

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 ..... 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 ..... 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 ..... 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 ..... 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 ..... 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 ..... 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 ..... 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 ..... 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM<sub>2.5</sub> 理化特征分析 ..... 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 ..... 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 ..... 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 ..... 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 ..... 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 ..... 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 ..... 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 ..... 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 ..... 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 ..... 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 ..... 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 ..... 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 ..... 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 ..... 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 ..... 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 ..... 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 ..... 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 ..... 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 ..... 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 ..... 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 ..... 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 ..... 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 ..... 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 ..... 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 ..... 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 ..... 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 ..... 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO<sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 ..... 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 ..... 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 ..... 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 ..... 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 ..... 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 ..... 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 ..... 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 ..... 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 ..... 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 ..... 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O<sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 ..... 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 ..... 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量特征及其影响因素 ..... 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展 ..... 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 ..... (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估

郁珍艳<sup>1</sup>, 高大伟<sup>1\*</sup>, 李正泉<sup>1</sup>, 杨续超<sup>2</sup>, 王阔<sup>1</sup>, 马浩<sup>1</sup>, 徐宏辉<sup>3</sup>

(1. 浙江省气候中心, 杭州 310017; 2. 浙江大学海洋学院, 舟山 316021; 3. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

**摘要:** 利用 1998~2012 年卫星反演的细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)全球高精度产品数据集, 精细化地给出了华东地区 PM<sub>2.5</sub> 时空分布与变化特征, 并分析了此背景下浙江省 PM<sub>2.5</sub> 的人口经济暴露水平. 结果表明 1998~2012 年期间, 浙江省区域平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度整体变化呈现出先增加、后下降的特征, 拐点出现在 2007~2009 年前后, 与华东区域大背景的变化趋势一致. 1998~2000 年华东南部与山东东部的年平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本保持在 50 μg·m<sup>-3</sup> 以下, 其余地区大多在 50~75 μg·m<sup>-3</sup> 左右, 华东地区和浙江省 PM<sub>2.5</sub> 浓度超过 35 μg·m<sup>-3</sup> 的地区分别占到 51.8% 和 21.1%. 1998~2009 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度上升趋势非常明显, 华东地区的平均变化趋势为 2.58 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>, 浙江省的上升趋势较华东区域慢, 为 1.43 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>. 2007~2009 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度达到最大, 华东和浙江省超过 35 μg·m<sup>-3</sup> 的地区分别占到 82.1% 和 65.9%. 此后 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈现出下降的变化趋势, 华东地区和浙江省的平均变化趋势分别为 -1.75 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup> 和 -1.58 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>, PM<sub>2.5</sub> 浓度超过 35 μg·m<sup>-3</sup> 的地区比例均有所下降, 说明政府颁布的一系列节能减排方针政策可能对华东地区的空气质量改善起到了一定的成效. 2010 年浙江地区 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平超过 35 μg·m<sup>-3</sup> 的人口比例和 GDP 比例分别为 74.0% 和 70.8%, 其中 38.1% 的人口生活的环境和 38.9% 的 GDP 产生的环境 PM<sub>2.5</sub> 浓度年平均均值在 50 μg·m<sup>-3</sup> 以上.

**关键词:** 卫星遥感; PM<sub>2.5</sub>; 变化趋势; 人口; 经济; 暴露水平

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4924-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705039

## Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM<sub>2.5</sub> in East China

