious seasonal changes, the overall change is low in the south and high in the north. Among them, June is the largest and December is the smallest. The average FMF is 0.6, and the high and low values are cross-distributed. The high-value areas are in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the low-value areas are in Shanghai, Jiangsu, central Anhui, and central Jiangxi; FMF spring, autumn, and winter are “low north and high south”, and summer is “high north and low south”. Among them, the largest month is February and the smallest month is May. The average CMC in the Yangtze River Delta is 30, which is characterized by high north and low south. The three regions of Wuhan, Nanchang, and Hefei are connected to each other and become the high-value area of the northern column mass concentration, and the other areas are low-value areas. The seasonal variation of CMC is high in the north and low in the south. The summer half of the year is slightly higher than the winter half of the year. The maximum and minimum months are June and December, respectively. The average PM_{2.5} in the Yangtze River Delta is 40, which is characterized by high north and low south. Among them, the high values are mainly distributed in Shanghai, Jiangsu, northern Anhui, Wuhan, and Nanchang, and the low values are mainly distributed in Lu’an and the middle and lower reaches of the Yangtze River. PM_{2.5} has obvious seasonal changes, and summer and autumn are lower than winter and spring. By comparing the calculated mass concentration of PM_{2.5} and ground monitoring PM_{2.5}, it is found that the average correlation coefficient between the two is 0.69.

Keywords

Atmospheric Aerosol, Aerosol Optical Depth, PM_{2.5}

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气气溶胶是指由粒径、形状各异的固态或液态微粒组成，悬浮在大气中的复杂混合物[1]。当大气气溶胶浓度超过环境可接纳的范围，就会造成一定程度的空气污染。近年来，长三角地区各工业中心城市发展迅速，由于燃料结构不合理，污染物排放处理不到位，使得气溶胶颗粒物的污染最为突出，严重影响着人类的生存环境[1]。气溶胶分布在时间、空间上有明显的无规律变化。在地面环境观测网络中由于观测站点空间分布不均，不能很好地得到三维空间信息，难以说明颗粒物的变化趋势和分布特征[2] [3]。

地球观测系统计划(EOS)是美国国家宇航局(NASA)建立的一个旨在对全球变化进行观测研究的综合计划，包括发射一系列先进的卫星系统，对太阳辐射、大气、海洋和陆地进行全面综合的整体观测。Terra

和 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)覆盖空间非常地广阔, 为反演气溶胶和地表特征在空间上提供了有效的信息[4] [5]。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)是利用 MODIS 得到的数据产品, 主要是在垂直方向上描述气溶胶浓度[6], 反映了大气颗粒物的吸收和散射特性。在卫星遥感监测中, 大气污染可利用卫星遥感数据 AOD 反演颗粒物浓度, 从侧面体现空气污染的严重程度[5] [7]。

本文利用 MODIS 遥感数据产品提供的卫星资料去计算地面颗粒物浓度, 考虑到相对湿度和边界层厚度两方面对气溶胶光学厚度(AOD)的影响, 逐步对气溶胶光学厚度进行相对湿度和边界层厚度订正后, 与空气污染指数 $PM_{2.5}$ 的浓度做对比分析, 从而证实 MODIS 气溶胶遥感产品在城市大气污染 $PM_{2.5}$ 质量浓度监测方面有重要应用价值, 得出经过订正后气溶胶厚度和 $PM_{2.5}$ 之间的拟合关系, 分析长三角地区颗粒物浓度时空分布特征。

2. 研究方法

2.1. 数据来源

本文利用 2016 年 12 月至 2017 年 12 月美国 EOS/MODIS 反演的气溶胶光学厚度(AOD)数据资料, 研究区域为长三角地区的南京、杭州、上海、合肥、武汉、南昌等 6 个地面气象观测点(北纬 $26^{\circ}\sim 36^{\circ}$, 东经 $114^{\circ}\sim 124^{\circ}$)。边界层高度和相对湿度的数据资料来源于 Merra2 数据网站, 地面监测 $PM_{2.5}$ 数据资料为环保部数据中心获取的长三角地区 $PM_{2.5}$ 污染物的每日监测数据通过计算后得出的月平均值。

2.2. $PM_{2.5}$ 转化方法

利用卫星观测获得的气溶胶光学厚度(AOD)推算 $PM_{2.5}$ 遥感方法: 首先利用细粒子比例(FMF)计算来自 AOD 的精细模式气溶胶光学厚度、根据细颗粒的柱状消光体积比(VE_f)计算细颗粒体积; 再利用行星边界层高度(PBLH)和相对湿度(RH)来对 AOD 进行订正; 最后, 利用细颗粒的密度 $\rho_{f,dry}$, 由颗粒体积来计算地面的干燥 $PM_{2.5}$ 。具体反演算法参照 Ying Zhang 等[2]。通过利用已有的数据资料, $PM_{2.5}$ 的最终计算公式为:

$$PM_{2.5} = AOD \frac{FMF \cdot VE_f \cdot \rho_{f,dry}}{PBLH \cdot f_0(RH)} \quad (1)$$

其中, $\rho_{f,dry}$ 的值取 1, 由于气溶胶颗粒的光学性质取决于颗粒大小和颗粒组成, 由于公式(1)是针对美国地区取的各个参数, 因此针对长三角地区, 故从 FMF 中提取 VE_f 有:

$$VE_f = 0.2021FMF^2 - 0.4663FMF + 0.356 \quad (0.1 \leq FMF \leq 1.0) \quad (2)$$

$$f_0(RH) = \left[a \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^{-b} \right]^3 \quad (3)$$

在公式(1)中, $PM_{2.5}$ 是空气动力学直径小于 2.5 的地面附近的干燥颗粒的质量浓度; 气溶胶光学厚度(AOD)定义为介质的消光系数在垂直方向上的总积分, 与之相关的是气溶胶消光系数的垂直分布和气溶胶总浓度, AOD 没有单位; 细粒子比例(FMF)是细粒气溶胶光学厚度与总柱气溶胶消光(AOD)的比率; 柱状体积消光比(VE_f)是柱状颗粒体积与细粒气溶胶光学厚度的比值, 单位为 $\mu m^3/\mu m^2$; 边界层高度(PBLH)是指行星边界层的高度, 以 km 为单位; $f_0(RH)$ 为光学吸水增长函数, a 和 b 是吸湿增长函数的参数; 相对湿度(RH)是指空气中水汽压与相同温度下饱和水汽压的百分比, 是接近地面大气的相对湿度。另外, 需要注意的是, 在计算过程中, 大气柱的颗粒物质量浓度(CMC)的单位要进行除以 1000 的处理, 才能得到统一的单位($\mu g/m^3$)以便与监测数据进行对比。

