

利用卫星遥感大气气溶胶进行待建 环境监测站点位评估

李成才^{1,†} 周寅亮¹ 李莹² 刘启汉² 贺千山³ 杨复沫⁴

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 香港科技大学环境研究所, 香港; 3. 上海市气象局, 上海 200030;
4. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院三峡生态环境研究所, 重庆 400714; † 通信作者, E-mail: ccli@pku.edu.cn

摘要 利用 2011—2012 年卫星遥感的气溶胶光学参数以及苏州市、无锡市环境监测部门发布的地面 PM10 质量浓度数据, 进行苏州市待建区域背景监测站点的空气质量评估。结果表明, 卫星遥感产品在 10, 5 和 2 km 的空间平均尺度下与地面小时浓度显著相关; 年平均区域分布的卫星遥感结果显示, 苏州市西山待建站点的地面空气质量显著好于城区年均 PM10 低, 达 14% 左右。利用客观天气分型技术在各种天气类型下统计分析表明, 西山待建站点颗粒物浓度在不同天气类型下低幅变化范围为 7%~21%, 在区域重污染天气背景以及区域空气质量清洁两种情况下, 待建站点与城市站点平均值会更接近, 但低幅仍然达 7%~9%。

关键词 MODIS; PM10; 气溶胶; 站点评估

中图分类号 P402

Assessment of the Location of One Background Monitoring Station to be Built with Particulate Matter Remote Sensing from Space

LI Chengcai^{1,†}, ZHOU Yinliang¹, LI Ying², Alexis Kai-Hon LAU², HE Qianshan³, YANG Fumo⁴

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute for the Environment, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong; 3. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030; 4. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714; † Corresponding author, E-mail: ccli@pku.edu.cn

Abstract The aerosol optical parameters derived from satellite remote sensing and the related surface PM10 mass concentration data in 2011–2012 over Suzhou and Wuxi Cities were used to assess the location selection of one background monitoring station to be built. The results showed that satellite remote sensing products with 10 km, 5 km and 2 km space average were all significantly correlated to the hourly PM10 concentration. Showing in the annual average regional distribution of satellite remote sensing results, the annual average PM10 mass concentration over the Xishan (the site to be built in Suzhou) will be significantly lower than those over the urban stations in the magnitude up to 14%. Statistical analysis based on an objective weather classification technique showed that the mean concentration of particulate matter over Xishan were lower than that of urban stations in the amplitude range of 7%–21% in various weather patterns. The smaller (7%–9%) concentration difference between the urban stations and the Xishan station could be found at two types of weather conditions, when there were a regional heavy pollution or a regional clean air quality, respectively.

Key words MODIS; PM10; aerosol; monitoring station selection

大气气溶胶通常指悬浮在大气中的颗粒物,因其气候效应和环境效应,引起国际社会和科学家的广泛关注。对流层气溶胶是地球-大气-海洋系统的重要组成部分,以直接辐射强迫和间接辐射强迫两种主要方式影响地球气候系统的变化^[1]。人类活动造成的大气气溶胶增加对地面空气质量的影响是世界上许多地区面临的一个非常严峻的大气污染问题。直径 10 μm 以下的可吸入气溶胶颗粒物(PM10)对人体健康可造成直接的危害。在地面建立观测站对污染物进行连续观测和采样,可以得到反映污染物浓度时间变化的较为准确丰富的信息,但是由于观测设施昂贵,这种方法只能在有限的站点实施,难以得到污染物来源和变化趋势的宏观分布状况。由于气溶胶在空间上比较大、时间上比较快的变化,利用卫星对气溶胶的分布、光学和辐射效应进行全球观测非常必要^[1],可以弥补地面观测的不足。利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)资料反演气溶胶产品是国内外快速发展的一项卫星遥感技术^[1-2]。MODIS 具有通道多、覆盖面积广等优势,提供了陆地地区比较准确地反演大气气溶胶光学特性的能力。美国国家宇航局(NASA)发布的气溶胶产品具有 10 km 星下点分辨率,对于全球气候研究和区域尺度的气溶胶污染物输送有重要应用价值^[2]。在复杂地形情况下,气溶胶空间变化大,更高分辨率产品成为研究区域大气污染的迫切需要,并被很多研究证实具有可行性^[3-5]。一般而言,在具有密集植被的暗背景地区,反演大气气溶胶光学厚度(AOD)的精度可以达到 15%~20%。国内外大量研究表明,高分辨率大气气溶胶光学厚度的遥感信息,经过适当的有关垂直分布和湿度影响的订正,可以得到近地面的气溶胶消光系数,与大气颗粒物(PM10 或 PM2.5)的质量浓度具有很好的线性相关^[5]。因此,可以利用卫星遥感气溶胶的产品代替站点观测的颗粒物质量浓度,进行站点代表性的评估工作。

本文利用 2011—2012 年卫星遥感的气溶胶光学参数以及苏州市、无锡市环境监测部门发布的地面 PM10 质量浓度数据,进行苏州市待建区域背景监测站点的空气质量评估。

1 方法和数据

1.1 卫星遥感气溶胶光学厚度

MODIS 可见光通道 1 (660 nm)和通道 2 (860 nm)具有 250 m 星下点的分辨率,可见和近红外的

通道 3~7 具有 500 m 的分辨率。这一特点适合于气溶胶、地表和云的高分辨率监测^[1-2]。NASA 的气溶胶反演方法采用 Kaufman 等^[1]提出的暗背景方法,利用 2.13 μm 近红外通道反射率与 0.47 和 0.66 μm 可见光通道反射率具有良好的线性关系,成功地解决了可见光通道地表反射率的难题,每天进行业务反演,提供全球气溶胶产品。该产品主要是为适应全球气候变化研究的目的,10 km×10 km 分辨率已经基本满足这一需要。为了分析城市气溶胶的分布和变化,迫切需要获得更高分辨率的产品。我们利用 1 km 星下点分辨率的 MODIS 通道 1 和通道 3 的可见光资料,利用近红外的通道 7 估计地表反射率,反演气溶胶光学厚度产品。气溶胶类型通过地面太阳光度计和卫星遥感相结合的办法确定,具体方法和这一产品的验证参见文献[3-4]。