YU Zhen-yan<sup>1</sup>, GAO Da-wei<sup>1\*</sup>, LI Zheng-quan<sup>1</sup>, YANG Xu-chao<sup>2</sup>, WANG Kuo<sup>1</sup>, MA Hao<sup>1</sup>, XU Hong-hui<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 3. Zhejiang Meteorological Science Institute, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** Using the satellite-derived Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) data of global high-precision products during 1998-2012, detailed characteristics of PM<sub>2.5</sub> distribution over East China and its change are given, and the PM<sub>2.5</sub> exposure levels for population and economy in Zhejiang is further analyzed in this context. The results show that the overall variability of the regional average value of PM<sub>2.5</sub> concentration exhibits an increasing trend followed by a decrease during 1998-2012, which is consistent in both the East China and Zhejiang provinces; the turning point occurs around 2007-2009. In the initial years (1998-2000), annual average PM<sub>2.5</sub> concentrations are below 50 μg·m<sup>-3</sup> in the southern part of East China and eastern part of Shandong, while it is 50-75 μg·m<sup>-3</sup> in other areas. During this period, 51.8% of the area in East China and 21.1% of the area in Zhejiang have PM<sub>2.5</sub> concentrations larger than 35 μg·m<sup>-3</sup> (Air quality standard value in China). The rising trend in PM<sub>2.5</sub> concentration is extremely obvious in 1998-2009; the mean linear trend over East China is 2.58 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>, while it is 1.43 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup> over Zhejiang province. PM<sub>2.5</sub> concentration reaches its maximum during 2007-2009. The area where PM<sub>2.5</sub> concentration is larger than 35 μg·m<sup>-3</sup> reaches 82.1% in East China and 65.9% in Zhejiang province. After that, the PM<sub>2.5</sub> concentration begins to decrease in each region, and the average change trend in East China and Zhejiang are -1.75 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup> and -1.58 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>, respectively. The regional area in which PM<sub>2.5</sub> concentrations are greater than 35 μg·m<sup>-3</sup> displays a slight decline during 2010-2012, which suggests that the energy conservation and emission reduction plan proposed by the Chinese government and associated measures may play a vital role in improving air quality of East China. In 2010, the proportion of the population and GDP for which the PM<sub>2.5</sub> exposure level exceeded 35 μg·m<sup>-3</sup> were 74.0% and 70.8%, respectively, of which 38.1% of the population lives in an environment where annual average PM<sub>2.5</sub> concentrations are more than 50 μg·m<sup>-3</sup>. In addition, 38.9% of the GDP is produced in an environment with annual average PM<sub>2.5</sub> concentrations more than 50 μg·m<sup>-3</sup>.

收稿日期: 2017-05-05; 修订日期: 2017-06-29

基金项目: 浙江省公益技术研究社会发展项目(2016C33G1610876); 国家自然科学基金项目(41605049); 浙江省科技计划项目(2015C33055); 浙江省气象科技计划项目(2015ZD09, 2017ZD13, 2017QN04)

作者简介: 郁珍艳(1984~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为气候变化与生态环境, E-mail: yuzhenyan@126.com

\* 通信作者, E-mail: davidgao82@163.com

**Key words:** satellite remote sensing; PM<sub>2.5</sub>; trend; population; economy; exposure level

近年来,霾已成为我国最严重的环境灾害,受到政府和公众广泛关注<sup>[1]</sup>. 高浓度的 PM<sub>2.5</sub>是形成京津冀、珠三角和长三角等地区大气灰霾的主要原因<sup>[2]</sup>,霾降低了大气能见度,使得空气环境质量变差,进而威胁到人体健康<sup>[3]</sup>. 根据全球疾病负担报告(Global Burden of Disease Study),2010年有超过320万人因暴露于 PM<sub>2.5</sub>而导致过早死亡<sup>[4]</sup>.

世界卫生组织(WHO)于2005年提出了 PM<sub>2.5</sub>的指导限值<sup>[5]</sup>,我国目前采用的是第一过渡期的达标标准 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 对我国大气 PM<sub>2.5</sub>所进行的一系列的监测和研究结果表明,我国的空气污染逐步转向以细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)和污染气体(O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、NO)等混合的复合型污染<sup>[6]</sup>. 我国城市 PM<sub>2.5</sub>污染有加剧的趋势<sup>[7,8]</sup>,2014年仅8.1%的城市年评价结果达标,日均质量浓度超标天数占26.6%<sup>[9]</sup>,城市 PM<sub>2.5</sub>的人口暴露浓度约为60  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是全球平均值的3倍,仅有9.0%城市人口的生活环境符合我国现有 PM<sub>2.5</sub>质量标准<sup>[10]</sup>.