3. 结果与分析

3.1. 气溶胶光学厚度(AOD)时空分布

3.1.1. 气溶胶光学厚度(AOD)的整体分布及月变化

图 1 为 2017 年长三角地区 AOD 分布图,部分地区由于降雨天气较多、有效数据较少而表现为空白。从图中可以明显看出其分布:长三角地区 AOD 的值处于 0.9 以下,平均为 0.5,表现出南低北高的分布特征。在北纬 34°~36°及北纬 30°附近,局部地区 AOD 存在高值。在长三角南部地区,存在一个明显高于周围地区的倒型区域,在这个区域,武汉、南昌、合肥的 AOD 极大值分别为 1.4、1.1、1.4。江苏省与上海市其 AOD 均在 0.7 以上,尤其在江苏省北部的连云港出现 AOD 最大值 1.5,上海东部 AOD 最大值 1.3。浙江以南绝大部分地区 AOD 的值低于 0.5, AOD 最小值 0.1。因此可得出, AOD 的最大值一般分布在经济发展迅速的城市地区,其工业发展造成污染导致 AOD 的值变大,而对于经济稍微落后的郊区及农村其 AOD 的值相对较小。长三角地区 AOD 的年变化很大,差值为 1.4。

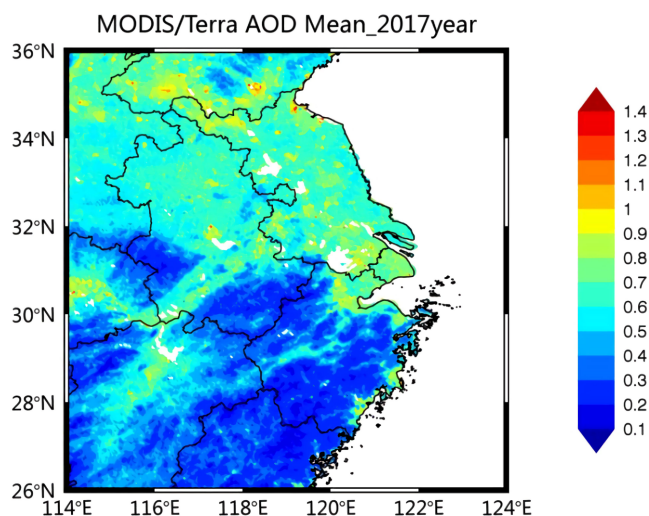


Figure 1. Distribution of AOD in the Yangtze River Delta in 2017

图 1. 2017 年长三角地区 AOD 的分布

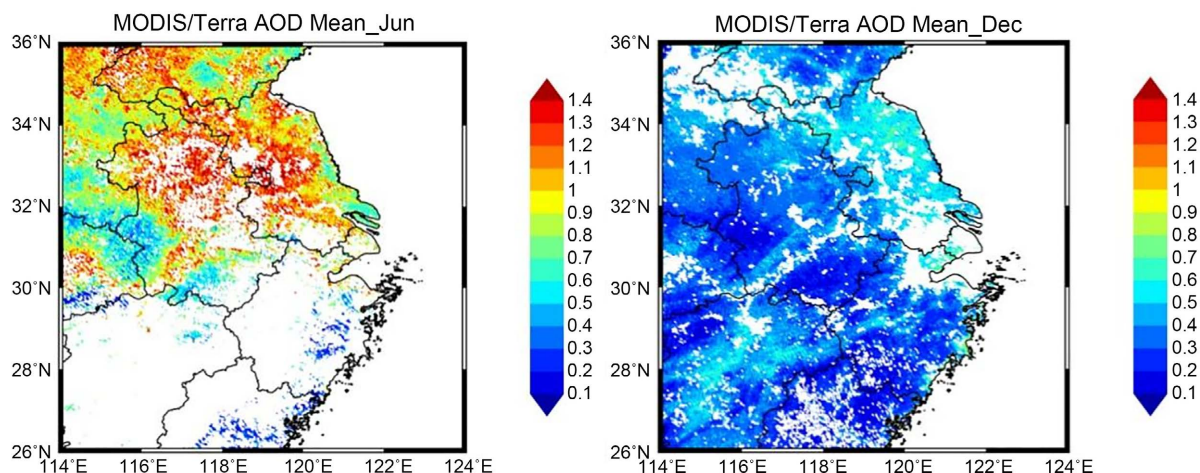


Figure 2. Distribution of AOD in maximum month and minimum month

图 2. AOD 在最大月和最小月的分布

图 2 为 AOD 在最大月和最小月的分布，可以得出，在 2017 年长三角地区 AOD 的月平均变化非常明显，最大值出现在 6 月，均在 0.8 以上，最小值为 12 月，均在 0.6 以下，主要表现为浅蓝色和深蓝色。总体来看，AOD 在月变化中具有明显的周期性，呈双峰型分布。1 月 AOD 为低值，自 2 月至 6 月 AOD 逐渐增加，6 月达到最大值，7~9 月 AOD 逐渐降低，在 10 月出现 AOD 较 9、11 月的高值，11~12 月 AOD 越来越小。夏半年的 AOD 明显高于冬半年，可以推断观测对直径较小的细颗粒物敏感性较高，夏半年的高温高湿的天气条件有利于 AOD 产生高值。

3.1.2. 气溶胶光学厚度(AOD)的季节变化

将 MODIS 卫星遥感空间分辨率为 10 km 的 AOD 资料数据按季节进行划分和比较。四个季节的划分方式为：春季为 3~5 月；夏季为 6~8 月；秋季为 9~11 月；冬季为 2016 年 12 月~2017 年 2 月。

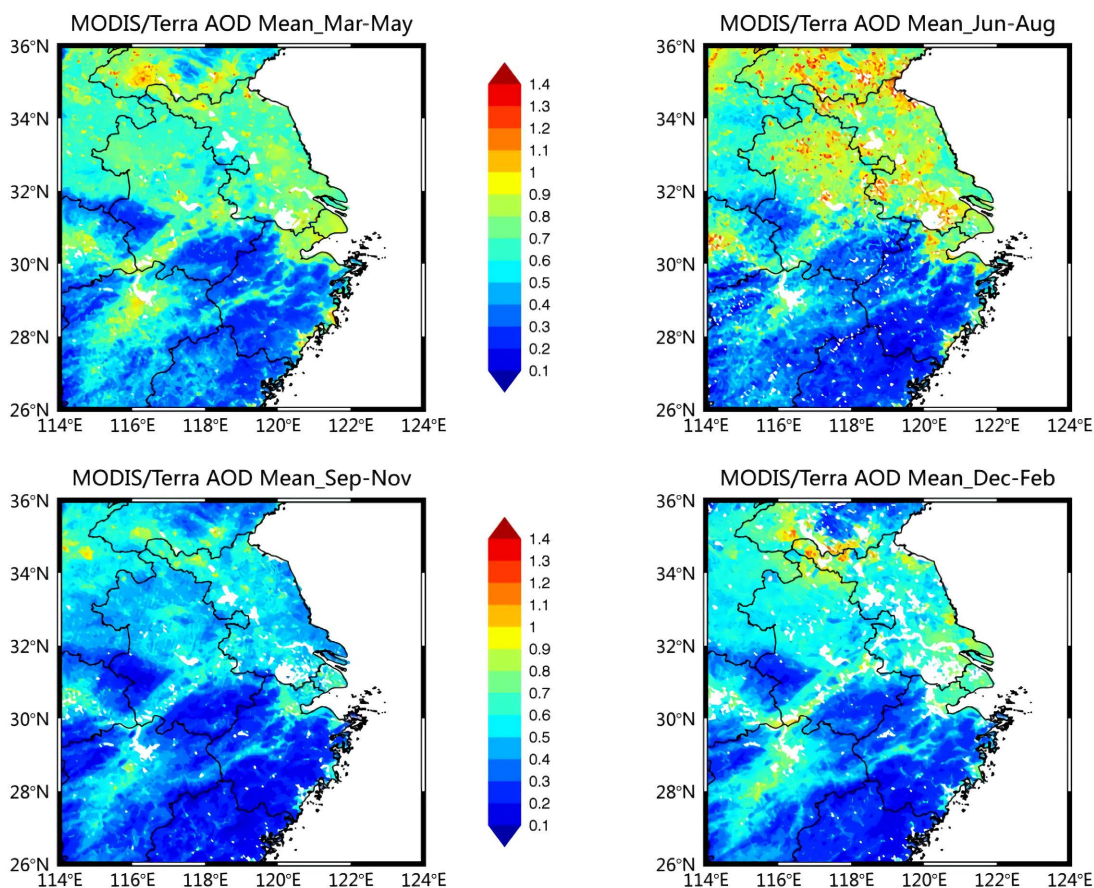


Figure 3. Distribution of quarterly average AOD in the Yangtze River Delta region in 2017