1.2 气溶胶光学厚度产品的垂直订正:地面气溶胶消光系数反演

利用气溶胶激光雷达的观测资料,可以得到大气气溶胶垂直分布的典型分布模式和混合层高度变化特征,总结 AOD 与地面消光系数的关系。这种方案是最准确地将 AOD 映射为地面消光系数的方式。但是在不具备激光雷达观测的情况下,需寻找可替代的方法。我们选择利用常规气象资料地面能见度的观测,结合卫星遥感的气溶胶光学厚度,得到气溶胶标高的方法^[6]。气溶胶标高是受天气尺度因素影响的变量,在天气尺度的空间范围具有平滑的分布,因此可以内插到高分辨率的空间格点,再结合卫星遥感的高分辨率气溶胶光学厚度,进行地面消光系数的反演^[5-6]。

在水平平均一的条件下,地面大气水平能见度(气象能见距) R 和大气消光系数 β_e 的关系为

$$R = \frac{1}{\beta_e} \ln \frac{1}{\varepsilon}, \quad (1)$$

其中, ε 为人眼的对比感阈,取 $\varepsilon = 0.02$ 时,

$$R = \frac{3.91}{\beta_e}. \quad (2)$$

这是目前普遍采用的气象能见距与大气消光系数 β_e 的关系式。

按照通常情况下的假定,大气消光系数垂直方向上随高度 z 按指数分布:

$$\beta_e(z) = \beta_e(0) \cdot e^{-z/H}, \quad (3)$$

大气光学厚度为整层大气消光系数在垂直方向上的积分：

$$\tau = \int_0^{\infty} \beta_c(z) \cdot dz = \int_0^{\infty} \beta_c(0) \cdot e^{-z/H} dz = H\beta_c(0) \quad (4)$$

利用消光系数与能见距离的反比关系(式(2))，可以得到地面能见距离与大气光学厚度的关系：

$$R = 3.91H \cdot \frac{1}{\tau} \quad (5)$$

在城市大气污染地区，相比于气溶胶，分子吸收和散射引起的大气光学厚度贡献可忽略，上述“大气光学厚度”就可以看做“大气气溶胶光学厚度”， H 可称为气溶胶“标高”。标高受到天气尺度的气象条件影响。在地面常规观测站提供气象能见度观测的情况下，利用相应站点卫星遥感的大气气溶胶光学厚度，可以得到这些站点的标高。利用这些离散站点的标高，可以客观分析出区域尺度上的标高网格数据，再内插为与卫星产品匹配的高分辨率的标高数据 $H(x, y)$ 。最后利用二者的结果以及式(2)和(5)得到地面能见度或者地面消光系数，实现地面消光系数(SEC)的反演：

$$SEC(x, y) = AOD(x, y) / H(x, y) \quad (6)$$

1.3 地面气溶胶消光系数的湿度订正

由于大气气溶胶的吸湿增长，湿度增加对气溶胶光学厚度具有显著的放大作用，为了将卫星遥感的消光系数产品与地面观测的气溶胶质量浓度进行对比，必须进行湿度影响的订正。利用地面消光和质量浓度的测量，可以获得混合气溶胶的吸湿增长曲线^[7-8]。在不具备具体观测的情况下，我们采用文献中使用的经验订正因子 $f(RH) = 1/(1-RH)$ 进行湿度订正^[5]，将消光系数都映射为相对湿度 $RH=0$ 的情况，我们定义为“干气溶胶消光系数”(SEC-dry)：

$$SEC\text{-dry} = SEC / f(RH) \quad (7)$$

本研究利用上述方法反演的“干气溶胶消光系数”(SEC-dry)与地面站点的 PM_{10} 质量浓度数据进行相关分析，然后利用干气溶胶消光系数进行站点的评估。

1.4 其他数据和站点分布

利用来自环太湖周边城市苏州环境监测站(8 个站)和无锡环境监测站(6 个站)的地面 PM_{10} 浓度资

料。站点分布如图 1 所示，苏州地区监测站：字母 A~H；无锡地区监测站：字母 I~N。待评估建站的背景站位于太湖中的第一大岛——西山风景区，在图 1 中以字母 O 所示。表 1 列出全部监测站和待评估建站位置的名称和经纬度坐标。

本文首先利用已有站点的 PM_{10} 地面质量浓度进行卫星遥感产品的长期时间序列统计检验，验证质量浓度和卫星遥感的干气溶胶消光系数的线性关系。然后利用干气溶胶消光系数(SEC-dry)进行站点评估。客观天气分型技术采用 COST733 软件^[9-10]，数据使用 2008—2012 年 5 年的 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。

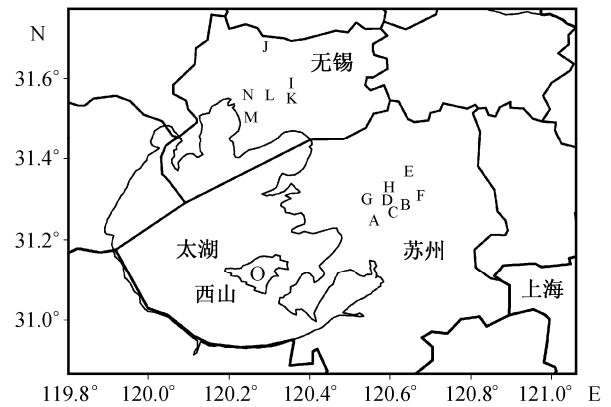


图 1 苏州和无锡的 PM_{10} 地面监测站点

Fig. 1 PM_{10} monitoring stations in Suzhou and Wuxi

表 1 PM_{10} 监测站及苏州西山待建站点经纬度位置
Table 1 Locations of PM_{10} monitoring stations and Xishan station

站点名称	拼音名称	图 1 中字母	地理坐标
无锡东亭	DongTing	I	31.585°N, 120.354°E
无锡堰桥	YanQiao	J	31.684°N, 120.288°E
无锡旺庄	WangZhuang	K	31.548°N, 120.354°E
无锡曹张	CaoZhang	L	31.560°N, 120.294°E
无锡漆塘	XiTang	M	31.503°N, 120.242°E
无锡育红小学	YuHongXiaoXue	N	31.563°N, 120.245°E
苏州上方山	ShangFangShan	A	31.247°N, 120.561°E
苏州南门	NanMen	B	31.286°N, 120.628°E
苏州吴中区	WuZhongQu	C	31.270°N, 120.613°E
苏州彩香	CaiXiang	D	31.302°N, 120.591°E
苏州相城区	XiangChengQu	E	31.371°N, 120.641°E
苏州工业园区	GongYeYuanQu	F	31.310°N, 120.669°E
苏州新区	GaoXinQu	G	31.299°N, 120.543°E
苏州轧钢厂	ZhaGangChang	H	31.326°N, 120.596°E
苏州西山待建	XiShan	O	31.113°N, 120.266°E