但我国 PM<sub>2.5</sub>的研究主要集中在北京、天津、广州等大城市<sup>[11~13]</sup>. 华东地区是我国经济发展较快、城市化水平较高的区域之一,随之而来的是排放的大气污染物不断增加,PM<sub>2.5</sub>已成为影响华东地区城市空气质量和人体健康的重要因素. 目前关于华东地区长期 PM<sub>2.5</sub>的跟踪研究仍然较少,针对区域内上海<sup>[14]</sup>、南京<sup>[15]</sup>、杭州<sup>[16,17]</sup>等城市的研究虽有一些,但是大部分地区缺乏观测站或建站时间短,很难开展大范围长时间序列的 PM<sub>2.5</sub>暴露水平和趋势变化研究.

此外,我国政府在2006年初首次提出了“节能减排”<sup>[18]</sup>,为保障2008年奥运会期间良好的空气质量也制定颁发了一系列的空气质量保障措施,对北京市及周边地区的空气环境污染控制起到了明显的效果<sup>[19,20]</sup>. 但由于受到 PM<sub>2.5</sub>监测数据不足的局限,想要了解华东地区的空气质量是否也得到了改善,有待更科学合理的全面评估.

而卫星遥感无疑为生态环境变化监测提供了长时间、连续的面状观测资料. 高质量、高精度、长序列的卫星遥感数据是监测大气污染变化的强有力工具<sup>[21]</sup>. 王静等<sup>[22]</sup>和 Ma 等<sup>[23]</sup>认为 MODIS 气溶胶光学厚度产品(AOD)可以用来估计 PM<sub>2.5</sub>浓度,作为监测 PM<sub>2.5</sub>分布以及传输的有效补充手段,呈现更精细的空间分布特征. 因此本文利用1998~2012

年长时间序列的卫星反演数据,首先精细化地给出华东地区 PM<sub>2.5</sub>污染的分布与变化特征,然后以浙江省为例评估分析了华东区域 PM<sub>2.5</sub>变化背景下的人口经济暴露水平. 对于了解华东地区大气 PM<sub>2.5</sub>污染状况和浙江省人居环境质量,评估政府出台的政策措施取得的成效,制定或改进大气防治对策都具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 卫星遥感 PM<sub>2.5</sub>浓度资料

本研究使用的 PM<sub>2.5</sub>数据来自 MODIS、MISR 和 SeaWiFS 气溶胶光学厚度(AOD)联合反演得到的全球逐年 PM<sub>2.5</sub>格点产品(1998~2012年,V1版本)<sup>[24,25]</sup>. 本数据集采用 NASA 基于卫星遥感反演得到的 AOD 数据集,并利用 GEOS-Chem 全球化学传输模式建立大气对流整层气柱 AOD 与地面 PM<sub>2.5</sub>浓度数据的关系,通过3年滑动平均来降低卫星反演资料的噪音,进而推算得到全球1998~2012逐年平均卫星遥感地表 PM<sub>2.5</sub>浓度,该产品覆盖范围为70°N~55°S,分辨率为0.1°,近似为10 km×10 km. 该产品的科研团队<sup>[25]</sup>通过海量文献搜索的方式,获得了全球210个 PM<sub>2.5</sub>地面观测站的数据,对卫星遥感反演的地表 PM<sub>2.5</sub>卫星估算结果进行了评估,发现两者存在显著相关性,相关系数达到0.81,证明该 PM<sub>2.5</sub>卫星产品完全可以用来指示全球 PM<sub>2.5</sub>浓度的分布及显著变化特征.

本文便是利用由 NASA、哥伦比亚大学和 Donkelaar 研究小组免费发布提供的全球3a滑动平均 PM<sub>2.5</sub>数据集,分析华东地区1998~2012年 PM<sub>2.5</sub>浓度的分布及变化趋势特征.

### 1.2 浙江省人口和 GDP 密度资料

Yang 等<sup>[26]</sup>利用多元遥感数据,将 DMSP/OLS 夜间灯光与 EVI 融合后构建人居指数,再进一步融合 DEM 数据对人居指数进行了海拔修正,基于修正后的人居指数与统计人口之间很强的线性相关建立人口空间化模型,获得2010年浙江省1 km×1 km分辨率下的人口密度空间分布. Yue 等<sup>[27]</sup>进一步通过构建的人居指数估算了第二、三产业的国内生产总值(GDP),并结合土地利用数据估算了第一产业的国内生产总值,获得2010年浙江省1 km×1 km分辨率下的 GDP 密度空间分布.

