

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM<sub>2.5</sub> ..... 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小红 (817)

北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究 ..... 林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)

气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析 ..... 浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)

密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析 ..... 路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)

冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量 ..... 何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)

2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 ..... 李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)

渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析 ..... 周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)

青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化 ..... 王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)

漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选 ..... 徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)

面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法 ..... 邹锐, 周环, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)

九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献 ..... 罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)

修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究 ..... 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)

去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究 ..... 李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)

北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究 ..... 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)

城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险 ..... 温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)

城市景观娱乐水体微生物风险评价 ..... 孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)

模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究 ..... 李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)

膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究 ..... 范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)

$\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究 ..... 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)

活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学 ..... 杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)

ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究 ..... 杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)

O<sub>3</sub>-BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律 ..... 余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)

规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究 ..... 王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)

连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 ..... 牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立 ..... 张超, 陈银广 (993)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟 ..... 张超, 陈银广 (998)

乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用 ..... 张超, 陈银广 (1004)

三峡水库两条支流水-气界面CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>通量比较初探 ..... 李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)

不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 ..... 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)

黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 ..... 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)

层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 ..... 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)

海州湾滩涂重金属污染的历史记录 ..... 张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)

草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 ..... 张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)

大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 ..... 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)

典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 ..... 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)

典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 ..... 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)

城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 ..... 陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)

典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 ..... 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)

生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 ..... 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)

三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究 ..... 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)

Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素 ..... 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)

新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 ..... 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)

青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源 ..... 何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)

太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 ..... 马召辉, 金军, 元奎奎, 王英, 姜霞, 何松浩, 李明圆 (1136)

典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析 ..... 刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)

柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性 ..... 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)

机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 ..... 牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)

污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 ..... 崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)

固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 ..... 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)

铸造废砂的环境毒性研究 ..... 张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)

Cr<sup>6+</sup>生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征 ..... 侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)

反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析 ..... 于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)

农业废物好氧堆肥中环境因子对*nirK*、*nirS*和*nosZ*数量的影响 ..... 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)

蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应 ..... 林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)

有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究 ..... 周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)

新建核电站风险信息沟通实证研究 ..... 贺桂珍, 吕永龙 (1218)

《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)

# BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM<sub>2.5</sub>

郭建平<sup>1</sup>, 吴业荣<sup>2</sup>, 张小曳<sup>1</sup>, 李小文<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院大气成分研究所, 北京 100081; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 近年来随着中国经济的快速发展, 中国区域的大气污染情况日趋严重, 大气污染监测与治理已刻不容缓. 由于卫星遥感具有较广的空间覆盖、成本低等优点, 卫星遥感反演气溶胶光学厚度(AOD)产品被普遍认为是地面PM<sub>2.5</sub>浓度的重要指标, 且已被广泛地应用于地面PM<sub>2.5</sub>遥感监测. 利用2007~2008年的MODIS/Terra气溶胶光学厚度产品, 考虑中国东部地区5个大气成分站点风速、风向、温度、湿度和边界层高度等气象数据, 构建后向(BP)神经网络, 提出了基于MODIS AOD产品估算PM<sub>2.5</sub>的模型. 利用5个大气成分站点PM<sub>2.5</sub>观测数据对模型进行散点拟合和时间序列拟合验证, 结果表明: ①从PM<sub>2.5</sub>观测值与估算值的散点回归分析来看, PM<sub>2.5</sub>估算值与观测值相关系数最好的为庐山站( $R=0.6$ ), 其它4个站次之, 但其相关系数均在0.4(中强相关)以上; ②从PM<sub>2.5</sub>观测值与估算值的时间序列比对分析来看, PM<sub>2.5</sub>估算值和观测值差值随时间变化而变化, 且存在明显的日际振荡现象, 但经相邻5 d滑动平均处理, 5个站点的PM<sub>2.5</sub>估算值与观测值相关系数得到普遍提升, 滑动后的相关系数 $R_{MA}$ 均在0.7以上(除郑州外), 庐山 $R_{MA}$ 达到0.83. 结果表明在BP网络框架下, 基于MODIS AOD产品估算PM<sub>2.5</sub>的模型能较好地应用于PM<sub>2.5</sub>监测.

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 气溶胶光学厚度; MODIS; BP神经网络; 相关系数

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0817-09

## Estimation of PM<sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network

GUO Jian-ping<sup>1</sup>, WU Ye-rong<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-ye<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>2</sup>

(1. Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With the fast economic development in China in recent years, air pollutions are becoming increasingly serious. It is, therefore, imperative to develop new technology to solve this issue. Due to the wide spatial coverage of satellite remote sensing, along with the relatively lower cost compared to ground-based in situ aerosol measurements, satellite retrieved aerosol optical depth (AOD) is widely recognized as a good surrogate of surface PM<sub>2.5</sub> concentrations. In this study, two years (2007-2008) of AOD data from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) onboard Terra at five observational sites of China (Benxi, Zhengzhou, Lushan, Nanning, Guilin), combined with five meteorological factors such as wind speed, wind direction, temperature humidity and planetary boundary height, were used as important input to establish the Back Propagation (BP) neural networks model, which was applied to estimate PM<sub>2.5</sub>. Afterwards, the model estimated PM<sub>2.5</sub> was validated by in situ PM<sub>2.5</sub> measurements from the five sites. Specially, scatter analysis showed that the linear correlation coefficient ( $R$ ) between ground PM<sub>2.5</sub> observation and model estimated PM<sub>2.5</sub> at Lushan was the highest ( $R=0.6$ ), whereas the  $R$  values at the four other sites were lower, ranging from 0.43 to 0.49. Time series validations were performed as well, indicating that the  $R$  value significantly varied from day to day. However, the  $R$  value could be significantly improved by fitting the five-day moving average ground observation values against the model estimated PM<sub>2.5</sub> data. Also, the  $R$  value at Lushan was the highest ( $R=0.83$ ), suggesting that MODIS AOD can be used to monitor PM<sub>2.5</sub> by the BP networks model developed in this study.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; aerosol optical depth (AOD); moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS); BP neural network; correlation coefficient

近年来, 大气污染是大多数发展中国家在工业化过程中普遍面临的一个难题. 20世纪末, 经济规模的剧增使得中国极大地加剧了对能源的需求, 其中煤的消耗使得中国人为污染更加严重, 燃煤造成城市空气中悬浮颗粒物(TSP)上升<sup>[1]</sup>, 进而导致中国大部分经济发达地区, 尤其是中国东部地区空气污染日趋严重, 灰霾天气出现频率呈增多趋势<sup>[2]</sup>.