2 结果

2.1 卫星遥感地面消光系数分布及与地面 PM10 的相关分析

图 2 为卫星遥感的湿度订正后的地面干气溶胶消光系数(SEC-dry)分布情况(2011—2012 年两年平均),基本上代表地面颗粒物污染的程度。从图 2 可见,待建站的西山地区,干气溶胶消光系数分布显著低于城市污染地区。但是,干气溶胶消光系数是否可以反映颗粒物污染物的浓度,需要既有监测站数据的检验。

图 3 为利用设置在苏州和无锡监测站的 PM10 质量浓度小时平均的监测数据对卫星遥感产品的评估,前 6 个站来自无锡,后 8 个站来自苏州,最后一个为全部数据。图 3 中每个小图给出站点监测的 PM10 和卫星遥感的 SEC-dry 散点分布、线性相关方程、相关系数和样本数。我们发现全部的相关系数高于 99%以上置信度要求(200 个数据点, 99%置信度要求相关系数为 0.180),毫无疑问卫星遥感地

面颗粒物浓度分布的结果是显著的,可以信赖的。这里卫星产品来自以监测站点为中心,半径 10 km 内的卫星产品的平均。

关于卫星产品与地面的匹配,由于时间和空间的差异性,使得在提取卫星遥感数据时应用不同的区域半径,结果会产生差异。图 4 为 5 km 半径卫星产品与地面小时浓度的比较,图 5 为 2 km 半径卫星产品与地面小时浓度的比较。除了数据样本数显著减少外,体现的地面测站的 PM10 质量浓度与卫星遥感产品的相关性几乎没有大的变化。

表 2 为利用 PM10 与 SEC-dry 的平均统计关系(图 3 最后一个小图)得到由年平均 SEC-dry 估计的卫星过境时段 PM10 质量浓度。在 10 km, 5 km 和 1 km 不同卫星遥感空间分辨率情况下,待评估站点的年平均 PM10 质量浓度分别低于其他城市站点的平均值 14%, 19%和 22%。

2.2 不同天气背景下待建站点的评估

图 6 为利用天气学客观分型技术和再分析资料得到的影响华东地区的主要天气类型;表 3 为客观

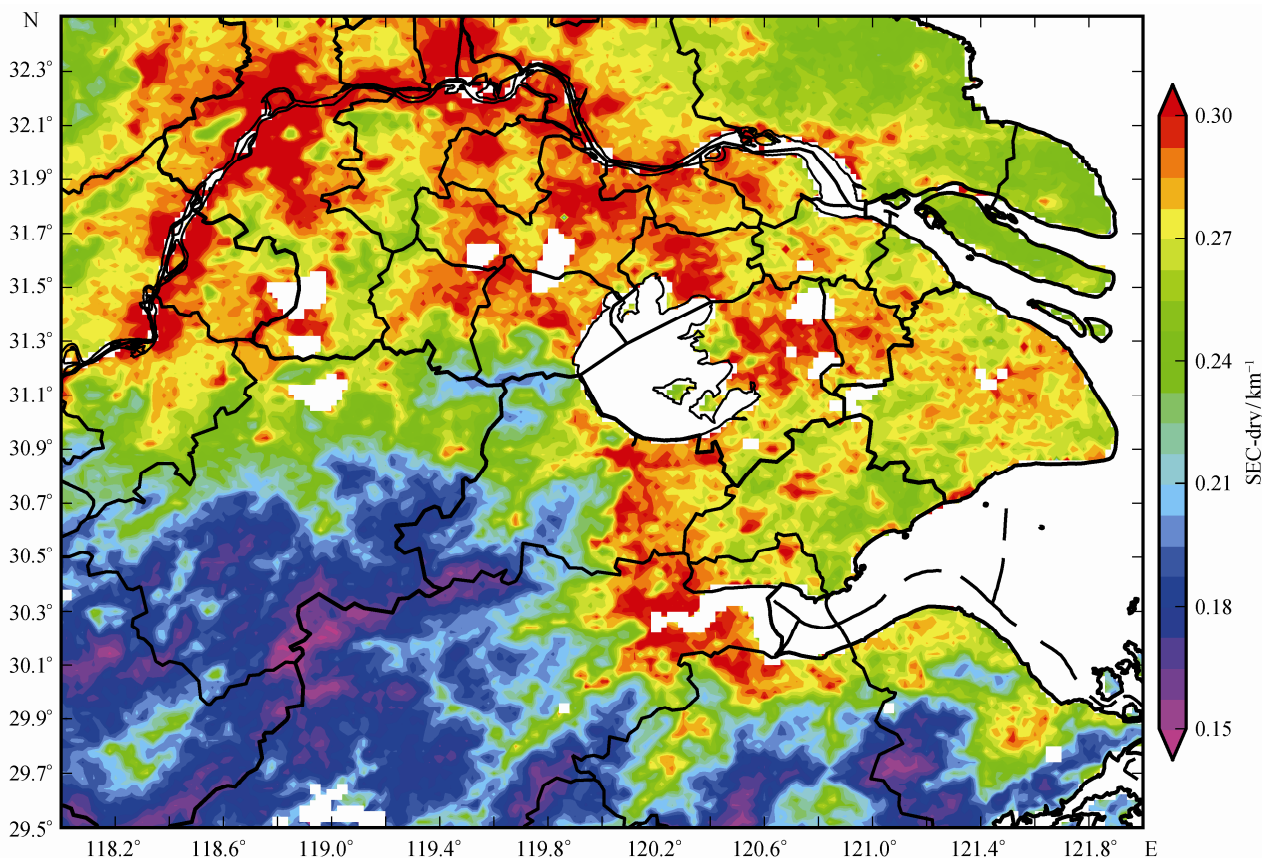


图 2 卫星遥感的湿度订正后的地面干气溶胶消光系数(SEC-dry)分布(2011—2012 年)

