

# 基于MODIS数据的地面颗粒物浓度估算方法

戴燃坡<sup>1</sup>, 宿慧丹<sup>1</sup>, 陶晨阳<sup>1</sup>, 郭各朴<sup>1</sup>, 马青玉<sup>1</sup>, 谢 勇<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

(2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

**[摘要]** 提出了一种基于卫星遥感数据的近地面颗粒物质量浓度(PM 值)估计方法. 采用 Terra/MODIS 卫星数据和基于连续两天 MODIS 数据的气溶胶光学厚度反演算法, 反演出无锡地区的气溶胶光学厚度; 再利用所反演的气溶胶光学厚度与地面实测颗粒物质量浓度数据进行分析, 得出颗粒物质量浓度的大小分布范围与气溶胶光学厚度的关系模型; 进一步利用研究区域中地面站点监测到的颗粒质量浓度数据对估算结果进行评估. 结果表明该方法所估算的 PM 值与地面实测数据具有较好的相关性, 且地面监测的颗粒物质量浓度均分布在卫星遥感数据所估算的范围之内. 本研究证明了 MODIS 卫星数据监测地面颗粒物质量浓度的可行性, 为近地面 PM 值的估算提供了有效手段.

**[关键词]** 卫星遥感, MODIS 数据, 近地面颗粒物浓度, 气溶胶光学厚度

**[中图分类号]** X87 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2016)03-0135-06

## Estimation Method for Ground Particulate Matter (PM) Concentrations Based on MODIS Data

Dai Ranpo<sup>1</sup>, Su Huidan<sup>1</sup>, Tao Chenyang<sup>1</sup>, Guo Gepu<sup>1</sup>, Ma Qingyu<sup>1</sup>, Xie Yong<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A method is proposed to estimate the surface-level particulate matter (PM) concentrations by using satellite remote sensing data in this paper. With the Terra/MODIS satellite-based data and the aerosol retrieval algorithm of two-day MODIS data, the aerosol optical depth over Wuxi city was calculated firstly. Then the relationship between the size distribution range of particle matter concentration and aerosol optical thickness was achieved using the aerosol optical depth and the measured particle matter concentration data. Lastly, the estimated results were evaluated by comparing with the PM values obtained by the ground-based observations deployed in the research region. The estimated PM values and observation results show good correlations and the entire ground monitoring particle mass concentrations are distributed within the range estimated by the satellite remote sensing data. This study confirms the feasibility of PM concentration monitoring with the MODIS data and provides an effective method of PM estimation for surface-level particulate.

**Key words:** satellite remote sensing, MODIS data, surface-level PM concentration, aerosol optical depth

随着我国经济的快速发展和城市化进程的不断加快, 各类环境污染也显得日益严重. 近地面颗粒物污染逐渐成为城市空气污染的最主要污染物之一<sup>[1]</sup>, 其本身的毒性和携带的病毒、细菌易被人吸入并沉积在肺中, 严重地危害着公众的健康<sup>[2]</sup>. 颗粒物能够在大气中停滞很长时间, 并可以随呼吸进入人体, 可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)可以进入呼吸道, 被呼吸道上皮细胞吞噬并产生炎症反应<sup>[3]</sup>; 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)相对表面积大、活性强, 易附带有毒、有害物质, 可沉积于肺部<sup>[4]</sup>; 超细的颗粒物(PM<sub>0.1</sub>)可以通过上皮和血气屏障, 进入心血管系统, 对心肺及其他系统产生危害<sup>[5]</sup>. 目前对于近地面颗粒物质量浓度的常规监测手段主要是地面专业仪器的连续定量监测, 可以实时掌握颗粒物浓度随时间变化的信息, 具有精度高、时间连续等优点<sup>[6]</sup>,

收稿日期: 2016-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金(11274176、11474166)、中国博士后科学基金(2016M591874)、江苏高校优势学科建设项目(164320H115).

通讯联系人: 马青玉, 博士, 教授, 研究方向: 电子技术、信息处理和声学. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

但难以掌握较大区域尺度上的颗粒物分布状况<sup>[7]</sup>. 卫星遥感观测具有区域尺度大的优点<sup>[8]</sup>, 可以在大空间范围内的不同尺度上持续观测, 反映污染物的宏观变化、来源分布和传输路径, 为大气污染的监测与治理提供依据.