而可吸入颗粒物PM<sub>2.5</sub>, 也就是空气动力学粒径小于2.5 μm的颗粒物, 不仅能进入人体呼吸系统, 直至

收稿日期: 2012-05-20; 修订日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171294); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206040); 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2011Y002)

作者简介: 郭建平(1978~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向气溶胶卫星遥感反演和大气环境监测, E-mail: jgguo@cams.cma.gov.cn

人的肺泡组织,直接危害到人体健康.一系列研究表明,含有各种微生物或生物大分子的生物气溶胶能引起各种呼吸道疾病,这种气溶胶的健康效应已经受到医学界的广泛关注<sup>[3-6]</sup>.此外,气溶胶不仅通过直接反射或吸收太阳辐射,对气候系统产生直接辐射强迫作用,而且可作为凝结核,通过改变云的微物理参数,如云滴数浓度、云滴有效半径、云的反照率,进而改变云的生命期,从而对气候系统产生间接的辐射强迫作用,包括第一间接效应(也叫 Twomey 效应<sup>[7]</sup>)和第二间接效应(也叫 Albrecht 效应<sup>[8]</sup>).因此,通过各种观测手段及时有效准确地获取地面  $PM_{2.5}$  浓度信息具有非常重要的科学价值和环境气候意义.

$PM_{2.5}$  地面测量虽然是直接获取近地面大气气溶胶浓度信息的主要方式,但由于  $PM_{2.5}$  地面监测站运营成本高,总的地面监测站数量有限,使得地面站只能获取局地小范围内的  $PM_{2.5}$  浓度信息.如此一来,地面站很难满足全面准确的空气质量监测要求,即掌握气溶胶较大空间范围空气污染的监测.而用遥感的手段恰能弥补地面监测站监测空间范围小的不足.因此,许多学者尝试用卫星遥感的方法对近地面气溶胶浓度进行监测与预报<sup>[9]</sup>,而遥感估算  $PM_{2.5}$  是基于卫星遥感气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)展开的.

研究表明 AOD 与  $PM_{2.5}$  有很强的相关性<sup>[9]</sup>. Chu 等<sup>[10]</sup>在 2003 年研究意大利北部  $PM_{10}$  时发现,中等分辨率成像光谱仪(MODIS) AOD 产品有应用在空气质量监测方面的潜力,并提出在非理想条件下,需要加入气溶胶廓线、气溶胶类型、气溶胶属性、时间变量等进行进一步研究. Koelemeijer 等<sup>[11]</sup>在 2006 年研究欧洲地区的气溶胶时,把气溶胶类型分为农村型和郊区型,同时考虑边界层高度(PBLH)和空气相对湿度(RH)等气象因子,得到了较好 PM 与 MODIS AOD 相关系数.同年, Gupta 等<sup>[12]</sup>在研究全球 26 个地区的气溶胶空间分布时发现,云盖比例与混合层高度会影响 MODIS AOD 与 PM 之间的相关性.当云盖比例低时, AOD-PM 相关性较高,而两者的相关性随混合层高度升高而变弱.鉴于影响遥感 AOD 估算 PM 精度的相关因素较多, Liu 等<sup>[13]</sup>于 2007 年在美国 St. Louis 地区建立了两个一般的线性回归模型来比较 MISR AOD 和 MODIS AOD 估算近地面  $PM_{2.5}$  的能力.模型通过将风速、风向、边界层高度、季节及温度等数据考虑进来, MISR AOD/MODIS AOD 与日平均  $PM_{2.5}$  的相

关系数度分别达到 0.62、0.51,但作者没有把空气相对湿度(RH)考虑进来.

考虑到我国环保部门直到 2012 年才把  $PM_{2.5}$  的监测纳入业务体系,因此,为了探讨卫星遥感估算近地面  $PM_{2.5}$  的可行性,国内一些学者如李成才等<sup>[14]</sup>曾尝试将 MODIS AOD 产品与北京空气污染指数进行长期比较,一定程度上证明了卫星遥感在大气污染监测的潜力.张文宗等<sup>[15]</sup>在利用 MODIS 卫星资料反演河北省晴天大气 AOD 的基础上,将河北省 11 个城市地面监测站观测到的可吸入颗粒物  $PM_{10}$  浓度值与对应的 AOD 值作了相关分析,建立了 AOD 与  $PM_{10}$  的关系模型,发现两者的相关系数达 0.54. Guo 等<sup>[16]</sup>利用 2007~2008 年通过分析中国东部地区 11 个观测站监测  $PM_{2.5}$  数据与卫星遥感反演 AOD 之间的相关性,探讨了卫星遥感估算近地面  $PM_{2.5}$  的可行性及可能影响因素.结果表明,在考虑气溶胶吸湿增长条件下, MODIS AOD 与  $PM_{2.5}$  相关系数明显提高,证明了 RH 是一个影响遥感估算  $PM_{2.5}$  的非常重要的一个气象因子.

目前,从 MODIS 或者其它卫星传感器 AOD 产品估算近地面  $PM_{2.5}$  浓度的研究较多地使用简单的统计回归方法<sup>[10,13,15]</sup>.从物理定义上来看,卫星遥感 AOD 表征的是在无云大气铅直大气气柱中气溶胶散射造成的消光系数在垂直方向上的积分,无量纲;而  $PM_{2.5}$  要表征的是在某一个电上测量的气溶胶估算精度较高的地面点上的  $PM_{2.5}$  浓度,涉及温度、湿度、风速、风向、边界层高度等相关的诸多因素.这些因素当中有些与 AOD 和  $PM_{2.5}$  呈线性相关,有些呈非线性相关.因此为了尽可能提高遥感 AOD 估算  $PM_{2.5}$  的精度,本研究在充分考虑风速、风向、温度、湿度及边界层高度等多因素对 AOD-PM 表达式影响的基础上,利用 2007~2008 年中国东部地区 5 个站点数据,提出了 BP 神经网络来构建 AOD 估算  $PM_{2.5}$  的非线性模型.并在此模型框架下讨论了 5 个站点的  $PM_{2.5}$  的季节分布规律,并利用  $PM_{2.5}$  近地面观测值进行了模型验证,以期为中国空气质量监测及控制和进一步研究中国地区  $PM_{2.5}$  浓度分布及变化特征提供科学依据和数据支持.