Fig. 2 Annual average of humidity-corrected surface aerosol extinction coefficients (SEC-dry) in 2011—2012

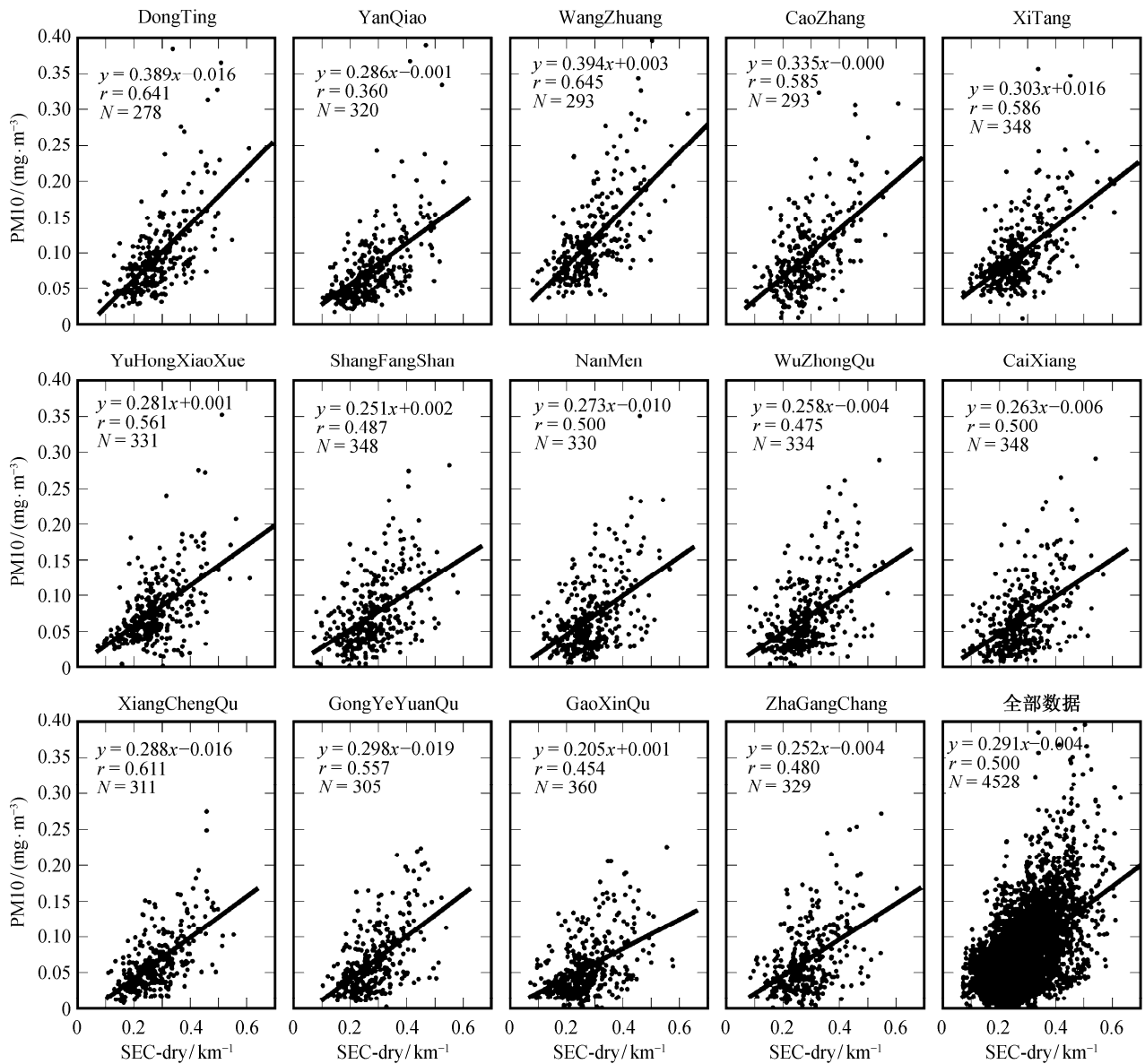


图 3 14 个地面测站 2011—2012 年 PM10 质量浓度监测对卫星遥感产品(10 km)的相关评估
 Fig. 3 Correlations of SEC-dry (with radius of 10 km) and PM10 over 14 stations in 2011–2012

天气分型结果，给出每种天气的特征描述以及出现频数；图 7 为对应图 6 的各种天气类型下的地面干气溶胶消光系数分布，每个小图的经纬度范围与图 2 相同。综合图 6, 7 和表 3，比较极端的污染天气包括：天气类型 T1 下，华东地区处于高压前，地面主导风向为北风、东北风，此时该地区对应严重的高污染；天气类型 T7 下，地面气压为均压场分布，等压线稀疏，平均风速很小，污染较严重。最清洁的天气对应天气类型 T2，存在台风或热带低压靠近东亚大陆，太湖地区被比较强盛的来自海上的东风控制，平均风速较高；另外还有天气类型 T9，对应梅

雨季节的低压槽或静止锋天气，在频繁的降水冲刷下空气质量比较清洁。

表 4 给出所有城市站点在不同天气类型(T1~T9)下的消光系数的平均，同时给出苏州西山待建站点与全部城市站点平均的对比。从表 4 可见，无论哪种天气背景，年平均的全部个例结果表明，西山待建站点颗粒物浓度低于城市站 14%，不同天气类型下变化范围为 7%~21%。在天气类型 T1 和 T2 两种情况(分别对应严重大尺度区域污染及东风控制清洁背景)下，待建站点的监测结果与城市站点的平均值会接近，但仍然偏低 7%~9%。