大量研究表明气溶胶光学厚度(AOD)和近地面颗粒物质量浓度间存在一定的相关性<sup>[9]</sup>, 卫星遥感所获取的气溶胶光学厚度是大气整层颗粒物消光系数在垂直方向的积分, 可以用来估算近地面颗粒物质量浓度. 由于气溶胶的光学特性会受到粒子吸湿特性<sup>[10]</sup>和气溶胶标高<sup>[11]</sup>等因素的影响, 常引入相对湿度和大气边界层高度等气象因子来修正估算结果, 提高准确性<sup>[12]</sup>. 而气象因子数据一般采用地面监测方法获取, 这种信息获取方式地域性差异较大<sup>[13]</sup>, 且地面信息仪器的观测范围也限制了应用卫星数据来对近地面颗粒物质量浓度估算的空间范围.

为了摆脱地面观测仪器的限制, 本文提出了一种仅考虑气溶胶光学厚度与近地面颗粒物质量浓度关系的估算方法, 利用卫星遥感数据来直接估算近地面颗粒物的浓度范围. 在气溶胶光学厚度和近地面颗粒物质量浓度存在一定相关关系的基础上, 通过考虑气溶胶中其它成分对气溶胶厚度的最小、最大影响, 实现对一定气溶胶光学厚度所能达到的近地面颗粒物最大和最小质量浓度的估算, 提高了颗粒物质量浓度卫星遥感估算的方便程度和有效性.

## 1 模型与方法

根据大气层平面分层假设, 气溶胶光学厚度 $\tau_a$ 可以看作消光系数 $k_a$ 在大气垂直方向上的积分<sup>[14]</sup>:

$$\tau_a = \int_0^\infty k_a(z) dz \approx k_a \cdot H_A, \quad (1)$$

其中,  $z$  表示所处高度,  $H_A$  为气溶胶的高度, 一般认为接近大气边界层高度. 根据对 Mie 理论的相关推导研究<sup>[15]</sup>, 近地面颗粒物质量浓度  $PM_X$  与消光系数  $k_a$  存在如下的关系:

$$k_a = \frac{3\langle Q_{ext} \rangle}{4r_{eff}\rho} PM_X, \quad (2)$$

其中,  $\langle Q_{ext} \rangle$  为综合粒子分布的消光效率,  $r_{eff}$  为有效半径,  $\rho$  为平均质量浓度,  $PM_X$  为半径在  $X$  以下的颗粒物质量浓度. 若颗粒物的类型和谱分布一定, 则  $\langle Q_{ext} \rangle$ 、 $r_{eff}$ 、 $\rho$  可以看作常数. 将式(1)代入式(2)可得:

$$\tau_{PMX} = \varphi_X PM_X, \quad (3)$$

$$\varphi_X = 3H_A \langle Q_{ext} \rangle / (4r_{eff}\rho). \quad (4)$$

气溶胶指悬浮在大气中的固态或液态颗粒物与气态粒子联合构成的多相体系<sup>[16]</sup>, 连续两天气溶胶光学厚度反演算法所计算出的 AOD 中包含了气体分子的影响<sup>[17]</sup>, 则 AOD 的消光影响贡献 $\tau_a$ 可以表示为:

$$\tau_a = \tau_{PMX} + \tau_{PMY} + \tau_{PMG}. \quad (5)$$

其中,  $\tau_{PMX}$  是半径小于  $X$  的固态粒子所作贡献,  $\tau_{PMY}$  是其它固态粒子的贡献,  $\tau_{PMG}$  是气态分子的贡献. 式(3)代入式(5)可得:

$$PM_X = \tau_a / \varphi_X - \beta_X, \quad (6)$$

$$\beta_X = (\tau_{PMY} + \tau_{PMG}) / \varphi_X. \quad (7)$$

当 $\tau_a$ 为定值,  $PM_X$ 取最大值时, 其贡献 $\tau_{PMX}$ 可以近似认为是所能达到的最大值;  $PM_X$ 取最小值时, 其贡献 $\tau_{PMX}$ 可以近似认为是所能达到的最小值. 通过对 $\tau_a$ 和 $PM_X$ 最值数据进行线性拟合, 分别获得 $PM_X$ 最大及最小值与气溶胶光学厚度的两组关系系数 $1/\varphi_X$ 和 $\beta_X$ , 从而构建 $PM_X$ 最值与 $\tau_a$ 的关系模型, 达到利用 $\tau_a$ 估测 $PM_X$ 分布范围的目的.