本文基于上述研究得到的2010年浙江省1 km

$\times 1 \text{ km}$  的人口和 GDP 密度空间分布数据, 同时考虑到  $\text{PM}_{2.5}$  在空间上较为连续变化的特点, 利用双线性插值将 2009 ~ 2011 年平均  $\text{PM}_{2.5}$  数据重采样到  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  分辨率上, 与人口、GDP 数据匹配, 估算了浙江省暴露于各级别  $\text{PM}_{2.5}$  浓度环境下的人口及 GDP 百分比。

插值精度的检验采用标准均方根误差 (NRMSE), 见式(1):

$$\text{NRMSE} = 100\% \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \times \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \right)^{-1} \quad (1)$$

式中,  $N$  为样本数,  $\hat{Z}_i$  为双线性插值得到的  $\text{PM}_{2.5}$  数据,  $Z_i$  为  $\text{PM}_{2.5}$  原始数据, NRMSE 越小, 插值准确性越高<sup>[28]</sup>。计算得到标准均方根误差百分比仅为 4%, 可见插值得到的  $\text{PM}_{2.5}$  数据误差很小, 能够满足后续计算要求。

### 1.3 趋势分析方法

$\text{PM}_{2.5}$  浓度的年际趋势变化用一次线性方程表示(式 2):

$$x_t = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

式中,  $t=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为年数;  $a_0$  为常数项;  $a_1$  称为气候倾向率<sup>[29]</sup>, 单位为:  $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