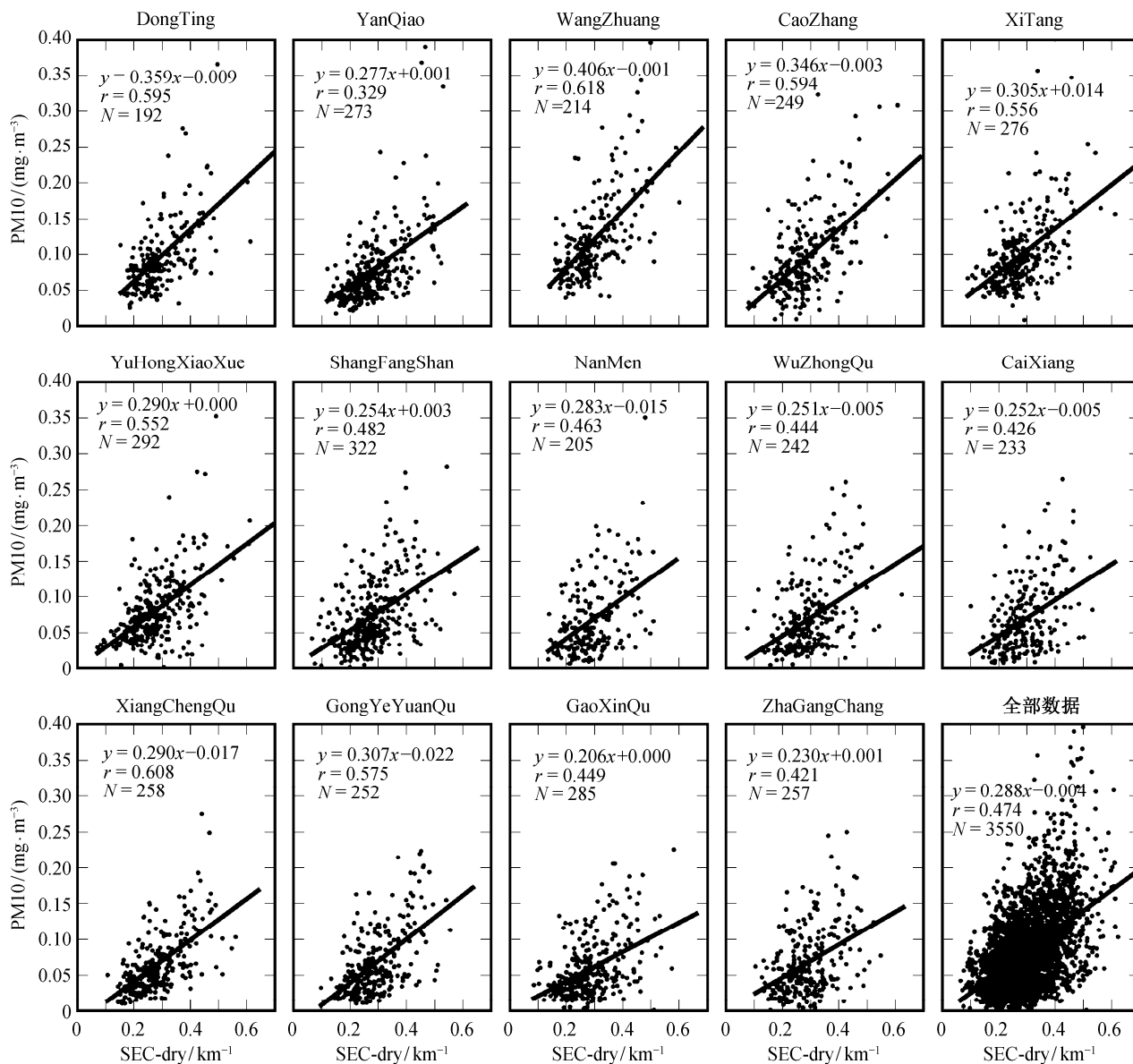


图 4 14 个地面测站 2011—2012 年 PM10 质量浓度监测对卫星遥感产品(5 km)的评估
 Fig. 4 Correlations of SEC-dry (with radius of 5 km) and PM10 over 14 stations in 2011—2012

3 讨论和结论

本文利用卫星遥感气溶胶产品进行苏州待建空气质量监测站的评估,该方法具备传统的评估方法(建站或者数值模拟)所无法具备的优点: 1) 分辨率高,目前可以利用 1 km 分辨率 AOD 的较准确的卫星遥感产品; 2) 标准一致,长时间大范围的卫星遥感产品具有很好的质量控制方面的一致性,不像建地面站那样每个站的观测仪器在不同的维护期间可能出现系统性的或随机性的观测误差; 3) 评估方案可以被任意、随机设计,而不增加成本。因此利

用卫星遥感对待建监测站的选点进行评估,具有常规方式所无可比拟的优势。

利用 2011—2012 年长达 2 年的卫星遥感大气气溶胶产品、地面能见度和相对湿度资料以及苏州、无锡共 14 个地面环境监测站的 PM10 质量浓度监测数据,进行了苏州市西山待建环境监测站的评估分析,基本结论如下。