## 2 数据处理

研究采用2015年3月至2016年2月无锡地区的MODIS L1B卫星数据, 对其进行格式转换、重投影、辐射校正、云检测等操作以获得有效数据, 并通过两天MODIS数据的气溶胶光学厚度反演算法<sup>[17]</sup>来计算得到相应的气溶胶光学厚度. 无锡市环境监测中心在市区设立了7个国家级自动监测站点<sup>[18]</sup>来对环

境进行监测,且每隔 1 h 就会发布一次环境监测数据.选取距离卫星过境时刻最近一次所发布的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  数据作为卫星观测时地面的真实 PM 质量浓度数据,共获得有效实验数据 418 组.其中 AOD 大于 2.0 的数据仅有 43 组, $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  最大值均出现在 AOD 值 1.5 左右,因此主要针对在 0~2.0 范围内的 AOD 值与 PM 质量浓度的关系进行研究.对  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  进行卫星遥感的监测估算,得到  $\tau_a$  与  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  之间的关系为  $PM_{10} = \tau_a / \varphi_{10} - \beta_{10}$  和  $PM_{2.5} = \tau_a / \varphi_{2.5} - \beta_{2.5}$ ,其中  $\varphi_{2.5}$  和  $\varphi_{10}$  是  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的光学厚度贡献系数,  $\beta_{2.5}$  和  $\beta_{10}$  是  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的光学厚度影响系数.

由式(6)可知, $PM_x$  质量浓度所能达到的最大值应随  $\tau_a$  的上升而提高,而由于研究数据局限,当  $\tau_a$  较大时,其数据相对较少,难以获取到此时  $\tau_a$  所对应的  $PM_x$  质量浓度最大值.在实际计算中通过滤除  $\tau_a$  较大且  $PM_x$  质量浓度较小的数据来消除其对最值模拟的不利影响.直接提取  $\tau_a$  相应  $PM_x$  质量浓度最值并不能很好地反映其随  $\tau_a$  的变化关系,通过数据分组来降低数据量不足的误差,根据不同步长来对 AOD 数据进行分组,分别获取各组内 PM 质量浓度最小值和最大值,分析其和 AOD 的相关性,其结果如表 1 所示.可见  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度在不同 AOD 步长下的最小值与 AOD 的相关性相对最大值来说都很小,PM 质量浓度最小值与 AOD 的直接相关性很小.PM 质量浓度最大值相关系数与最小值相关系数的比值  $R_{\max}^2 / R_{\min}^2$  越大,说明所分步长越合理<sup>[19]</sup>.因此选取步长 0.05 来展开实验计算  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  比值  $R_{\max}^2 / R_{\min}^2$  的最大值,并对气溶胶光学厚度所对应的 PM 质量浓度数据进行分组,获取气溶胶光学厚度在各组内的 PM 质量浓度最大值和最小值.

表 1 不同 AOD 步长下的 PM 相关系数最值表

Table 2 Correlation coefficient extremums of PM at different step lengths of AOD

AOD 步长		0.5	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001	0.000 5
$PM_{2.5}$ 相关系数	最小值	0.711 8	0.169 8	0.093 8	0.047 0	0.063 7	0.067 9	0.064 5
	最大值	0.340 2	0.305 9	0.195 3	0.053 6	0.029 4	0.051 6	0.052 0
	$R_{\max}^2 / R_{\min}^2$	0.477 9	1.801 0	2.081 6	1.139 1	0.462 3	0.759 8	0.806 5
$PM_{10}$ 相关系数	最小值	0.635 2	0.024 8	0.009 0	0.010 0	0.025 8	0.026 2	0.021 2
	最大值	0.638 9	0.210 2	0.112 9	0.014 0	0.005 9	0.014 6	0.014 8
	$R_{\max}^2 / R_{\min}^2$	1.005 9	8.461 3	12.57 0	1.402 9	0.228 4	0.555 9	0.697 6