图 3. 2017 年长三角地区季度平均 AOD 的分布

由图 3 可看出：AOD 具有明显的季节变化，整体变化为“南低北高”的分布特征。春季，长三角以北大部地区 AOD 的值在 0.7 以上，其以南地区 AOD 为低值 0.4；夏季，长三角以北地区 AOD 有最大值 1.5 且分布较广，其以南地区仍为 AOD 低值；秋、冬季出现大幅度的下降，长三角地区 AOD 均低于 0.6，最小值为 0.1，秋季较冬季的值较小。春季多阴雨天气，夏季天气干燥，少部分地区受来自北方沙尘暴、扬尘等天气现象影响会造成一次 PM_{2.5} 污染，同时受季风及副热带高压影响，导致 AOD 较高。秋、冬两季的 AOD 较低是因为这段期间天气变化主要受冷空气控制，冷空气由北向南移动，冷空气中的污染浓度

较低, 形成稳静状态后会造造成细颗粒堆积, 不易扩散, 使得 AOD 小。可得出春、夏的 AOD 较秋、冬两季的高。而夏季的 AOD 比春季的较高, 可能因为在长三角地区夏季高温高湿, 受到强烈光照影响及梅雨等降水天气影响, 使得气溶胶在地面生成二次 $PM_{2.5}$, 进行“气-粒”转化等光化学反应, 最终表现为 AOD 存在高值。

3.2. 细粒子比例(FMF)的时空分布

3.2.1. 细粒子比例(FMF)的整体分布及月变化

从图 4 中看出, 长三角地区中部(北纬 $28^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 范围内)有突出的 FMF 高值区, 平均为 0.6。长三角地区的主要城市上海、南京、杭州、合肥、武汉及南昌, 其 FMF 就周边城市而言很低, 可能因为城市交通、汽车尾气排放产生的颗粒物大部分是粒径较大的粗颗粒物, 而细颗粒相对较少, 故其 FMF 为小值。就细粒子比例的年变化来说, 其取值范围为 0.1~1, 由图可得到的结果是最大值与最小值的差距很大, 有 0.9。

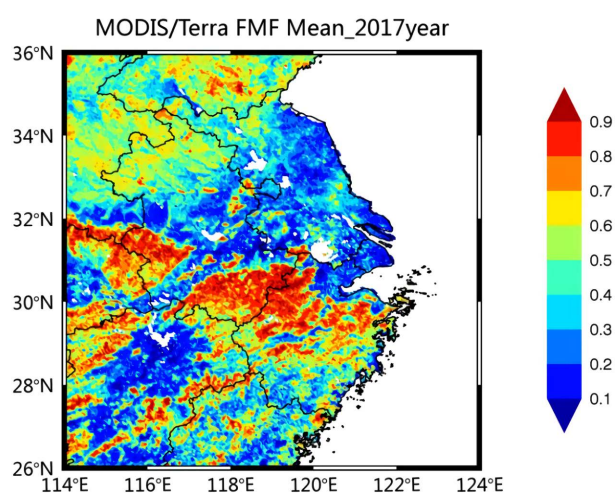


Figure 4. Distribution of FMF in the Yangtze River Delta in 2017

图 4. 2017 年长三角地区 FMF 的分布

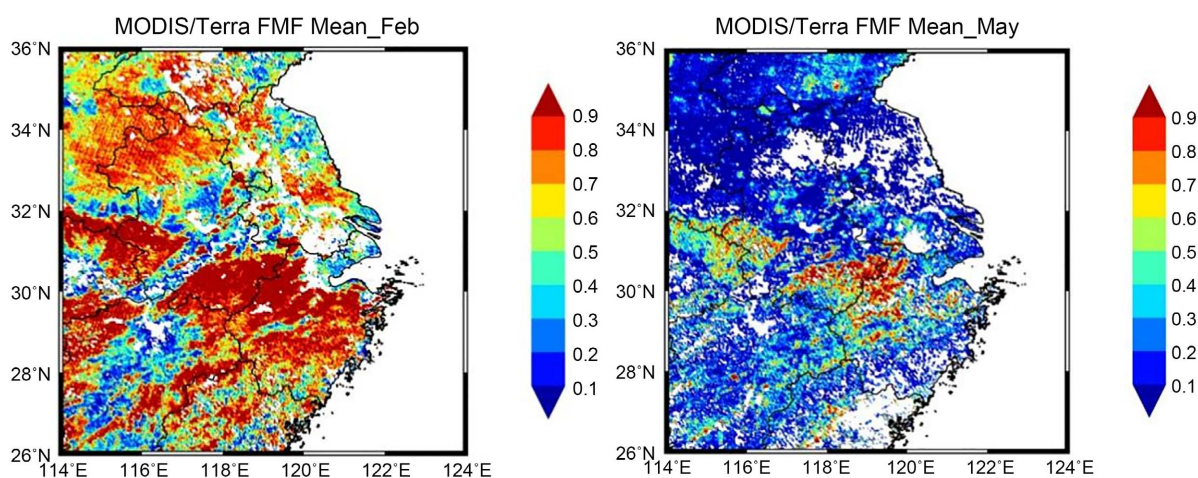


Figure 5. Distribution of FMF in maximum month and minimum month

图 5. FMF 在最大月和最小月的分布

细粒子比例(FMF)是研究颗粒物浓度的重要参量, 因此对其月变化的研究非常有必要, 图 5 是 FMF

在最大月和最小月的分布。细粒子比例最大值分布在 1~3 月、10~12 月，均达到 0.9 以上，其中 2 月为最大月，最高可达到 1。细粒子比例最小值主要在 4~5 月，最小月是 5 月，均在 0.3 以下，长江中下游有零星高值区域。1 月呈“北低南高”，2~3 月高低值相间分布，4~5 月基本为 FMF 低值，6~9 月 FMF 呈“北高南低”，10 月较 11~12 月 FMF 大，11~12 月呈高值区分布，但趋势逐渐减弱。可以推断出，由于 4、5 月阴雨天气比较多，使悬浮在地面的细粒子得以沉积下来，再加上季风影响，空气得以流通，故其细颗粒物浓度比较小，细粒子比例就小。