1) 卫星遥感产品在 10 km, 5 km 和 1 km 的空间平均尺度下,与地面小时浓度之间都具有显著的相关性。

2) 年平均区域分布的卫星遥感图像显示,苏州

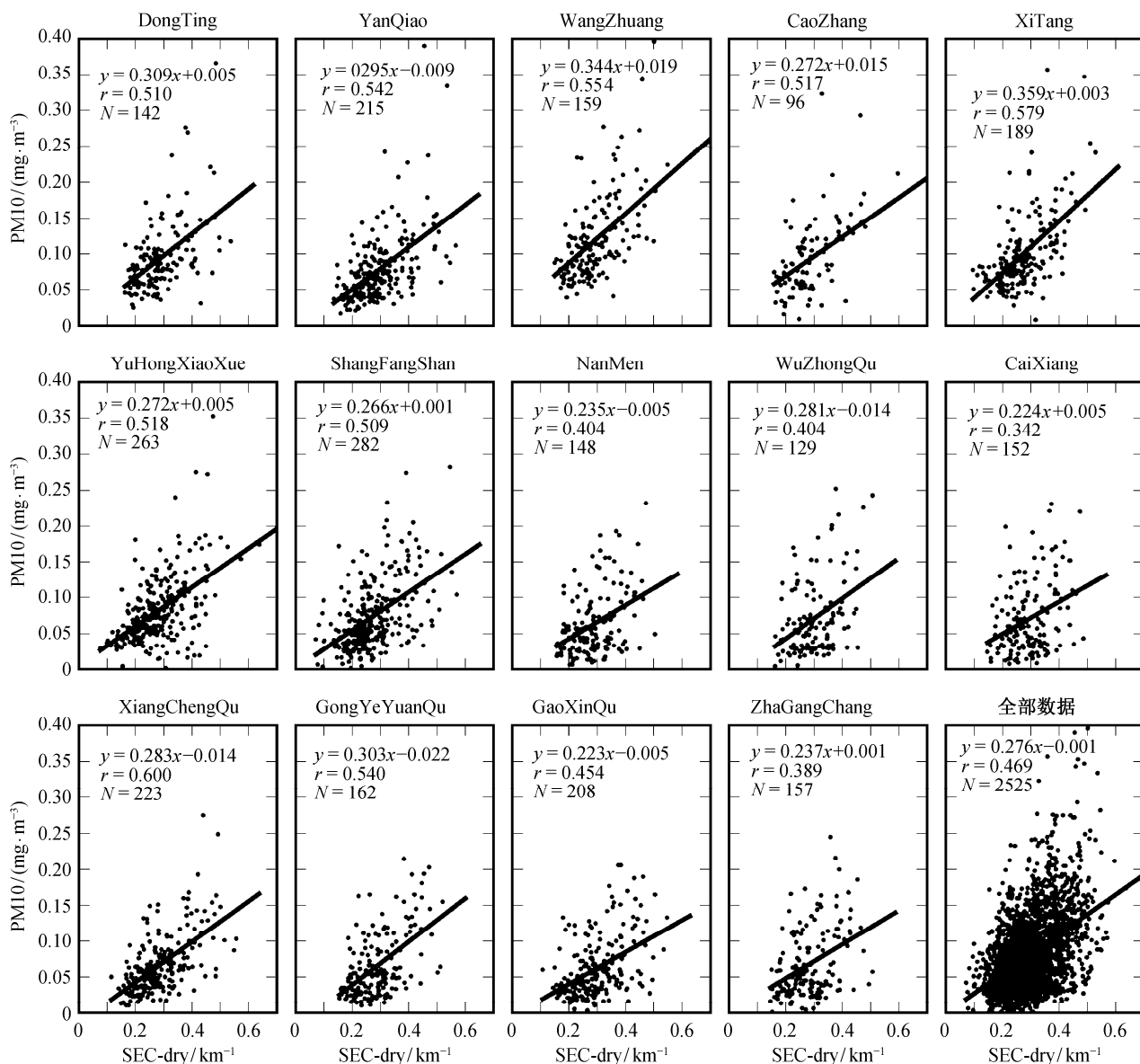


图 5 14 个地面测站 2011—2012 年 PM10 质量浓度监测对卫星遥感产品(2 km)的评估
 Fig. 5 Correlations of SEC-dry (with radius of 2 km) and PM10 over 14 stations in 2011-2012

市西山待建环境监测站点位处的监测结果将显著低于城市区域。

3) 客观天气类型分类下, 卫星遥感图像给出显著差异化的地面空气质量区域分布图像, 不同天气对应不同的分布。

4) 统计表明, 西山待建站点颗粒物浓度在各种天气类型下平均低于城市站 14%, 不同天气类型下低辐变化范围为 7%~21%。在天气类型 T1 和 T2 两种情况(分别对应严重大尺度区域污染及东风控制清洁背景)下, 待建站点的监测结果与城市站点的平均值会接近, 但仍然偏低 7%~9%。因此, 从年平

均以及各种典型天气下的平均来看, 西山站点作为苏州城市污染物监测的参考背景是合适的。

本文给出一种利用卫星遥感技术评估待建站点污染物浓度水平的方法, 该方法存在还一些问题, 有待提高, 包括: 卫星遥感高分辨气溶胶产品的算法需要不断改进, 不同地区不同下垫面最终产品存在不同误差; 卫星遥感的 AOD 转化为地面干气溶胶消光系数(SEC-dry)的过程中, 垂直订正和湿度订正的方法值得进一步改进; 完全基于客观计算的天气分型结果, 对台风等典型天气的处理可能不适当, 需要研究主、客观结合的改进技术。

表 2 不同区域平均的卫星产品下不同站点卫星遥感的消光系数及反演的 PM10 质量浓度

Table 2 Surface aerosol extinction coefficients and derived PM10 mass over all stations under different ranges of satellite products

站点名称	10 km		5 km		2 km	
	SEC-dry/km ⁻¹	PM10/(mg·m ⁻³)	SEC-dry/km ⁻¹	PM10/(mg·m ⁻³)	SEC-dry/km ⁻¹	PM10/(mg·m ⁻³)
无锡东亭	0.2897	0.0803	0.3000	0.0833	0.2994	0.0831
无锡堰桥	0.2824	0.0782	0.2889	0.0801	0.2952	0.0819
无锡旺庄	0.2882	0.0799	0.3027	0.0841	0.2962	0.0822
无锡曹张	0.2831	0.0784	0.2869	0.0795	0.2967	0.0823
无锡漆塘	0.2718	0.0751	0.2813	0.0779	0.2752	0.0761
无锡育红小学	0.2758	0.0762	0.2764	0.0764	0.2801	0.0775
苏州上方山	0.2761	0.0763	0.2741	0.0758	0.2695	0.0744
苏州南门	0.2848	0.0789	0.2934	0.0814	0.2918	0.0809
苏州吴中区	0.2823	0.0781	0.2953	0.0819	0.3015	0.0837
苏州彩香	0.2795	0.0773	0.2949	0.0818	0.2908	0.0806
苏州相城区	0.2783	0.077	0.2871	0.0795	0.2864	0.0793
苏州工业园区	0.2854	0.079	0.2909	0.0806	0.2925	0.0811
苏州新区	0.2712	0.0749	0.2863	0.0793	0.2984	0.0828
苏州轧钢厂	0.2855	0.0791	0.2867	0.0794	0.2863	0.0793
城市站平均	0.2810	0.0778	0.2889	0.0801	0.2900	0.0804
苏州西山待建	0.2485	0.0683	0.2446	0.0672	0.2399	0.0658
偏差/%	13	14	18	19	21	22