一般情况下,气溶胶光学厚度所对应的 PM 质量浓度最大值随着气溶胶光学厚度的增大而变大.但由于研究数据量较少会产生误差.因此分步长获取的 PM 质量浓度最大值在一些 AOD 值的范围内可能会产生不随气溶胶光学厚度增大而变大的现象.为了消除无效数据对 PM 质量浓度最大值的不良影响,从最大值数据中分离出随 AOD 值变大而变大的结果建立线性拟合模型,AOD- $PM_{2.5}$  和 AOD- $PM_{10}$  的结果如图 1(a)和(b)所示.不同 AOD 所对应的 PM 最小质量浓度均呈现出一定稳定的状态,对最小值进行线性拟合得到  $\text{Min}_{PM_{2.5}} = 4.916\tau_a + 10.38$  和  $\text{Min}_{PM_{10}} = 2.705\tau_a + 29.26$ .

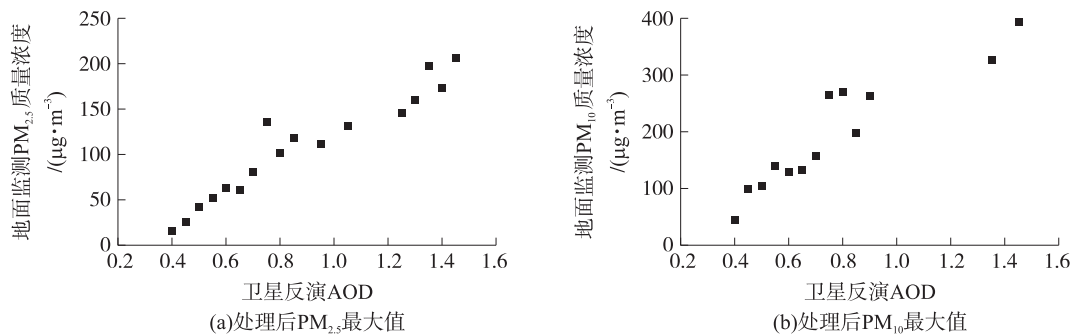


图 1 无锡市 PM 值以 0.05 步长获取的最值分布

Fig.1 Extremum distributions of PM in Wuxi according to the step length of 0.05

由于 PM 值的数量级约是气溶胶光学厚度的 100 倍左右,AOD 对  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度最小值的影响系数分别为 4.916 和 2.705,远远小于两者数量级差异,且 PM 质量浓度与 AOD 的相关性系数接近

0.05,即两者间的相关性很低,因此可以认为PM质量浓度的最小值是和AOD无关的定值,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>最小值分别近似为10.38 μg/m<sup>3</sup>和29.26 μg/m<sup>3</sup>.同时,利用AOD及其所对应的PM质量浓度最大值数据,通过多个拟合函数来模拟一定AOD下PM污染所能达到的最严重情况,其结果如表2所示.PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>最大值分别和AOD通过不同函数模型来进行相关性分析,得出相关性系数均大于0.80,并满足99.99%的*p*值检验,可见PM质量浓度最大值与AOD存在较好的相关性.在PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的研究中,检验值*F*最大的函数模型均是线性函数模型,具有最大的相关性系数,可以认为线性函数是AOD与PM质量浓度最大值的模型.