3.2.2. 细粒子比例(FMF)的季节变化

由图 6 可以看出，在春季，细粒子比例(FMF)高值主要集中在北纬 28°~32°，在长江中下游有零星地区呈高值，低值的分布呈“T”字型。夏季，从长三角中部至北部地区有成片 FMF 高值，江苏沿海城市及长三角南部地区为低值分布，整个长三角地区高低值相间。其中，春季到夏季整体上有非常明显的变化，即从“北低南高”转变为“北高南低”。秋季，整体上与夏季类似，但长江中部及北部地区高值区的 FMF 值明显变大，低值区 FMF 值明显变小，蚌埠、淮南、阜阳地区高低值变化最大有 0.9。冬季，长三角地区整体 FMF 高，浙江、安徽南部、湖北东部及江西四周地区细颗粒为主要的的高值区。而自江苏至安徽走向的地区，FMF 的值低。

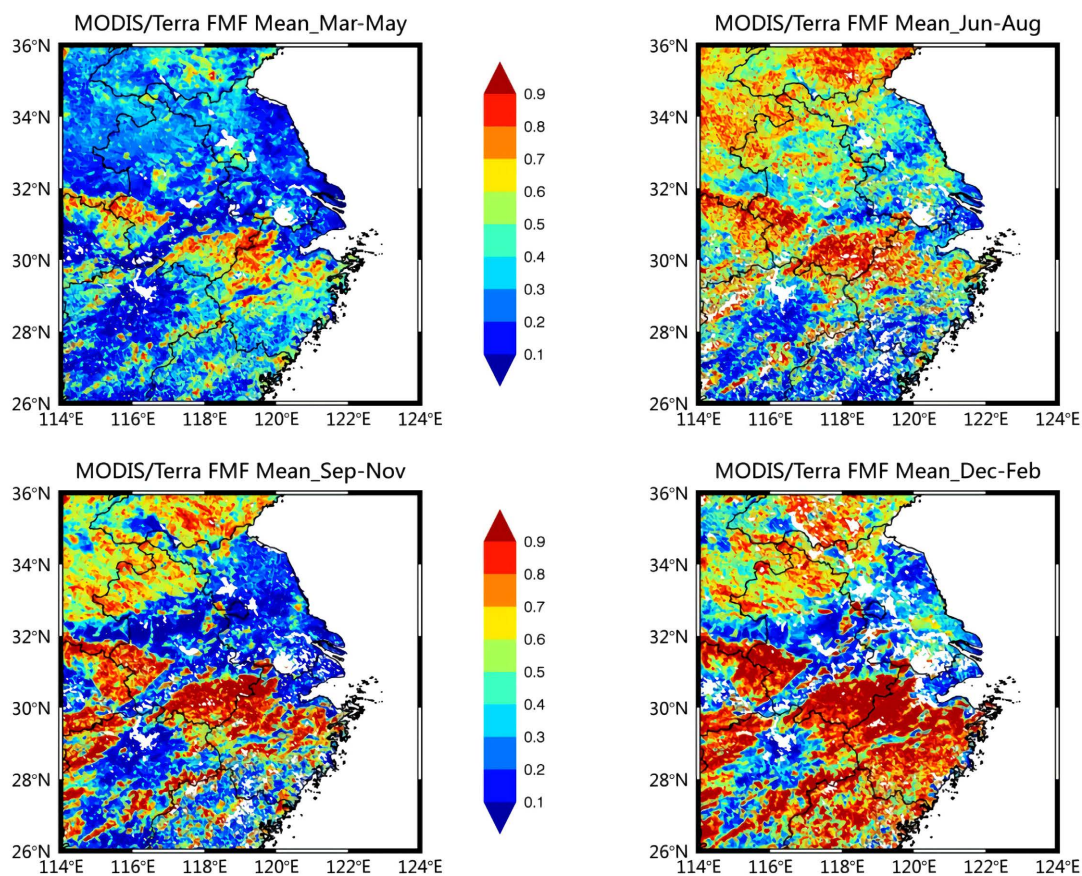


Figure 6. Distribution of seasonally averaged FMF in the Yangtze River Delta region in 2017

图 6. 2017 年长三角地区季节平均 FMF 的分布

春季与夏、秋、冬季在分布趋势上有明显的区别。春季的 FMF 是“北低南高”，而夏、秋、冬季是“北高南低”。夏、秋、冬三季在 FMF 分布上呈高值 FMF 逐渐加强、低值 FMF 先加强后减弱的趋势。

整体上来看,长三角地区的 FMF 在四季分布不均,局部地区存在零星分布的 FMF 极大值,则有春季低,冬季高。

3.3. 柱质量浓度(CMC)的时空分布

3.3.1. 柱质量浓度(CMC)的整体分布及月变化

柱质量浓度(CMC)是指单位空间里的质量浓度,其单位是 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由 2017 年长三角地区 CMC 的分布图(图 7)可以发现,CMC 年变化分布与 AOD 相似。整体来看,CMC 呈“北高南低”分布,武汉、南昌、合肥三个地区之间相互连接,存在一个相对高值区。CMC 平均值为 30,最大值为 85,最小值为 10。