采用  $t$  检验法<sup>[30]</sup> 进行  $\text{PM}_{2.5}$  浓度趋势变化的显

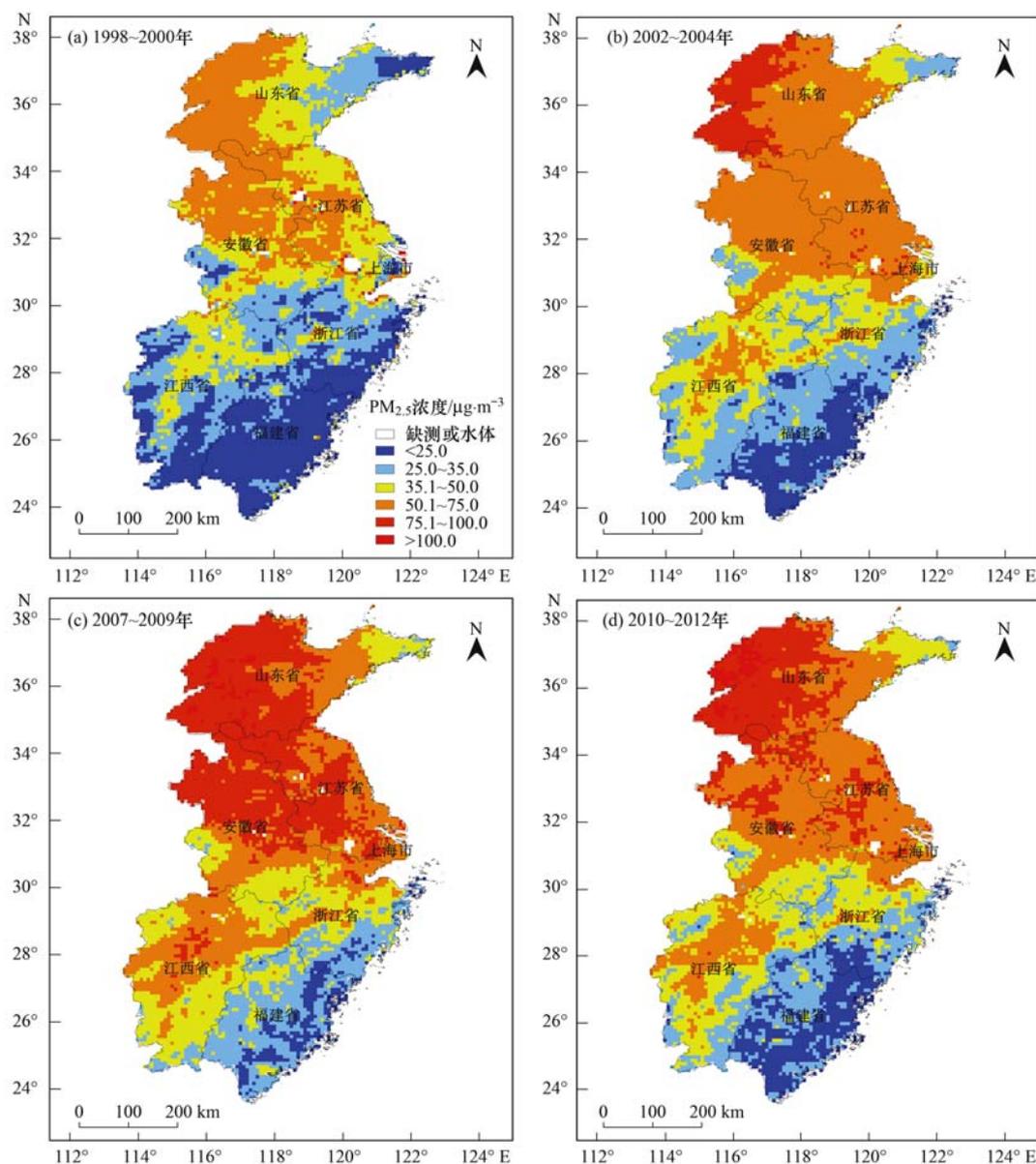


图 1 华东地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布

Fig. 1 Distribution of  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations over East China

著性检验.

## 2 结果与讨论

### 2.1 华东地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势

从 PM<sub>2.5</sub> 浓度的空间分布来看, 1998 ~ 2000 年华东南部与山东东部的 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本保持在 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下, 其余地区大多在 50 ~ 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右 [图 1(a)]. 随后, 华东大部分地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度有升高的趋势 [图 1(b)]. 到了 2007 ~ 2009 年, 华东大部分地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度达到最大值, 江西大部、浙江部分地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度达到 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, 上海、江苏、安徽、山东大部地区达到了 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上 [图 1(c)]. 此后, 大部分地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度开

始出现下降的趋势, 2010 ~ 2012 年福建省 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下的范围扩大, 江西、浙江 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上的范围缩小, 其余地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上的范围明显缩小 [图 1(d)].

从 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势来看, 1998 ~ 2012 年华东大部分地区总体上呈现增大为主的变化趋势, 其中山东省最为显著, 山东大部可达 3.00  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$  以上; 其次为江苏、安徽、上海, 大部分地区也可达 2.00  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$  以上 [图 2(a)]. 除福建和浙江有部分地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度增大不显著外, 华东其他地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本以显著增大 (通过 95.0% 的显著性检验) 为主 [图 2(b)].