表2 AOD与PM质量浓度最大值的拟合模型  
Table 2 Correlation model between AOD and the maximal PM concentration

	模型函数	拟合模型	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i>	<i>p</i> 值
PM <sub>2.5</sub>	线性函数	$y=160.846\ 2x-30.791\ 2$	0.844\ 7	87.002\ 1	0.000\ 0
	对数函数	$y=132.779\ 5\ln x+136.945\ 7$	0.841\ 4	84.877\ 2	0.000\ 0
	一元二次函数	$y=-39.625\ 1x^2+232.850\ 0x-59.487\ 6$	0.848\ 3	41.945\ 6	0.000\ 0
	指数函数	$y=21.020\ 2e^{1.712\ 0x}$	0.806\ 6	66.720\ 1	0.000\ 0
PM <sub>10</sub>	线性函数	$y=297.034\ 9x-32.155\ 0$	0.903\ 8	103.390\ 3	0.000\ 0
	对数函数	$y=250.586\ 7\ln x+282.701\ 3$	0.896\ 9	95.705\ 6	0.000\ 0
	一元二次函数	$y=-81.489\ 6x^2+450.214\ 0x-92.963\ 5$	0.908\ 3	49.545\ 4	0.000\ 0
	指数函数	$y=57.6868e^{1.412\ 7x}$	0.823\ 1	51.182\ 0	0.000\ 0

注:*y*为PM质量浓度最大值,*x*为反演的AOD值.

3 结果与讨论

表2中的拟合回归模型都可以用来模拟PM质量浓度最大值与气溶胶光学厚度间的关系,无论PM<sub>2.5</sub>还是PM<sub>10</sub>的相关性系数都很高,其中相关程度最好的是一元二次函数模型,但其检验值*F*比线性函数模型小很多,因此研究采用线性函数模型来模拟气溶胶光学厚度和PM质量浓度最大值的关系,得到1/ $\varphi_{2.5}$ =160.846 2,  $\beta_{2.5}$ =30.791 2, 1/ $\varphi_{10}$ =297.034 9,  $\beta_{10}$ =32.155 0,所模拟的最大和最小值与总样本数据分布的情况如图2所示.大部分PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度的观测数据分布在所模拟的最大和最小值之间,可以认为该反演方法具有良好的有效性.但是由于所获取数据还存在一定的随机性,仍会产生一定的误差.在卫星遥感所获取的AOD数据大于1.5时,所估算出的PM质量浓度最大值远大于地面实测数据,其适用性有待改进.

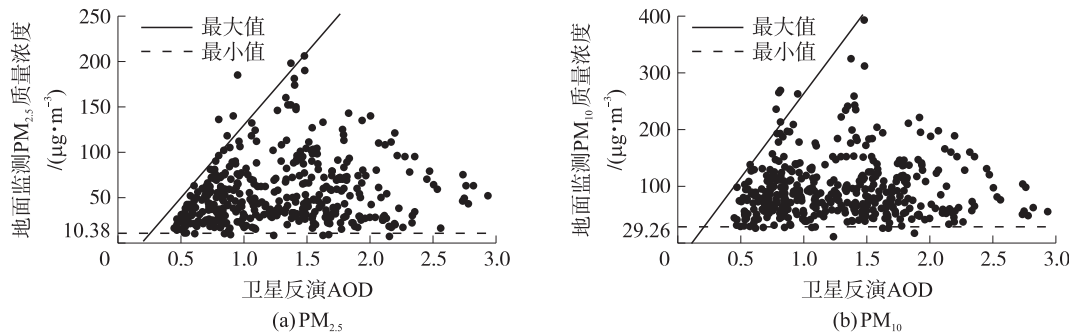


图2 模拟得到的PM值分布范围  
Fig.2 Distribution ranges of PM values simulated by the proposed algorithm

从数据样本中随机选取30组数据对估算方法进行检验,其结果如图3所示,可见反演方法所估算出的近地面PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>最大值均与地面监测结果呈现出较好的一致性,进一步得到如图4所示的反演结果与地面监测结果的对比.虽然估算PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>与地面监测结果的相关系数分别为0.571 4、0.470 9,但是几乎所有地面监测PM质量浓度都分布在所估算结果之内,表明本文所提方法在仅利用卫星遥感数据进行PM质量浓度分布范围的估算上取得了较好的效果.