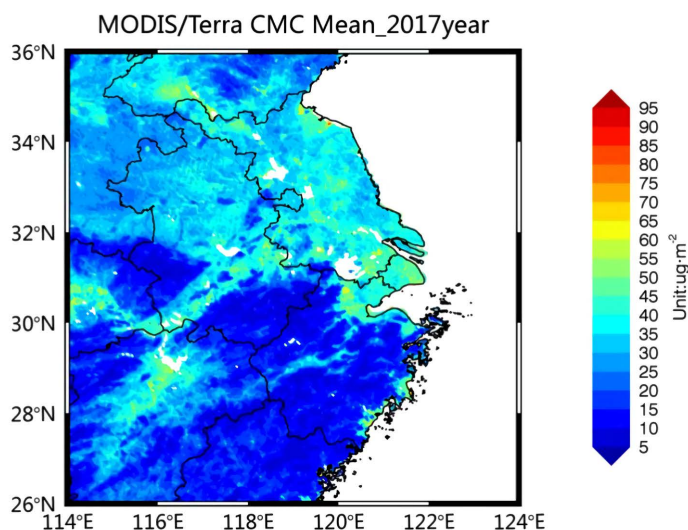


Figure 7. Distribution of CMC in the Yangtze River Delta in 2017

图 7. 2017 年长三角地区 CMC 的分布

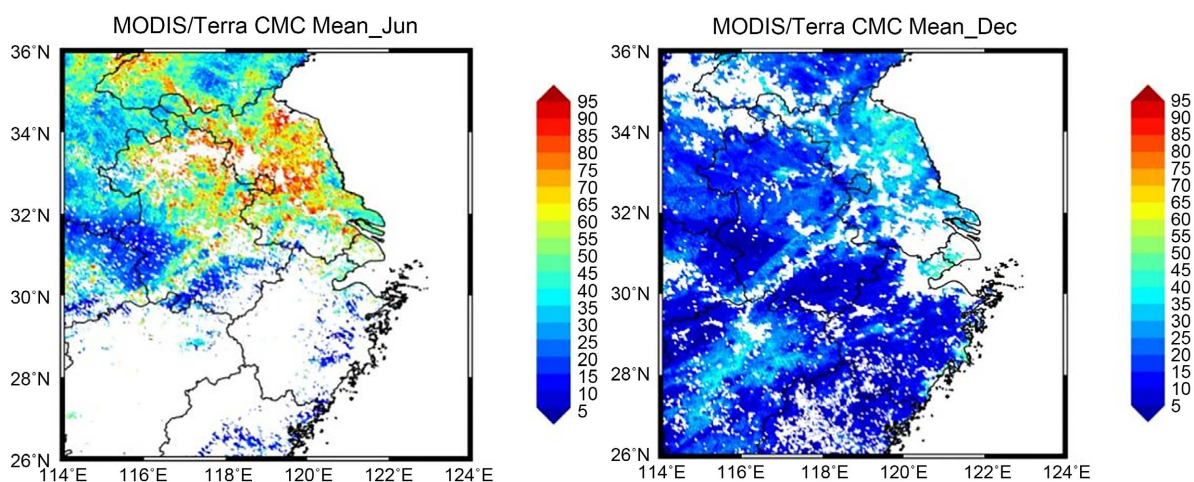


Figure 8. Distribution of CMC in maximum month and minimum month

图 8. CMC 在最大月和最小月的分布

利用 2017 年 1~12 月的 MODIS 数据产品 CMC 反演得到的长三角地区月变化分布,可得出,5、6 月的 CMC 最大,5 月呈“北高南低”,5、6 月高值均在 60 以上,最大值分别为 80、90。CMC 最小值上半年有 1、2 月,下半年有 8、9、11、12 月,CMC 表现为大范围蓝色区域(浅蓝色和深蓝色),均值为

20 左右。图 8 为 CMC 在最大月和最小月的分布，可以看出，最大月为 6 月，主要分布在江苏省扬州、泰州、徐州等地区，及安徽省滁州、蚌埠等地区，由于降水天气导致 6 月观测数据缺失严重，北纬 30° 以南地区呈现大片空白。最小月为 12 月，主要呈深蓝色，表示该月的空气质量较好。

3.3.2. 柱质量浓度(CMC)的季节变化

由图 9 可以看出柱质量浓度(CMC)季度分布的特征是：整体的 CMC 变化不大，呈“北高南低”的分布。南边武汉、南昌等地其 CMC 明显高于周围地区，北边地区 CMC 由高值向低值的趋势，但该趋势不适用于秋、冬季，秋季比冬季的 CMC 略低。

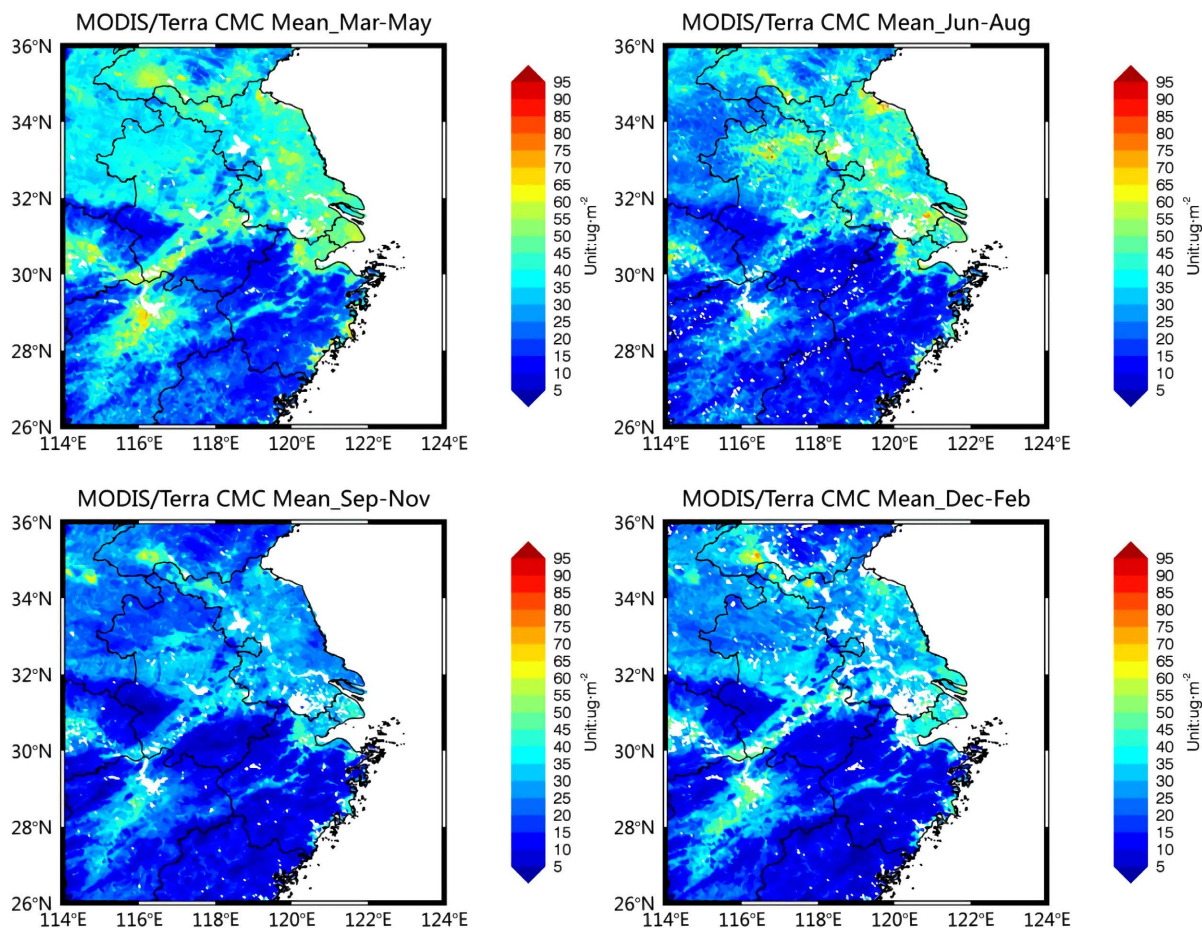


Figure 9. Distribution of quarterly average CMC in the Yangtze River Delta region in 2017

图 9. 2017 年长三角地区季度平均 CMC 的分布

春季，CMC 高值分布最广，且集中分布在武汉、南昌、合肥、南京、浙江、上海等中心城市，其中南昌 CMC 最大值为 85。夏季，CMC 低值向北边扩散，北边高值区范围缩小，在江苏省连云港地区由于其工商业活动较多，其 CMC 最大值 85，长三角地区南边 CMC 的值均在 20 以下。秋季，长三角地区 CMC 都低于 45，武汉、南昌、杭州及上海这 4 个观测城市的 CMC 存在极大值分别为 55、75、60、65。冬季，整体分布特征与秋季类似，长三角北部地区的 CMC 低值区稍有上升，在长江中下游到南昌有一带状 CMC 高值区。因此，可以推断出，CMC 在长三角地区普遍为低值，高值基本分布在人口非常密集、交通十分便利及工商业活动频繁的主要经济城市，由于人类活动导致。