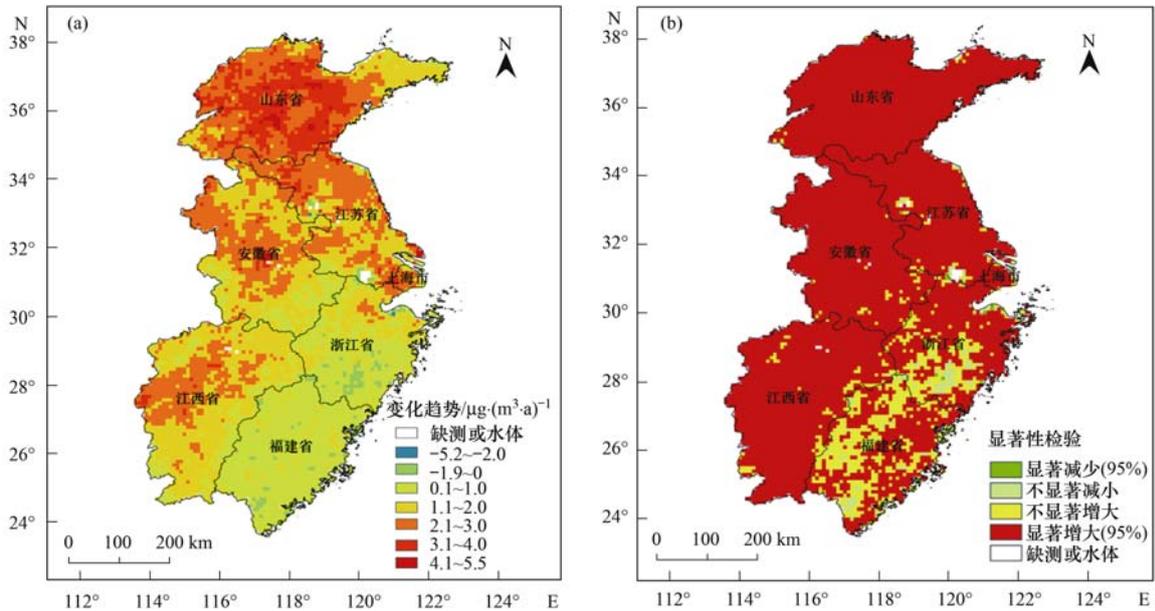


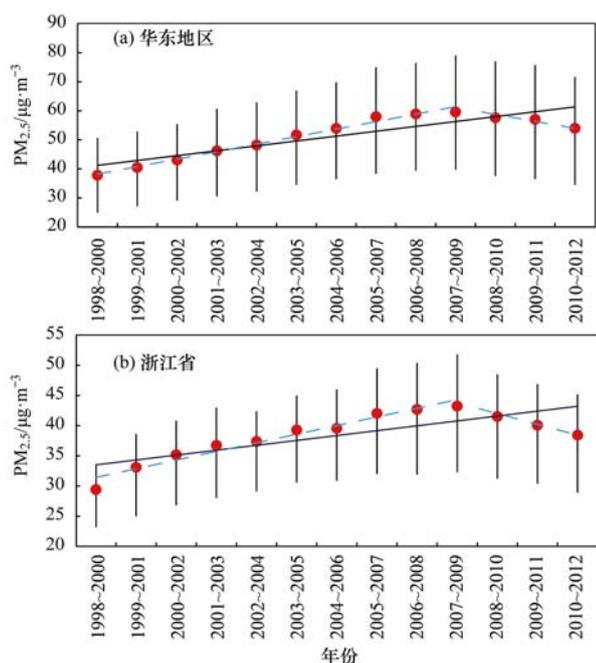
图 2 华东地区 1998 ~ 2012 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势和显著性检验分布

Fig. 2 Change trend of PM<sub>2.5</sub> concentrations over East China for 1998-2012 and significance test

从华东地区及各省市平均值来看 (图 3 和表 1), 1998 ~ 2012 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度整体上均呈上升的变化趋势, 并且均通过了 95.0% 以上的显著性检验. 其中北部的山东省上升趋势最明显, 达到了 2.70  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ; 整个华东地区的平均变化趋势为 1.68  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ; 浙江省的平均变化趋势为 0.81  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ . 但其实上升阶段主要在 1998 ~ 2009 年 (山东和福建为 1998 ~ 2008 年), 整个华东地区的平均变化趋势为 2.58  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ , 浙江省的平均变化趋势为 1.43  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ . 而 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间序列在 2007 ~ 2009 年 (山东和福建为 2006 ~ 2008 年) 左右出现拐点, 此后各地 PM<sub>2.5</sub> 浓度均呈现出下降的变化趋势, 除山东省外的其他地区均通

过了 95% 以上的显著性检验, 其中上海和安徽的下降速率超过了 3.00  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ . 华东地区的平均变化趋势为 -1.75  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ , 浙江省的平均变化趋势为 -1.58  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ .

针对中国<sup>[31,32]</sup>或者东亚地区<sup>[33]</sup> PM<sub>2.5</sub> 浓度的研究也都得到了类似的结果: PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2007 年以前呈现上升的趋势, 此后出现相反的变化趋势或者基本稳定. 可见华东区域的变化趋势与全国及整个东亚相似. 前人的研究表明, 政策干预、减排措施对当地及周边地区的环境改善有一定的作用<sup>[34,35]</sup>, 引言中提到的一系列方针政策的颁布实施可能是华东地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间序列在 2007 ~ 2009 年左右出现拐点的原因之一.