## 1 数据

### 1.1 MODIS AOD 产品

搭载在美国 NASA 上午星 Terra 上的新一代图谱成像仪 MODIS 传感器,在 0.4~14.4  $\mu m$  光谱范

国内设置了 36 个离散通道,分辨率从 250 m ~ 1 km. 由于 MODIS 的 swath 幅宽达 2 300 km,因而能在除赤道及低纬度地区以外的地区实现每天覆盖全球一次,并广泛地应用于生态、农业、大气环境监测等领域. 目前,MODIS AOD 的业务算法主要采用第二代暗目标算法(dark target,DT)<sup>[17]</sup>,可分别提供 10 km 和 1 度分辨率的气溶胶二级和三级 AOD 产品<sup>[18]</sup>. 第二代 DT 算法与之前的算法有了很大的改进,精度明显提升,详见文献[17]. MODIS AOD 产品在全球陆地上空的精度为  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.15\tau$  ( $\tau$  表示 AOD),而海洋上空精度较好,达到  $\Delta\tau = \pm 0.03 \pm 0.05\tau$ <sup>[18]</sup>. 本研究所用的 2007 ~ 2008 年的 MODIS MOD04 AOD 二级产品数据是基于 V5.2 算法(亦属于第二代 DT 算法)反演得到的. 考虑到 MODIS AOD 产品在是中国地区的精度适用性问题,许多验证研究已成功进行. 李成才等<sup>[19]</sup>在香港用地面太阳光度计测量的数据,对 MODIS AOD 进行比较,产品误差为 15% ~ 20%. 为了验证 MODIS AOD 产品在中国北方地区的适用性,Li 等<sup>[20,21]</sup>利用北京地区地面观测气溶胶对 MODIS AOD 产品精度进行了广泛而深入的验证,得出产品误差为 19.7%. 上述验证研究表明,MODIS AOD 可用于本研究 PM<sub>2.5</sub> 卫星遥感估算.

## 1.2 地面监测站 PM 数据及气象数据

为了研究中国东部地区污染情况,本研究获取了中国气象局大气观测网络(China atmosphere watch network, CAWNET)在中国东部地区的 5 个大气成分站 PM<sub>2.5</sub> 观测数据(见图 1)<sup>[22]</sup>. CAWNET 自 2006 创建以来,已被广泛应用于以各站点为中心的区域气溶胶污染物浓度水平监测. CAWNET 主要采用 GRIMM 180 (Grimm 180 Multi-channel Aerosol Spectrometer)气溶胶粒径谱仪对 PM<sub>2.5</sub> 以每 5 min 间隔近乎连续的采样方式进行动态监测. 为了与 Terra 卫星观测时间匹配,以 MODIS/Terra 过境时间(10:30)为中心前后各半小时内的 PM<sub>2.5</sub> 数据进行研究,即 10:00 ~ 11:00 的观测数据. 如表 1 所示,5 个地面大气成分站分别为本溪、郑州、庐山、桂林和南宁,最北端为本溪,最南端为南宁. 这些站点大致处在东经 118° 往东,基本呈一条直线从南到北分散在中国东部. 5 个站点之中,有 3 个站点处在城市之中,本溪和庐山等 2 个站点处在山区.

边界层是地表摩擦以及热过程和蒸发显著、处在对流层底端、靠近地面的大气层<sup>[23]</sup>. 边界层高度 PBLH 可影响大气污染物的扩散和聚集,是一个非

常重要的可影响 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布的气象因素. 已有研究表明,欧洲大部分地区边界层高度 PBLH 的变化会显著改变 AOD-PM 相关性,证明其受 PBLH 影响<sup>[11,24]</sup>. 因此,本研究中也考虑进来. PBLH 数据由 NCEP (National Weather Service's National Centers for Environmental Prediction) 同化系统提供的再分析数据获取,时间分辨率为 3 h,空间分辨率 1° × 1°,能较好地匹配 MODIS AOD 产品. 风速、风向、温度、湿度数据均来自中国气象局气象观测站网实册数据,时间与 PM<sub>2.5</sub> 数据保持一致.

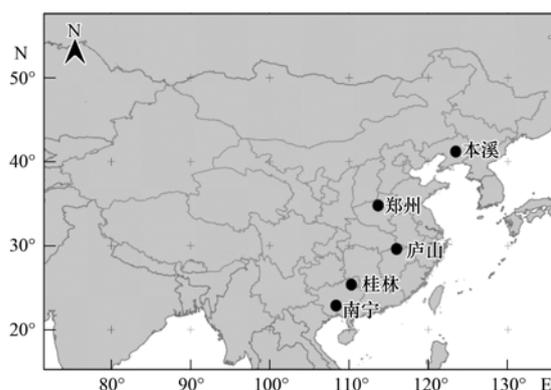


图 1 PM<sub>2.5</sub> 监测站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> observational sites in eastern China

表 1 5 个 PM<sub>2.5</sub> 观测站点地理位置与地区类型

Table 1 Geographic locations of the five PM<sub>2.5</sub> observational sites in eastern China and their corresponding land surface types

站点	纬度/(°)	经度/(°)	地表类型
本溪	41.19	123.47	山区
郑州	34.78	113.68	城市
庐山	29.57	115.99	山区
桂林	25.32	110.30	城市
南宁	22.82	108.35	城市

## 2 研究方法

与一般的统计回归相比,神经网络有着非常优越的多变量非线性拟合能力. 为建立遥感 AOD 估算 PM 模型,需要结合尽可能多的气象影响因子. 而 ANN (artificial neural network, 人工神经网络) 方法已被广泛且很好地应用于空气污染估算<sup>[25~31]</sup>. 同时,神经网络中最常用的是 BP 网络——也称误差后向传播神经网络<sup>[31,32]</sup>. 故本研究基于遥感 AOD,用 BP 神经网络来构建 PM 估算模型. 结合前人的一些研究成果,将 BP 网络的输入参数确定为 AOD、边界层高度、相对湿度、空气温度、风速与风向以及数据对应的月份共 7 个参数. 由于 MODIS AOD 数据为面数据,为了精确匹配点尺度上地面站

点数据,本研究选择  $1 \times 1$  像素 AOD 来估算  $PM_{2.5}$ .