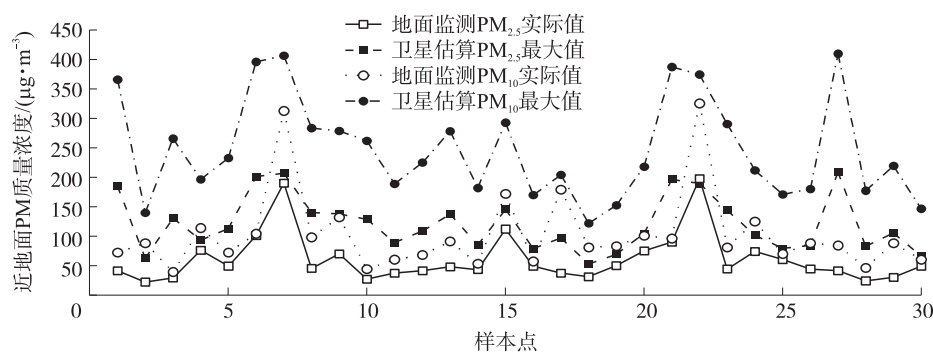


图3 近地面PM质量浓度的遥感反演与地面观测结果对比(样本30个)

Fig.3 Comparison between the retrieved PM extremums and the ground-based observations (30 samples)

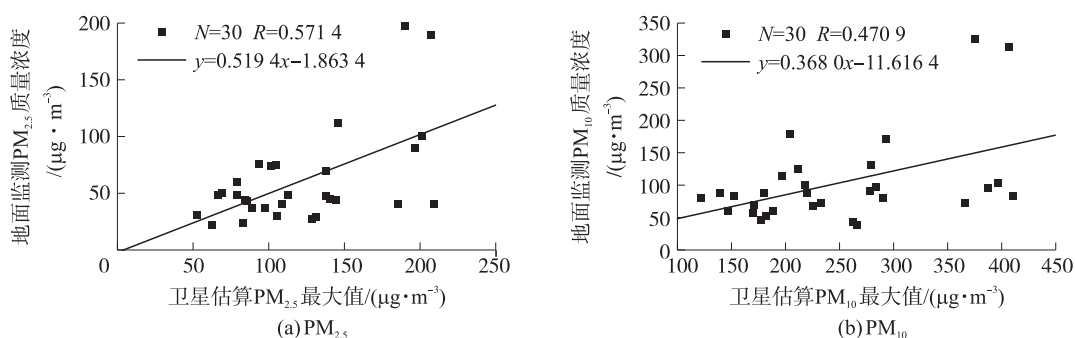


图4 估算的PM质量浓度最大值与地面监测结果的比较

Fig.4 Comparison between the retrieved PM maximums using the proposed algorithm and the ground-based observations

## 4 结语

本文提出了一种通过卫星遥感数据来直接估算近地面颗粒物质量浓度大致分布范围的方法,分别通过最小化、最大化气溶胶中除颗粒物以外成分含量的方式来估算颗粒物质量浓度最大值和最小值.以无锡地区开展算法的实验验证,利用MODIS卫星数据估算出近地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度数据,并与地面气象监测站点所观测到的结果进行对比研究,发现估算结果与地面监测结果呈现出较好的一致性,且几乎所有地面实测数据都分布在卫星数据所估算的范围之内,验证了该新方法在近地面PM质量浓度的卫星遥感监测方面具有较好的应用前景.同时证明在卫星遥感所获取的AOD小于1.5时,估算近地面PM污染情况大小范围的精度较高,而在AOD较高时的应用效果较差,这有待进一步研究.

## [参考文献]

- [1] 王晓利,张良,魏亚楠,等.城市间气态污染物与细颗粒物的相关性分析[J].中国环境监测,2016,32(1):1-4.
- [2] 凌亢,王浣尘,刘涛.城市经济发展与环境污染关系的统计研究:以南京市为例[J].统计研究,2001,10(1):46-52.
- [3] 王臻,王辰.可吸入颗粒物对呼吸系统危害的研究进展[J].国际呼吸杂志,2004,24(4):231-232.
- [4] 张丽亚,彭文英.首都圈雾霾天气成因及对策探讨[J].生态经济,2014,30(9):172-176.
- [5] ALEXANDRA K, JOHANNA K, GIETL, et al. In vitro toxicology of ambient particulate matter: correlation of cellular effects with particle size and components[J]. Environmental toxicology, 2013, 28(2): 76-86.
- [6] 陈水森,王重洋,刘尉,等.大气颗粒物遥感研究进展[J].热带地理,2015,35(1):1-6.
- [7] 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[J].中国科学,2005,35(1):177-186.
- [8] 史舟,梁宗正,杨媛媛,等.农业遥感研究现状与展望[J].农业机械学报,2015,46(2):247-260.
- [9] KAUFMAN Y J, TANRÉ D, REMER L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. Journal of geophysical research, 1997, 102(D14): 17 051-17 067.