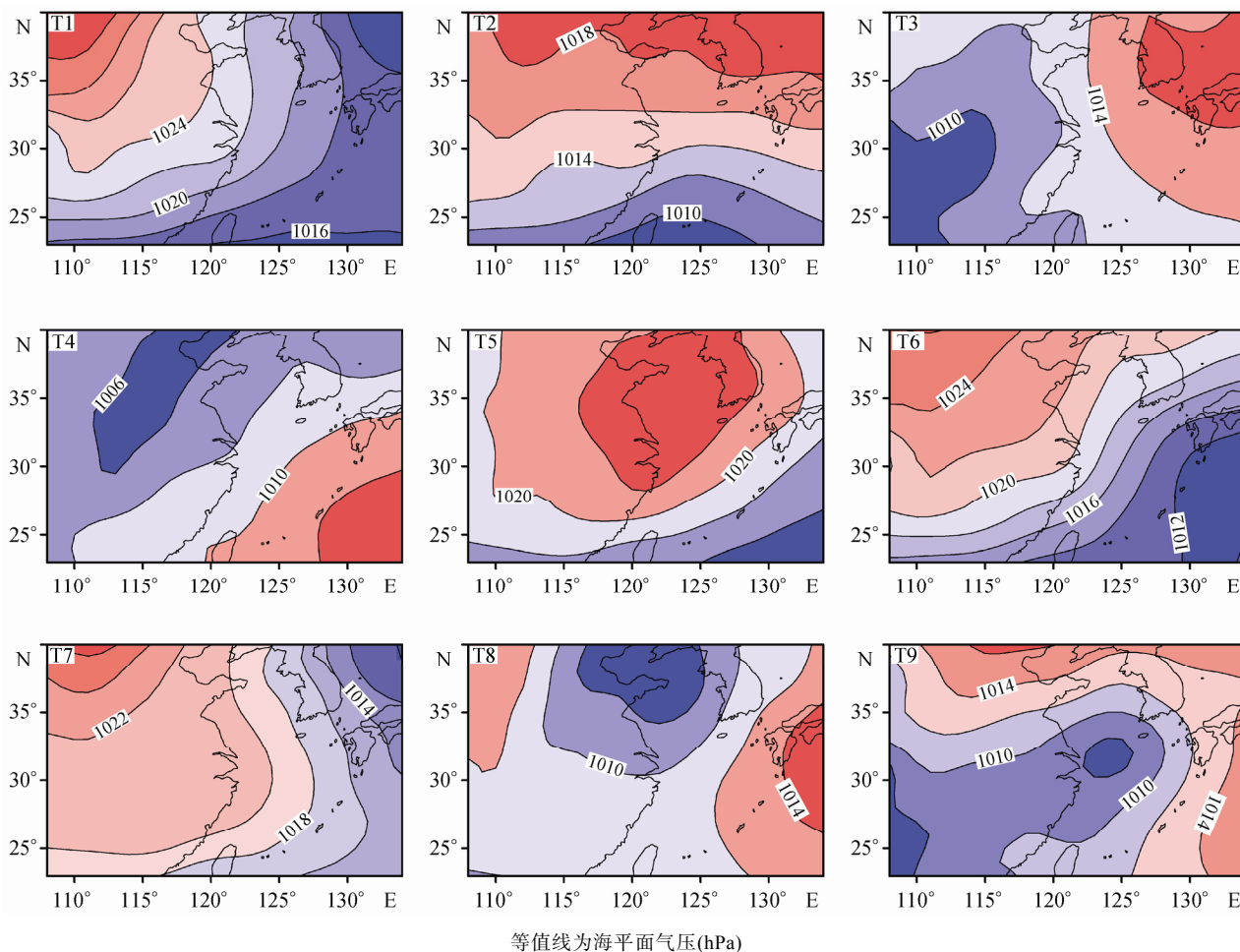


图 6 影响华东地区的主要天气类型
Fig. 6 Main weather types over Eastern China

表 3 客观天气分型结果
Table 3 Results of objective weather type classification

天气分型	特征描述	出现频数/%
T1	西北冷高压，地面气压场梯度大，本地为正变压，主导风向为偏北、东北风	21.5
T2	台风或热带低压靠近东亚大陆，本地区处于台风外围，比较强盛的东风控制，平均风速较高	16.3
T3	副热带高压北上，本地区为东风或东南风控制	14.1
T4	副热带高压中心偏南，本地区为南风或西南风控制	12.9
T5	高压主体东移，本地区为高压脊控制	11.9
T6	冷锋过境，锋面呈东北西南向经过该地区，等压线密集，地面平均风速应较大	10.7
T7	均压场分布，等压线稀疏，平均风速很小	5.2
T8	南北向低压、东西存在高压的鞍型场	4.8
T9	低压槽或静止锋天气，多降水	2.6