## 2.1 BP 网络算法介绍

BP 网络算法,亦称误差后向传播网络算法,其基本原理:建立多层前馈网络(feed-forward network)并进行网络初始化.前馈网络包含 3 层,其中第一层与最后一层称为输入层与输出层,而这两层之间的网络层称为隐含层.然后利用输入层与下一层网络之间的权重和偏置,将输入层中的输入参数作一个线性变换输入到与其相邻网络层各个结点中,并代入此层结点中传递函数,此传递函数一般为线性或非线性函数,接着将传递函数输出结果作为下一层的输入参数继续向前运算,这一过程也称为前馈计算.当函数输出结果从输出层输出时,将网络输出值与相关目标值进行比较,得到它们之间的差值,然后将此差值按照一定的数学规则向后传播,这一过程也称为误差后向传播,并据此调整各层结点之间的连接权重,重新从输入层开始向前运算,使得新的输出值与其相关目标值之间的差值不断变小,不断重复上述过程.当误差值等于或小于预期值(goal)时,迭代运算停止,BP 网络训练完成.此时,将训练好的 BP 网络保存,用于下一步的仿真测试.简而言之,BP 网络训练可以概括为两种运算:前馈计算和误差后向传播.

## 2.2 BP 网络具体实施步骤

BP 网络遥感 AOD 估算  $PM_{2.5}$  模型分成四大步骤:数据预处理、网络构建、网络训练及数据仿真.

### 2.2.1 数据预处理

由于影响卫星遥感估算  $PM_{2.5}$  值的数据来源多样,且数据值域差别大,因此,在构建 BP 网络的过程中,首先得对各种输入数据进行预处理,主要是对所有输入数据进行归一化处理,即把不同种类的数据统一到  $0 \sim 1$  的范围,消除数据量纲,以加快 BP 网络的运算速度,具体归一化公式如下:

$$v_{\text{norm}} = 0.5 \left( \frac{v - v_{\text{mean}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}} \right) + 0.5$$

式中, $v_{\text{norm}}$  和  $v$  分别为归一化之后和之前的变量值, $v_{\text{max}}$ 、 $v_{\text{min}}$  和  $v_{\text{mean}}$  分别为变量  $v$  的最大值、最小值及平均值.然后,将每个站每组归一化之后的数据样本按一定百分比随机分成 3 类子数据集:训练数据(60%)、验证数据(20%)、测试数据(20%).验证数据主要是为了防止网络训练时过拟合,而为了保证可对所有数据进行测试,本研究实行交叉验证的方法.最后,利用 Matlab 随机函数将每组数据分成 5 份,依次按测试数据、验证数据、训练数据顺序分

配 1、1、3 份,从而用 5 次训练与仿真就能估算整个样本的  $PM_{2.5}$  数据.

### 2.2.2 BP 网络创建并初始化

在 Matlab 软件框架下,用 Matlab 自带 newff() 函数创建多层前馈网络,该网络是一个框架性网络.接下来,需要对网络初进行初始化,主要是设置网络连接权重及偏置、隐含层数及其结点数,明确隐含层及输出层传递函数类型,计算训练算法迭代次数,最终明确训练目标.具体见如下四方面描述.

#### (1) 初始权重和偏置设置

采用 newff 函数的默认设置,即采用随机的方法分配各输入层、中间层及输出层的权重和偏置.

#### (2) 隐含层数及其结点数设置

一般情况下,在隐含层数为 1 的时候 BP 网络训练效果较好<sup>[33]</sup>,多个隐含层虽然会得到更高的训练精度,但往往造成样本训练过度,最终导致其在仿真测试中更差的效果<sup>[34]</sup>.故在此选一层隐含层.同时,根据参考文献[35]的研究结论,即隐含层的结点数在  $2n^{1/2} + u \sim 2n + 1$  范围内效果较好,式中  $n$  为输入层结点数, $u$  为输出层结点数.由于本研究的网络输入层结点数  $n = 7$ , $u = 1$ ,所以隐含层结点数介于  $6 \sim 15$  之间.在接下来 2.2.3 节的网络训练过程中对  $6 \sim 15$  个隐含层结点进行逐一测试,以选择最合适的隐含层结点数.

#### (3) 明确隐含层和输出层传递函数

隐含层一般选 S 型函数,主要包括双曲正切 S 型  $\text{tansig} = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$  和对数 S 型  $\text{logsig} = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ ,式中  $x$  为函数的自由变量.输出层选线性函数,如  $\text{purelin} = x$ ,其中  $x$  为函数的自由变量<sup>[36]</sup>.为了测试两种 S 型函数的训练效果,本研究选用样本数较多的郑州站(样本数约为 200)为例进行测试.结果表明隐含层传递函数选用对数 S 型函数即  $\text{logsig}$  函数效果较好.

#### (4) 迭代次数与训练目标

由于采用贝叶斯正则化算法收敛较快,尤其是在训练误差较小时,误差逐渐趋于平滑.此外,验证数据在训练过程中会进行检测,在此本研究用验证数据的平方根误差  $E^{\text{val}}$  进行判断:

$$E^{\text{val}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i^{\text{val}} - t_i^{\text{val}})^2$$

式中, $o_i^{\text{val}}$ 、 $t_i^{\text{val}}$ 、 $N$  分别为验证数据中的某个网络预测值和实际观测值, $N$  为验证样本数量.其方法为:在 2.2.3 节的网络训练过程中,验证数据的平方根

误差会随着迭代次数的增加而减小,当减小到一定程度时,一般不再发生变化. 如果验证数据的平方根误差上升,而迭代停止,完成训练. 迭代次数不宜过大,故在此我们确定迭代次数为1 000,训练目标为0.001.

### 2.2.3 网络训练

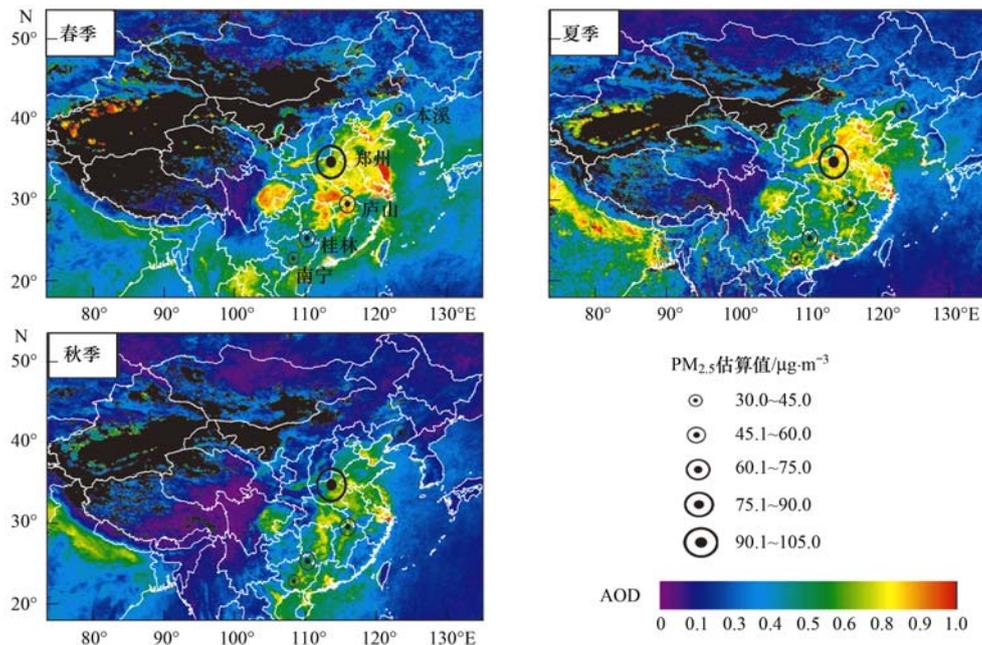
考虑到 PM<sub>2.5</sub>空间分布的差异性,本研究对5个大气成分站分别构建单独的BP模型,即每个站对应一个BP模型,分别用对应站点的BP模型来估算PM<sub>2.5</sub>. 在网络训练过程中,同样用平方根误差评价网络训练的好坏. 公式与验证数据的平方根误差类似,将验证数据替换成训练数据即变成训练数据的平方根误差公式. 用训练数据平方根误差最小值来选出每个站的最佳隐含层结点数、连接权重和偏置,从而确定每个站对应的BP模型.