- [10] MALM W C, DAY D E, KREIDENWEIS S M. Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: Part I-a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models[J]. Journal of the air & waste management association, 2000, 50(5): 686-700.
- [11] GERASOPOULOS E, ANDREA E M O, ZEREFOS C S, et al. Climatological aspects of aerosol optical properties in Northern Greece[J]. Atmospheric chemistry & physics, 2003, 3(6): 2 025-2 041.
- [12] CHENGCAI L, MAO J, LAU A K H, et al. Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing[J]. Science in China, 2005, 48(S2): 209-219.
- [13] TAO J H, ZHANG M G, CHEN L F, et al. A method to estimate concentrations of surface-level particulate matter using satellite-based aerosol optical thickness[J]. Science China earth science, 2013, 56(8): 1 422-1 433.
- [14] HADJIT H, OUKEBDANE A, BELBACHIR A H. Atmospheric correction of earth-observation remote sensing images by Monte Carlo method[J]. Journal of earth system science, 2013, 122(5): 1 219-1 235.
- [15] WANG Z, CHEN L, TAO J, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method[J]. Remote sensing of environment, 2010, 114(1): 50-63.
- [16] HOLBEN B N, TANRÉ D, SMIRNOV A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from aernet[J]. Journal of geophysical research, 2001, 106(D11): 12 067-12 097.
- [17] 戴燃坡, 谢勇, 马青玉. 基于两天 MODIS 数据的气溶胶光学厚度反演[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2016, 39(1): 139-144.
- [18] 宋挺, 黄君, 严飞, 等. 无锡市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM2.5 质量浓度的相关性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(1): 57-59.
- [19] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1 094-1 097.

[责任编辑: 丁 蓉]

## 《南京师大学报(自然科学版)》2016 年第 2 期刊发的论文 “具有随机扰动的吸血虫模型的稳定性”的补充说明:

1. 通讯联系人为邓超, 研究生;
2. 为说明式(7)无病平衡点在满足条件式(12)和式(13)下的稳定性, 我们给出如下数值模拟结果:

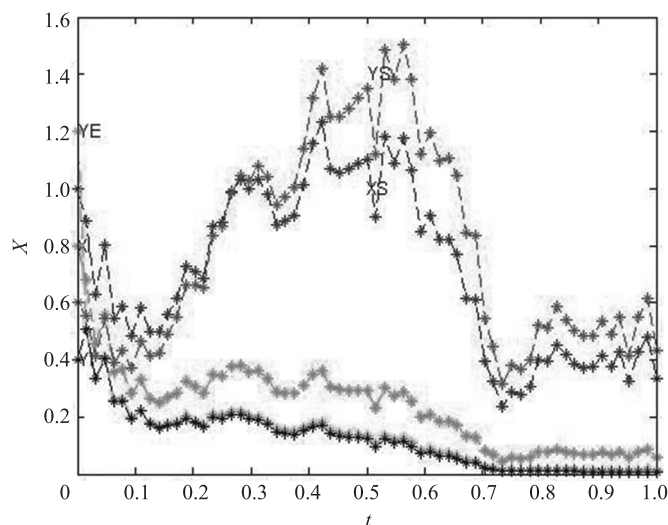


图  $A_x = \mu_x = \beta_x = \alpha_x = A_y = \mu_y = \beta_y = \alpha_y = \theta = 1$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ ,  $x_i(0) = 1$ ,  $x_i(0) = 0.8$ ,  $y_i(0) = 0.6$ ,  $y_i(0) = 1.2$ ,  $y_i(0) = 0.4$  时(7)解的数值模拟