3.4. PM_{2.5} 浓度的时空分布

3.4.1. PM_{2.5} 浓度的整体分布

PM_{2.5}是指空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物，单位为，我们可以通过 PM_{2.5} 浓度大小了解空气的污染程度。利用 2017 年 1~12 月 MODIS 数据产品资料，对边界层高度和相对湿度进行订正后，计算得到的颗粒物 PM_{2.5} 浓度的分布如图 10 所示，从图中可以看出：整体上长三角地区 PM_{2.5} 浓度由北向南逐渐降低，呈“北高南低”趋势分布，高值最大为 90 左右，低值最小达到 10，故最大值与最小值之间的差值为 80。高值主要分布在上海、江苏、安徽北部、武汉、南昌，低值主要分布在六安、长江中下游地区。在东经 116°~119°、北纬 26°~28°的研究区域，在计算过程中，由于边界层高度或相对湿度的数据资料缺失，故有一倒“L”型的空白区域。

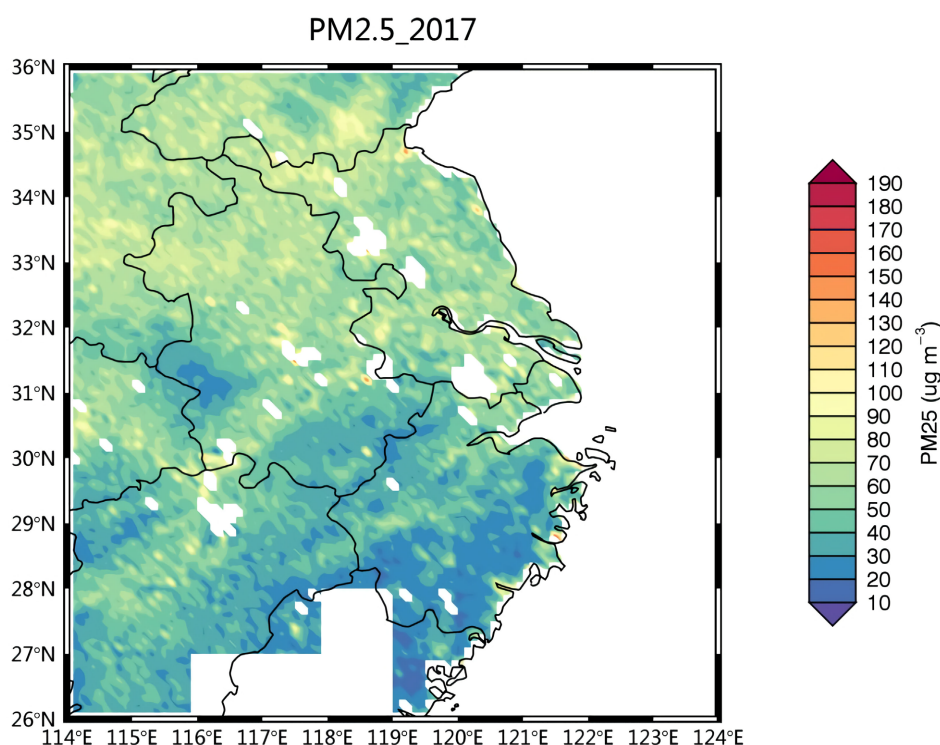


Figure 10. Distribution of PM_{2.5} calculated by AOD in 2017

图 10. 2017 年 AOD 计算的 PM_{2.5} 的分布

3.4.2. PM_{2.5} 浓度的季节变化

图 11 为利用 2017 年 1~12 月 MODIS 数据产品 AOD 计算得到的长三角地区 PM_{2.5} 季节分布，从中可以看出，春、夏、冬季的颗粒物 PM_{2.5} 浓度主要呈“北高南低”的分布，秋季的颗粒物 PM_{2.5} 浓度均为低值。春季，PM_{2.5} 浓度高值主要分布在北纬 32°以上，均在 100 以上，最大值可达到 180，PM_{2.5} 浓度低值主要分布在长三角以南地区，最小可达到 20。夏季，高值区自长三角北部地区向中部地区移动，高值范围有所降低，最大值主要分布在北纬 32°和 35°附近，局地 PM_{2.5} 可达 180，PM_{2.5} 浓度低值分布在长江中下游，均在 50 以下。秋季，整个长三角北部地区的 PM_{2.5} 浓度为低值，表现为颗粒物浓度较小，空气污染为全年最好。冬季，长三角北部地区明显比南部地区的 PM_{2.5} 高，表现为大范围红色区域。此外，整个长三角北部地区其 PM_{2.5} 浓度的值均在 90 以上，显示为高值，在北纬 32°~36°研究范围内，其 PM_{2.5} 浓度的值甚至均达到 120 以上，最大值为 200 左右，长三角南部地区其 PM_{2.5} 浓度相对较低，其值均在 50 以

下, 最小为 10 左右。

由图 11 可得到, 春、夏、冬季的 $PM_{2.5}$ 浓度明显大于秋季, 其中冬季的颗粒物浓度最大, 即冬季的污染程度最严重。可以推断冬季相对湿度小, 风速相对较低, 大气相对处于稳定状态, 这种条件下不利于污染物的稀释与扩散, 导致冬季的污染比较严重。根据春季到夏季 $PM_{2.5}$ 的变化趋势, 可以推出由于夏季受副热带高压、季风等影响, 同时受梅雨天气影响使一部分颗粒物沉积下来, 故明显地可以看出春季到夏季时颗粒物浓度向南移动, 高值也明显减少。