### 2.2.4 正式训练与仿真测试

通过上述步骤确定的5个BP模型现可以正式地训练和仿真数据,按2.2.2节给出的交叉验证方法,对每一组样本进行训练和仿真. 仿真运算之后,利用公式求变量 $v$ ,即对仿真数据反归一化,这样就得到BP估算出的PM<sub>2.5</sub>数据.

## 3 结果与讨论

### 3.1 站点 PM<sub>2.5</sub> 季节分布



黑色区域表示无效值

图2 中国区域2007年春、夏、秋等3个季节MODIS/Terra AOD(550 nm)平均值及5个大气成分站点观测PM<sub>2.5</sub>季节平均值空间分布

Fig. 2 Seasonal averages of AOD (at 550 nm) retrieved from MODIS/Terra in China in spring, summer and autumn of the year 2007, overlaid with in situ PM<sub>2.5</sub> measurements at the five sites shown in Fig. 1

气溶胶浓度水平不仅具有空间变异性,而且其变化往往具有很强的季节性,这是由于随着季节推移,气象条件、下垫面以及污染源都不同程度地变化导致的. 目前,MODIS AOD产品可获得比较可靠的区域气溶胶污染浓度水平,而PM区域分布的估算需要构建合适的AOD-PM关系模型. 因此,为描述气溶胶时空变化特征,笔者计算出2007年覆盖中国地区的MODIS Terra AOD数据,以及图1所示5个站点相应BP网络模型PM<sub>2.5</sub>估算值的春、夏和秋季季节平均(图2). 鉴于中国大部分地区冬季有大量冰雪覆盖(尤其2008年百年一遇的雪灾),MODIS AOD产品由于其算法本身的局限性,其AOD产品精度对于高亮地表存在很大的不确定性,故本研究中不考虑冬季的AOD时空分布.

从图2可以看出,卫星遥感AOD和地面观测PM<sub>2.5</sub>存在一定程度的差异性,如在庐山、桂林、南宁三地夏季地面观测平均PM<sub>2.5</sub>浓度存在一定的变化,而MODIS AOD并没有体现. 这一定程度上证明通过MODIS AOD产品估算近地面PM<sub>2.5</sub>还需要考虑多个因素.

### 3.2 PM<sub>2.5</sub>估算值与观测值相关性评价

笔者将主要从PM<sub>2.5</sub>观测值与BP网络PM<sub>2.5</sub>估算值入手,进行两者之间的散点回归分析与时间序列分析. 首先,将2007~2008年5个站PM<sub>2.5</sub>

观测值与对应的  $PM_{2.5}$  BP 网络估算值作一个散点回归(见图 3),除庐山站  $PM_{2.5}$  观测值与估算值的线性相关系数较好以外( $R = 0.6$ ),其余 4 个站  $PM_{2.5}$  观测值与估算值的线性相关性均比较低(在 0.45 左右). 需要强调的是为了保证 MODIS AOD 与地面观测  $PM_{2.5}$  空间匹配一致性,笔者首先提取了  $1 \times 1$  像素(10 km)的 MODIS AOD 值,然后再与对应站点的地面观测  $PM_{2.5}$  进行数据对匹配. 虽然上述空间匹配方案在一定程度上保证了 AOD 的精确性,但由于 MODIS 数据几何校正的偏差及站点地形崎岖的原因,这种方案相对于  $3 \times 3$  像素等平均方案,往往会造成该地区 AOD 的较大不确定性<sup>[16]</sup>. 即便同样是山区类型站点的庐山与本溪,

两者的  $PM_{2.5}$  观测值与估算值相关系数结果相差比较大. 因此,研究中得到的  $PM_{2.5}$  观测值与估算值的线性相关系数普遍不高的原因可能是研究区地形复杂导致的,可望通过采用不同的 MODIS AOD 空间匹配方案解决. 另一个原因可能是 MODIS AOD 与其它气象数据存在一定的偏差导致 BP 网络估算结果存在较大偏差. Li 等<sup>[19~21]</sup> 在中国部分地区验证 NASA 发布的 MODIS AOD 产品,发现其存在 15% ~ 20% 的误差;而由 NCEP 提供的空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$  PBLH 数据与  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  分辨率的 MODIS AOD 数据在空间匹配还存在一定问题,且 PBLH 为再分析数据,是数值模式输出结果,本身存在一定误差<sup>[37]</sup>.