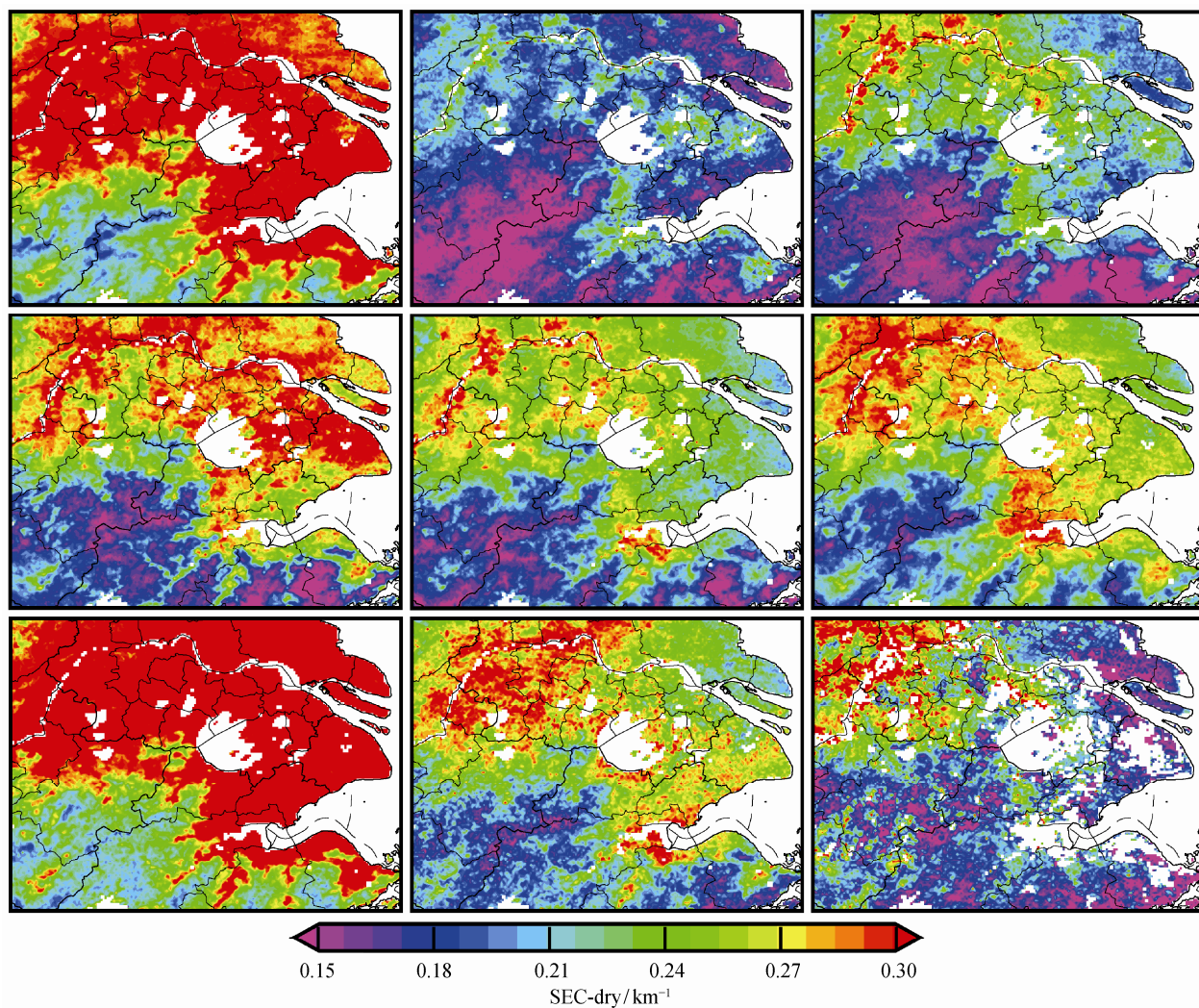


图 7 影响华东地区的主要天气类型下地面干气溶胶消光系数的分布
Fig. 7 Distribution of surface extinction coefficients (SEC-dry) in different weather types

表 4 各城市站点消光系数及苏州待建站点与城市平均的对比
Table 4 Surface aerosol extinction coefficients over all stations under various weather types km⁻¹

天气类型	无锡东亭	无锡堰桥	无锡旺庄	无锡曹张	无锡漆塘	无锡育红小学	上方山	南门	吴中区
全部	0.3000	0.2889	0.3027	0.2869	0.2813	0.2764	0.2741	0.2934	0.2953
T1	-	0.3154	0.2404	0.3384	0.2908	0.2895	0.2796	0.2121	0.2113
T2	0.3200	0.3271	0.3275	0.3183	0.3225	0.3123	0.3214	0.3251	0.3317
T3	0.2242	0.2165	0.2136	0.2105	0.2143	0.2091	0.2118	0.2274	0.2237
T4	0.2854	0.2441	0.2826	0.2311	0.2255	0.2100	0.2054	0.2519	0.2315
T5	0.2750	0.2552	0.2796	0.2710	0.2661	0.2594	0.2537	0.2735	0.2758
T6	0.3171	0.2867	0.3188	0.2985	0.2678	0.2871	0.2633	0.3240	0.3113
T7	0.2804	0.2815	0.2795	0.2728	0.2704	0.2652	0.2665	0.2868	0.2874
T8	0.3895	0.3805	0.3853	0.3761	0.3530	0.3589	0.3357	0.3652	0.3729
T9	0.3136	0.3063	0.3114	0.2874	0.2803	0.2911	0.2767	0.2637	0.2922
天气类型	彩香	相城区	工业园区	新区	轧钢厂	城市平均	西山待建	偏差/%	
全部	0.2949	0.2871	0.2909	0.2863	0.2867	0.2860	0.2446	14	
T1	0.1766	0.2111	0.2279	0.2373	0.2443	0.2506	0.2332	7	
T2	0.3235	0.3209	0.3239	0.3283	0.3220	0.3212	0.2929	9	
T3	0.2299	0.2141	0.2256	0.2090	0.2190	0.2158	0.1878	13	
T4	0.2534	0.2393	0.2405	0.2195	0.2380	0.2365	0.1893	20	
T5	0.2733	0.2598	0.2635	0.2749	0.2684	0.2643	0.2147	19	
T6	0.3158	0.3108	0.3053	0.2963	0.3069	0.2963	0.2353	21	
T7	0.2798	0.2721	0.2815	0.2712	0.2756	0.2746	0.2480	10	
T8	0.3771	0.3544	0.3657	0.3515	0.3528	0.3603	0.2858	21	
T9	0.3013	0.3026	0.2970	0.2926	0.3001	0.2907	0.2446	16	

致谢 本研究得到苏州市环境监测中心站的项目资助和监测数据支持,同时利用了中国环境监测总站发布的监测数据,在此一并致谢。

参考文献

[1] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 103(D14): 17051-17067

[2] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): doi: 10.129/2002JD003179

[3] 李成才,毛节泰,刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度. *大气科学*, 2005, 29(3): 335-342

[4] Li C C, Lau K H A, Mao J T, et al. Retrieval, validation, and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(11): 2650-2658

[5] Li C C, Mao J T, Lau K H A, et al. Application of MODIS satellite products on the air pollution research in Beijing. *Science in China: Ser D*, 2005, 48(Suppl II): 209-219

[6] 吴永红,何秀,李成才,等. 卫星遥感气溶胶光学厚度在北京 2008 年地面空气质量监测上的应用. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(4): 266-273

[7] Li C C, He X, Deng Z Z, et al. Dependence of mixed aerosol light scattering extinction on relative humidity in Beijing and Hong Kong. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(2): 117-121

[8] 何秀,邓兆泽,李成才,等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM10 监测方面的应用研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(2): 178-184

[9] Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 5031-5053

[10] Philipp A, Bartholy J, Beck C, et al. COST733CAT — a database of weather and circulation type classifications. *Phys Chem Earth*, 2010, 35: 360-373