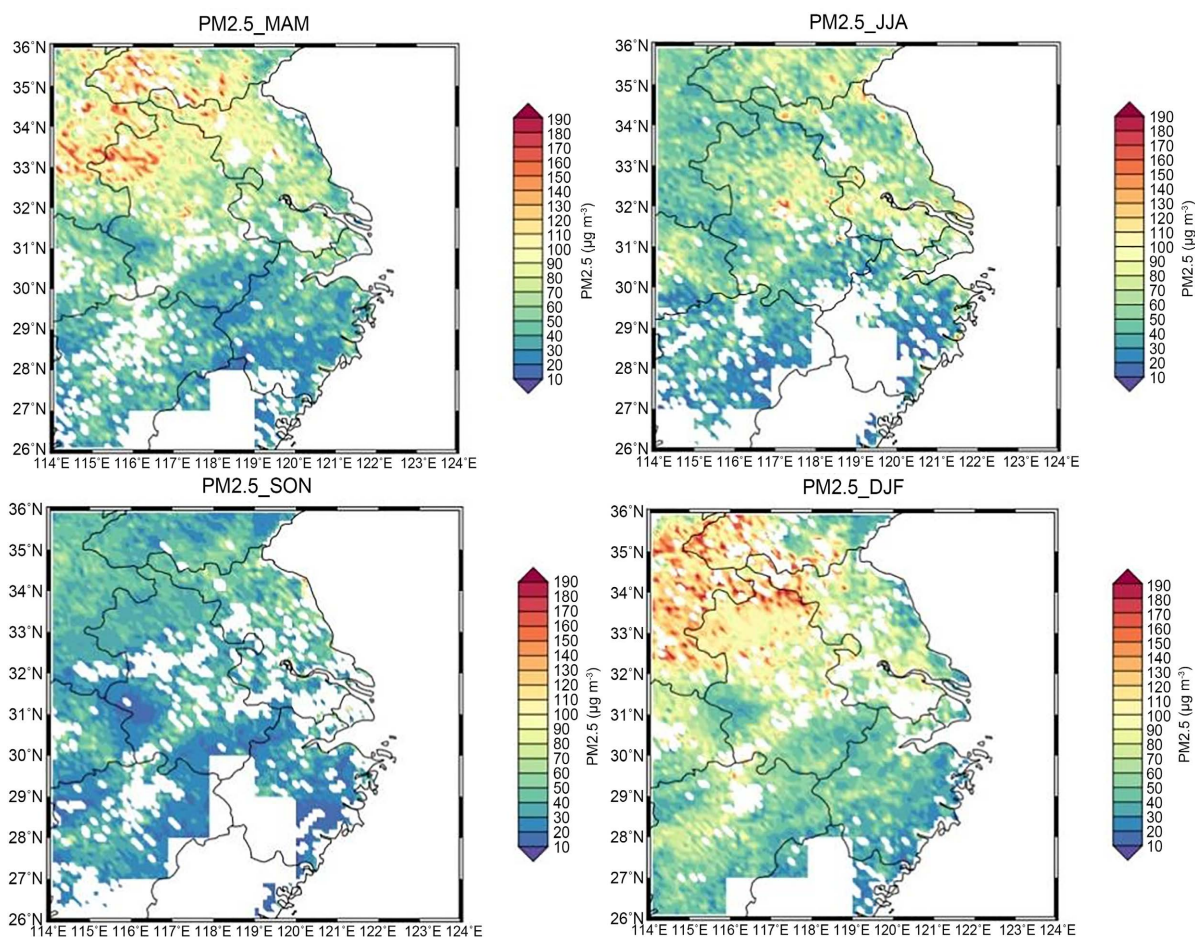


Figure 11. Seasonal distribution of $PM_{2.5}$ calculated by AOD

图 11. AOD 计算的 $PM_{2.5}$ 的季节分布

3.5. $PM_{2.5}$ 质量浓度计算方法验证

将 2017 年 1~12 月 MODIS 数据产品 AOD 进行边界层高度和相对湿度订正后, 计算得到的 $PM_{2.5}$ 月变化结果与环境监测地面 $PM_{2.5}$ 月平均数据进行相关性分析。根据研究区域, 我们选取了 6 个具有代表性且相关性较高的主要城市为地面观测点, 即上海、合肥、南昌、南京、武汉、徐州, 由于杭州地区的相关系数为 0.28, 相关性较低, 故不取作具体分析观测点, 其中徐州为工业活动较频繁的城市, 故将其选为观测点。对其相关性的分析过程中, 6 月 AOD 的值比较大, 对其相关性的误差影响较大, 故没有加入 6 月份的数据。将所有 6 个观测站点 11 个月的观测数据作为可用的站点, 可得到图 12 为针对长三角地区计算的 $PM_{2.5}$ 与监测站点的 $PM_{2.5}$ 的拟合关系散点图。由图可得到, VE_f 的二次项系数取值为 0.2021,

其相关系数 $R = 0.69$, $RMSE = 16.95$ 时, 相关系数最高, 均方根误差最小, 结果为最好。在验证过程中, 其相关系数有所提高, 同时, 其相关性通过显著性检验, 证明具有参考价值。

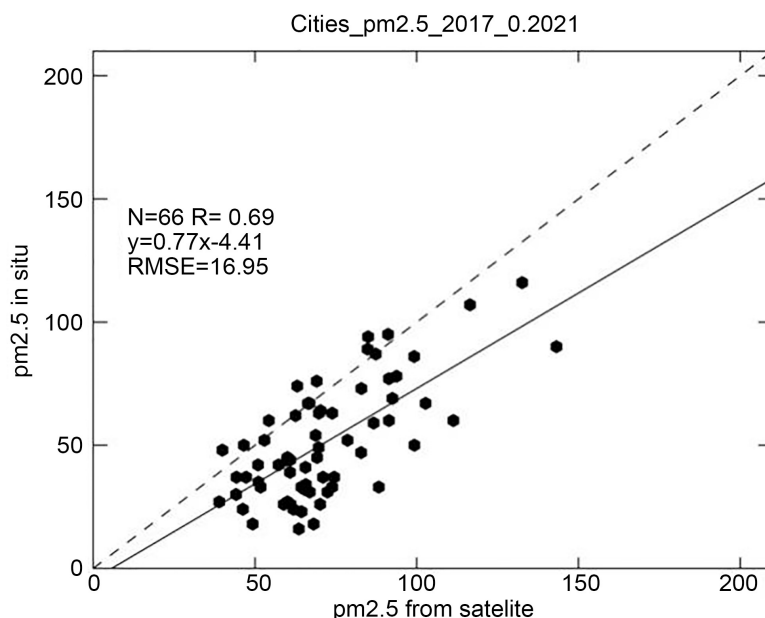
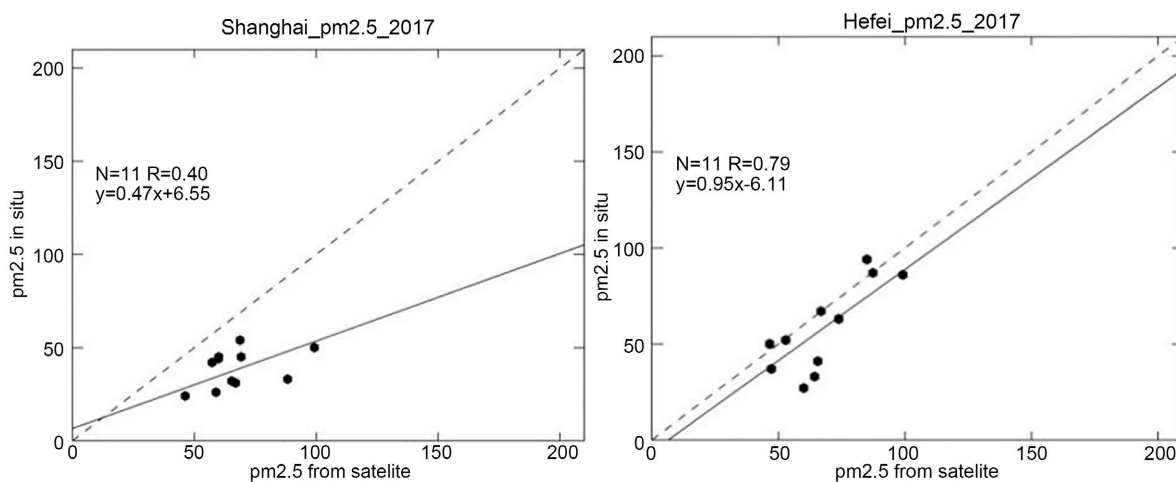


Figure 12. Scatter plot comparing calculated $PM_{2.5}$ with ground-monitored $PM_{2.5}$
图 12. 计算的 $PM_{2.5}$ 与地面监测 $PM_{2.5}$ 进行对比的散点图

图 13 为利用计算得到的 $PM_{2.5}$ 与地面监测 $PM_{2.5}$ 的对比分析, 可明显看到, 选取的 6 个站点有 5 个站点的相关系数均在 0.5 以上, 可见其相关性证明了通过 MODIS 数据资料 AOD 反演颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度的方法是可行的。具体来看每个观测站点的相关性, 上海、合肥、南昌、南京、武汉、徐州的相关系数分别为 0.40、0.79、0.52、0.67、0.73、0.80。其中徐州的相关系数最大, 利用 AOD 反演颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度的可信度最高。图中选取的 6 个观测站点在卫星上颗粒物 $PM_{2.5}$ 和地面监测颗粒物 $PM_{2.5}$ 的取值范围为 0~210。从图中可以明显看出, 在上海、南昌、合肥、武汉这 4 个观测站点上, 其卫星上的 $PM_{2.5}$ 和地面监测的 $PM_{2.5}$ 主要分布在 25~100 的范围内; 南京主要分布在 50~125 之间, 徐州主要分布在 50~150 之间。