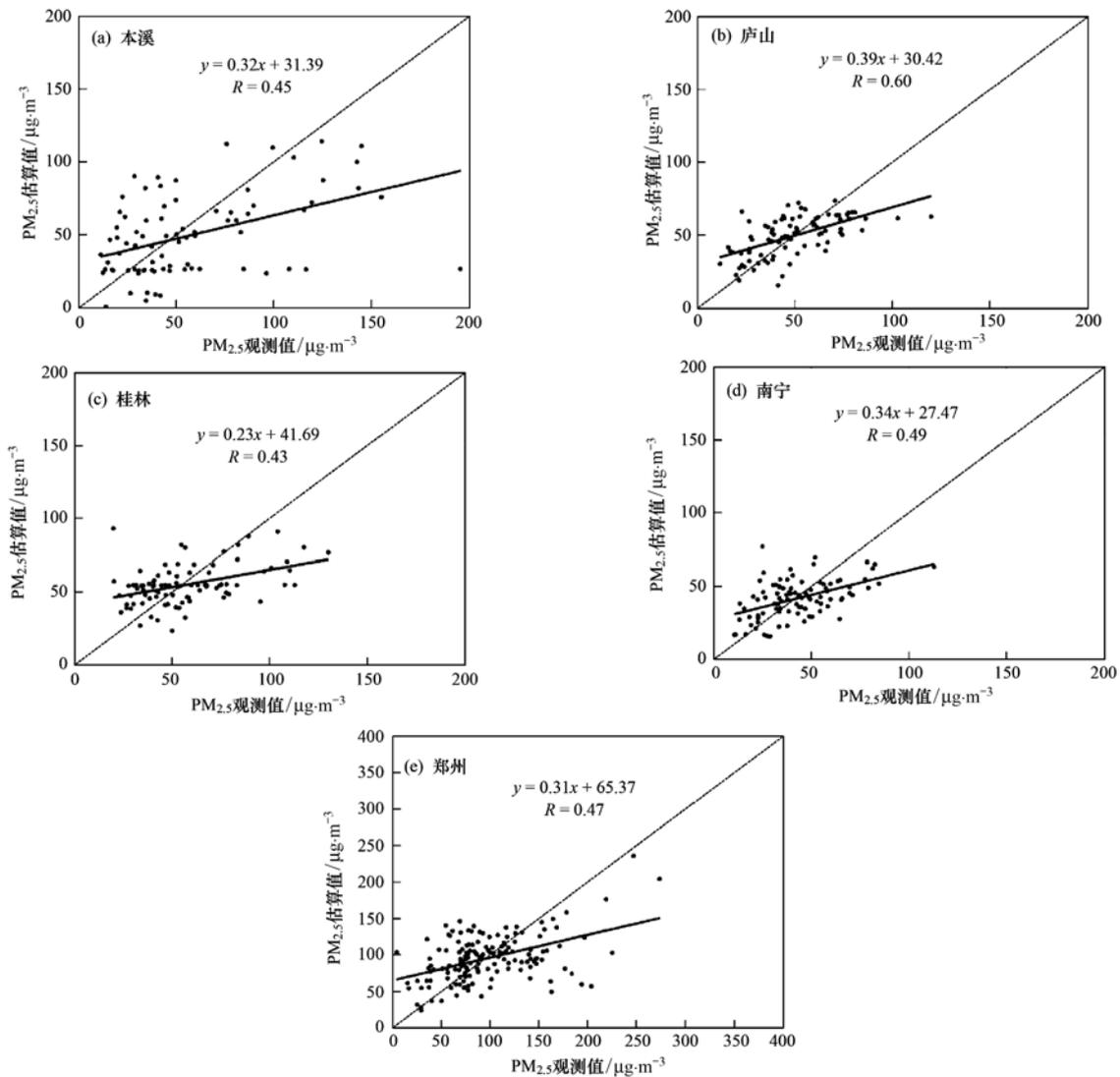


图 3 本溪、庐山、桂林、南宁和郑州等 5 个大气成分站点的  $PM_{2.5}$  观测值与 BP 网络模型估算值散点分布

Fig. 3 Scatter plots of in situ  $PM_{2.5}$  concentrations against estimated counterparts from BP networks at Benxi, Lushan, Guilin, Nanning and Zhenzhou sites

为了检验 BP 网络模型在拟合 PM<sub>2.5</sub> 时间序列方面的能力,图 4 显示了 PM<sub>2.5</sub> 观测值与 BP 网络 PM<sub>2.5</sub> 估算值 2007 年的时间序列变化. 为了尽可能消除上述原因所引起的拟合结果偏差,本研究同时对 PM<sub>2.5</sub> 观测值与 BP 网络模型估算值采用了相邻 5 d 的滑动平均处理(图 4). 每个站有 2 对曲线,1 对为没有经过滑动平均处理的观测(黑色)与估算

PM<sub>2.5</sub>(红色),另 1 对则是经过相邻 5 d 滑动平均处理的较粗曲线. 经滑动平均处理后,5 个站点的 PM<sub>2.5</sub> 估算值与观测值相关系数得到普遍提升. 总体来看,滑动后的相关系数  $R_{MA}$  均在 0.7 以上,庐山  $R_{MA}$  达到 0.83. 这种滑动平均的处理方法属于时间采样平均方案,与前述的 MODIS AOD 空间采样方案类似,但是滑动平均是通过相邻时间点上的数

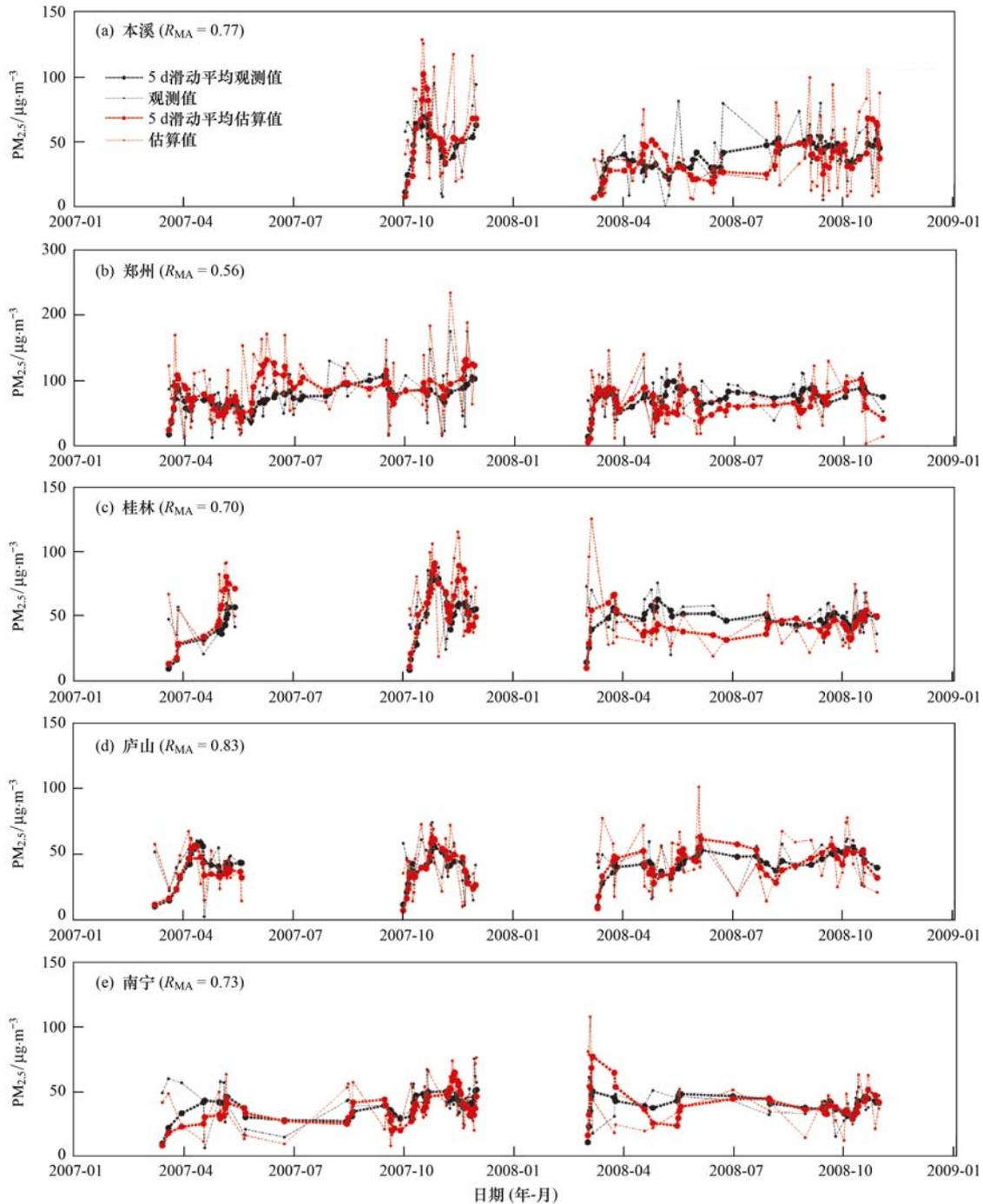


图 4 本溪、庐山、桂林、南宁和郑州等 5 个大气成分站点 PM<sub>2.5</sub> 观测值与 BP 网络估算值时间序列比较

Fig. 4 Time series inter-comparisons between in situ PM<sub>2.5</sub> concentrations against estimated counterparts from BP networks at the five sites

据取算术平均替代原始数据的一种处理方法,这种方法既能较好地保证原始数据的大体变化特征与趋势,又能一定程度上消除数据偏差. 同时也可很好地证明 BP 网络  $PM_{2.5}$  估算模型的准确性和适应性.

图 4 显示,2007 年 5 个站点的  $PM_{2.5}$  数据除郑州数据较全外,其它 4 个站数据存在不同程度地缺失,缺失比较明显(主要为夏季)的有桂林、庐山和南宁,这 3 个南方站点主要由于夏季云雨发生次数较多,导致其上空多云覆盖,进而 MODIS AOD 无有效反演值,最终导致  $PM_{2.5}$  观测值无法匹配 AOD. 而本溪站主要是由于观测数据缺失而导致图中无时间序列值. 其中,5 个站中绝大部分时间点上的日均  $PM_{2.5}$  质量浓度均在  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,郑州站的  $PM_{2.5}$  有些时期更是突破  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,大大超过了平均小时浓度  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的世界卫生组织(WHO)过渡期第 1 阶段目标值.

#### 4 结论

(1)BP 网络模型具有很强地揭示地区可吸入颗粒物  $PM_{2.5}$  的能力. 根据 5 个站点估算结果,郑州  $PM_{2.5}$  质量浓度在春夏秋等 3 个季节一直处于较高水平( $93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上),空气污染是 5 个站中最严重的,最轻的是南宁( $PM_{2.5}$  均在  $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下),这些结果与地面站点观测基本吻合.

(2)从  $PM_{2.5}$  观测值与估算值的散点回归分析来看, $PM_{2.5}$  估算值与观测值相关系数最好的为庐山( $R=0.6$ ),其它 4 个站次之,但其  $PM_{2.5}$  估算值与观测值相关系数也在 0.4 以上. 由于 MODIS 数据几何校正的偏差及站点地形崎岖的原因,这种方案同时又会造成本地区 AOD 的较大不确定性. 像同样为山区类型的庐山与本溪,两者的  $PM_{2.5}$  观测值与估算值相关系数结果相差比较大. 将来还需要考虑遥感数据估算 PM 空间尺度敏感性等问题,例如对卫星 AOD 数据采取  $3\times 3$ 、 $5\times 5$  像素平均.

(3)从  $PM_{2.5}$  观测值与估算值的时间序列拟合分析来看, $PM_{2.5}$  估算值和观测值之间存在随时间而振荡的现象. 经相邻 5 d 滑动平均处理,一定程度上消除观测与估算数据带来的偏差,同时又保证数据变化的大体趋势,5 个站点的  $PM_{2.5}$  估算值与观测值相关系数得到普遍提升,滑动后的相关系数均在 0.7 以上(除郑州外),庐山  $R_{MA}$  达到 0.83.

(4)通过对地面站点观测  $PM_{2.5}$  数据与 BP 网络模型估算  $PM_{2.5}$  值进行散点拟合和时间序列拟合分析,表明该 BP 模型估算  $PM_{2.5}$  精度较好,具有推广

到卫星遥感空气污染监测的现实价值. 同时由于 BP 网络参数设置涉及到训练目标(也就是期望误差)、网络层数结点数、传递函数等参数选择,可以在将来进行多次实验,选出相对较优的参数配置构建模型,进一步提升  $PM_{2.5}$  估算精度. 同时卫星遥感估算  $PM_{2.5}$  理论还需进一步发展,以提高  $PM_{2.5}$  估算精度,为未来空气质量监测与大气污染控制发挥更大的作用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张继娟,魏世强. 我国城市大气污染现状与特点[J]. 四川环境, 2006, **25**(3): 104-108, 112.
- [ 2 ] Guo J P, Zhang X Y, Wu Y R, *et al.* Spatio-temporal variation trends of satellite-based aerosol optical depth in China during 1980-2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (37): 6802-6811.
- [ 3 ] Dockery D, Pope C, Xu X, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities [J]. *New England Journal of Medicine*, 1994, **329**(24): 1753-1759.
- [ 4 ] 车凤翔. 中国城市气溶胶危害评价[J]. 中国粉体技术, 1999, **5**(3): 4-10.
- [ 5 ] Laden F, Neas L M, Dockery D W, *et al.* Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2000, **108** (10): 941-947.
- [ 6 ] Samet J M, Dominici F, C. Curriero F, *et al.* Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U. S. Cities, 1987-1994 [J]. *New England Journal of Medicine*, 2000, **343** (24): 1742-1749.
- [ 7 ] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, **34**(7): 1149-1152.
- [ 8 ] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 1989, **245**(4923): 1227-1230.
- [ 9 ] Hoff R M, Brook J R, Green M, *et al.* Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised Land? [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, **59**(10): 1130-1138.
- [ 10 ] 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) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (D21): 4661, doi: 10.1029/2002JD003179.
- [ 11 ] Koelemeijer R B A, Homan C D, Matthijsen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(27): 5304-5315.
- [ 12 ] Gupta P, Christopher S A, Wang J, *et al.* Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (30): 5880-5892.
- [ 13 ] Liu Y, Franklin M, Kahn R, *et al.* Using aerosol optical