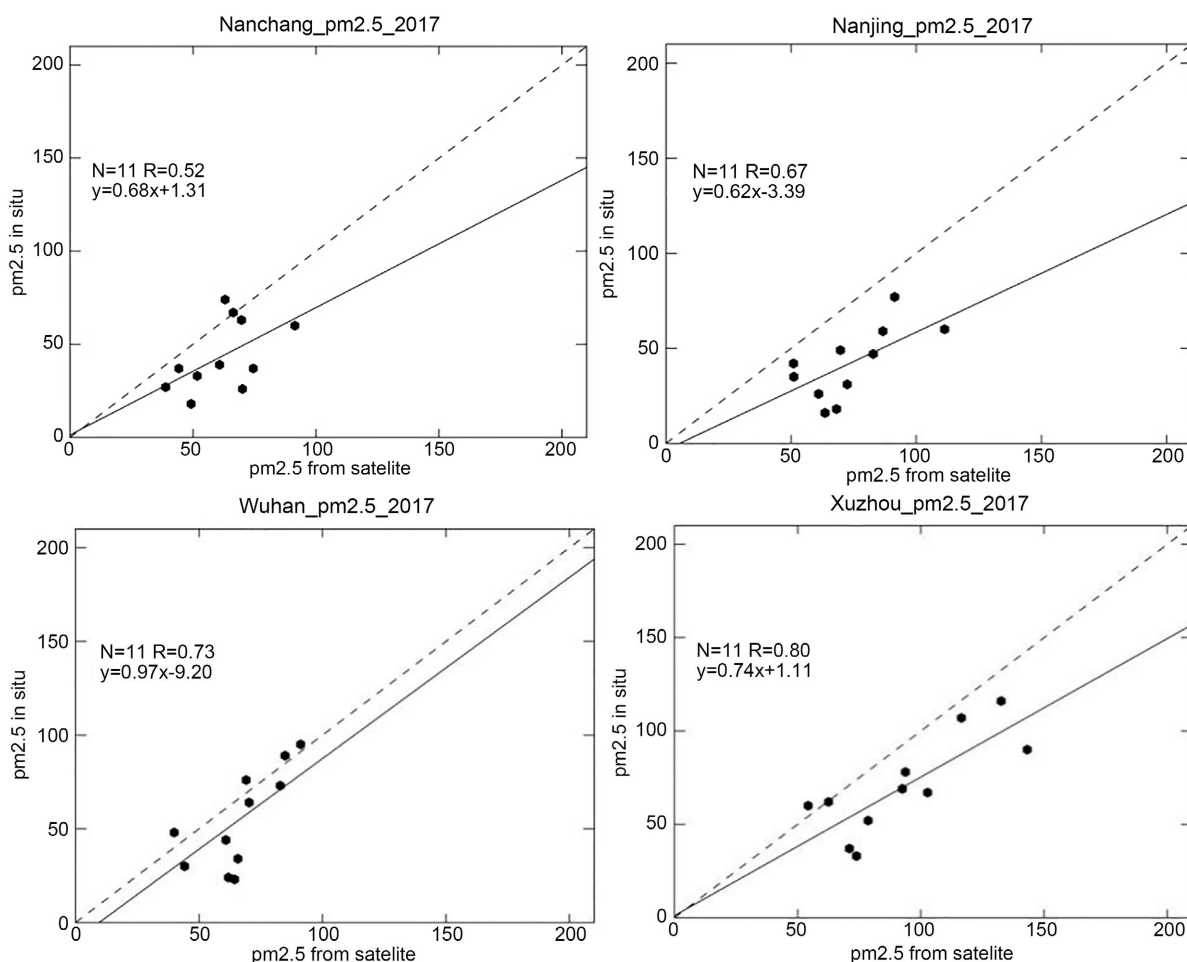


Figure 13. Comparison of calculated $PM_{2.5}$ and 6 ground-monitored $PM_{2.5}$

图 13. 计算的 $PM_{2.5}$ 与 6 个地面监测 $PM_{2.5}$ 进行对比

4. 结论与分析

1) 长三角地区 AOD 平均为 0.5，表现出南低北高的分布特征，其中，武汉、南昌、合肥、南京、杭州、上海为高值区，杭州以南地区为低值区；AOD 表现出明显的季节变化特征，夏半年的 AOD 明显高于冬半年，其中，6 月最大，12 月最小。FMF 平均为 0.6，高低值交叉分布，高值区在长江中下游地区，低值区在上海、江苏省、安徽省中部和江西省中部；FMF 春、秋、冬季为“北低南高”，夏季为“北高南低”，其中，最大月为 2 月，最小月为 5 月。长三角地区 CMC 平均为 30，表现为北高南低的分布特征，武汉、南昌、合肥三个地区之间相互连接，成为北部柱质量浓度高值区的一部分，其他地区为低值区；CMC 的季节变化呈北边为高值、南边为低值的分布，夏半年略高于冬半年，其最大月和最小月分别为 6 月、12 月。

2) 长三角地区 $PM_{2.5}$ 平均为 40，表现为北高南低的分布特征，其中，高值主要分布在上海、江苏省、安徽省北部、武汉、南昌地区，低值主要分布在六安、长江中下游地区； $PM_{2.5}$ 具有明显季节变化，夏秋两季的 $PM_{2.5}$ 低于冬春两季的 $PM_{2.5}$ 。

3) 通过对比计算的 $PM_{2.5}$ 与地面监测 $PM_{2.5}$ 质量浓度，发现其相关系数有所提高，均方根误差有所降低，订正后发现两者的相关性较好，相关系数为 0.69。

参考文献

- [1] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[C]//第六届全国青年气象科技工作者学术研讨会. 第六届全国青年气象科技工作者学术研讨会论文集. 长沙: 中国气象学会, 2006: 112-123.
- [2] Zhang, Y. and Li, Z.Q. (2015) Remote Sensing of Atmospheric Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Mass Concentration near the Ground from Satellite Observation. *Remote Sensing of Environment*, **160**, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.005>
- [3] 邓孺孺, 田国良, 王雪梅, 等. 大气污染定量遥感方法及其在长江三角洲的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(3): 181-185.
- [4] Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., *et al.* (1997) Operational Remote Sensing of Tropospheric Aerosol over Land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **102**, 17051-17067. <https://doi.org/10.1029/96JD03988>
- [5] 刘伟东, 江玉华, 李炬, 等. 北京地区一次重污染天气气溶胶分布与传输特征研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(2): 152-160.
- [6] 孙娟, 束炯, 鲁小琴, 等. 上海地区气溶胶特征及 MODIS 气溶胶产品在能见度中的应用[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(2): 127-131.
- [7] 叶瑜, 李秀央, 陈坤, 等. 大气气溶胶光学厚度与大气污染物及气象因素关系的时间序列研究[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 169-174.