- thickness to predict ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the St. Louis area: a comparison between MISR and MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **107**(1-2): 33-44.
- [14] 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 D 辑: 地球科学*, 2005, **35**(增刊 I): 177-186.
- [15] 张文宗, 赵春雷, 李二杰. 利用 MODIS 遥感监测 PM<sub>10</sub> 的方法研究[J]. *河北遥感*, 2009, (3): 6-8.
- [16] Guo J P, Zhang X Y, Che H Z, *et al.* Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(37): 5876-5886.
- [17] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D13211, doi:10.1029/2006JD007811.
- [18] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62**(4): 947-973.
- [19] Li C C, Mao J T, Lau K H A, *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): 2488-2495.
- [20] Li C C, Mao J T, Lau A K H, *et al.* Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, **48**(Sup. II): 209-219.
- [21] Li C C, Lau A K H, Mao J T, *et al.* Retrieval, validation, and application of the 1-km aerosol optical depth from MODIS measurements over Hong Kong [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(11): 2650-2658.
- [22] Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, *et al.* Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D14111, doi: 10.1029/2007JD009525.
- [23] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. *干旱气象*, 2003, **21**(3): 74-78.
- [24] Nicolantonio W D, Cacciari A, Bolzacchini E, *et al.* MODIS aerosol optical properties over north Italy for estimating surface-level PM<sub>2.5</sub> [R]. *Envisat Symposium*, 2007, ESA SP-636, 23-27.
- [25] Balls G R, Palmer-Brown D, Sanders G E. Investigating microclimatic influences on ozone injury in clover (*Trifolium subterraneum*) using artificial neural networks [J]. *New Phytologist*, 1996, **132**(2): 271-280.
- [26] Gardner M W, Dorling S R. Neural network modelling and prediction of hourly NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in urban air in London [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(5): 709-719.
- [27] Reich S L, Gomez D R, Dawidowski L E. Artificial neural network for the identification of unknown air pollution sources [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(18): 3045-3052.
- [28] Sofuoglu S C, Sofuoglu A, Birgili S, *et al.* Forecasting ambient air SO<sub>2</sub> concentrations using artificial neural networks [J]. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2006, **1**(2): 127-136.
- [29] Nagendra S M S, Khare M. Artificial neural network based carbon monoxide persistence models for episodic urban air quality management [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **139**(1-3): 247-255.
- [30] Demir G, Ozdemir H, Ozcan H K, *et al.* An artificial neural network-based model for short-term predictions of daily mean pm10 concentrations [J]. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2010, **11**(3): 1163-1171.
- [31] Gupta P. Particulate matter air quality assessment over southeast united states using satellite and ground measurements [D]. Huntsville: The University of Alabama in Huntsville, 2008. 172.
- [32] Hertz J, Krogh A, Palmer R G. Introduction to the theory of neural computation [M]. Redwood City, CA: Addison-Wesley Publisher, 1991.
- [33] Schalkoff R J. Artificial neural networks [M]. New York: McGraw-Hill, 1997. 146-188.
- [34] Kim M, Gilley J E. Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, **64**(2): 268-275.
- [35] Fletcher D, Goss E. Forecasting with neural networks: an application using bankruptcy data [J]. *Information & Management*, 1993, **24**(3): 159-167.
- [36] Sahoo G, Schladow S, Reuter J E. Forecasting stream water temperature using regression analysis, artificial neural network, and chaotic non-linear dynamic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **378**(3-4): 325-342.
- [37] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. *Monthly Weather Review*, 1992, **120**(8): 1747-1763.

## CONTENTS

Estimation of PM <sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network .....	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> ( 817 )
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City .....	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> ( 826 )
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta .....	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> ( 835 )
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition .....	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> ( 842 )
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter .....	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng ( 849 )
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mires Bay from 2000 to 2010 .....	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong ( 857 )
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay .....	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> ( 864 )
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau .....	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> ( 874 )
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices ( BMPs ) in the Zhangweinan River Basin .....	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin ( 882 )
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control .....	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> ( 892 )
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Julong River Estuary Wetland .....	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> ( 900 )
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater .....	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> ( 907 )
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier .....	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 914 )
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District .....	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> ( 919 )
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> ( 927 )
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses .....	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> ( 933 )
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter .....	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> ( 943 )
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment .....	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> ( 950 )
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> ( 955 )
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G .....	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 962 )
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-deweeding and Dyeing-printing Wastewater .....	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> ( 968 )
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O <sub>3</sub> -BAF .....	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> ( 974 )
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment .....	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> ( 979 )
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow .....	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> ( 986 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( I ) : Model Constitution .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 993 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( II ) : Process Simulation .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 998 )
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources ( III ) : Model Application .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang ( 1004 )
Comparative Study on Water-air CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China .....	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> ( 1008 )
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes .....	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 1017 )
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau .....	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> ( 1026 )
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> ( 1034 )
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay .....	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> ( 1044 )
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province .....	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> ( 1055 )
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island .....	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> ( 1062 )
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City .....	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> ( 1067 )
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City .....	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 1076 )
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City .....	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG GUANG ( 1086 )
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China .....	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> ( 1094 )
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch .....	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> ( 1101 )
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> ( 1107 )
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors .....	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> ( 1114 )
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk .....	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> ( 1120 )
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China .....	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1129 )
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake .....	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> ( 1136 )
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone .....	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> ( 1142 )
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car .....	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> ( 1150 )
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production .....	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 1156 )
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed .....	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> ( 1161 )
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge .....	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao ( 1166 )
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand .....	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> ( 1174 )
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr <sup>6+</sup> .....	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> ( 1181 )
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process .....	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan ( 1190 )
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting .....	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> ( 1196 )
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm ( <i>Eisenia fetida</i> ) .....	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> ( 1204 )
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol .....	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> ( 1211 )
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant .....	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long ( 1218 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行