黑色垂直线为区域内格点 25.0% 和 75.0% 百分位值, 红色圆点为区域平均值, 深蓝色实线和浅蓝色虚线为趋势线  
图 3 1998 ~ 2012 年华东地区和浙江省  $PM_{2.5}$  浓度时间变化趋势

Fig. 3  $PM_{2.5}$  time series change trend over East China and Zhejiang Province for 1998-2012

表 1 华东地区  $PM_{2.5}$  浓度线性趋势方程系数  $a_0$  和  $a_1$  及方程决定系数  $r^2$ <sup>1)</sup>

Table 1 Coefficient  $a_0$ ,  $a_1$  and decision coefficient  $r^2$  for linear trend equation of  $PM_{2.5}$  concentrations over East China

时段	1998 ~ 2012 年			1998 ~ 2009 年 (山东、福建为 1998 ~ 2008 年)			2007 ~ 2012 年 (山东、福建为 2006 ~ 2012 年)		
	$a_0$	$a_1$	$r^2$	$a_0$	$a_1$	$r^2$	$a_0$	$a_1$	$r^2$
华东	39.54	1.68	0.78 **	35.60	2.58	0.99 **	61.46	-1.75	0.94 **
浙江	32.70	0.81	0.62 **	30.00	1.43	0.95 **	44.77	-1.58	1.00 **
山东	49.55	2.70	0.84 **	43.08	4.27	0.99 **	79.79	-0.57	0.40
江苏	52.64	2.10	0.81 **	48.26	3.10	0.99 **	80.25	-2.11	0.95 **
上海	42.79	2.01	0.64 **	36.58	3.45	0.93 **	71.40	-3.27	0.92 *
安徽	47.04	1.81	0.77 **	43.03	2.72	0.99 **	74.37	-3.02	0.96 **
江西	31.68	1.63	0.73 **	27.59	2.56	0.97 **	54.02	-2.16	0.88 *
福建	21.68	0.53	0.43 *	18.58	1.26	0.99 **	31.87	-1.55	0.94 *

1) 气候倾向率  $a_1$  的单位为:  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ; \* 表示通过 95% 的显著性检验; \*\* 表示通过 99% 的显著性检验

和福建以外, 其他各省市均达到了 80.0% 以上.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区也占到了 31.9%, 山东、江苏、安徽达到了 50.0% 以上, 浙江为 3.0%.

2010 ~ 2012 年华东地区  $PM_{2.5}$  浓度超过 25 ~  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区都略有减少, 其中浙江、福建减少较明显, 其他地区基本无变化; 江西、上海、浙江  $PM_{2.5}$  浓度超过  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区比例减少最多.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区也有所减少, 除山

## 2.2 华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度分级

从  $10 \sim 120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 每隔  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  分级并计算超过各级限值的地区累积百分比, 华东地区及各省市区超过各级限值的地区累积百分比在 1998 ~ 2009 年(山东和福建为 1998 ~ 2008 年)左右有明显增大的变化, 此后累积曲线慢慢向左移动, 说明这时期年平均  $PM_{2.5}$  有所减小(图 4 和表 2).

1998 ~ 2000 年, 华东地区  $PM_{2.5}$  浓度超过  $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到 74.9%, 浙江低于区域平均水平, 为 62.7%.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到 51.8%, 其中江苏达到 96.4%, 山东和安徽也达到 70.0% 以上, 浙江为 21.1%.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到 26.4%, 山东、江苏、上海达到 50.0% 左右, 浙江为 4.6%.

到了 2007 ~ 2009 年(山东和福建为 2006 ~ 2008 年), 华东地区  $PM_{2.5}$  浓度超过各级限值的百分比达到最大. 华东地区  $PM_{2.5}$  浓度超过  $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到了 95.9%, 除福建外其他各省市基本达到了 95.0%.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到了 82.1%, 浙江省上升到了 65.9%.  $PM_{2.5}$  浓度超过  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的地区占到了 60.5%, 除江西、浙江

东外其他地区减少明显.

## 2.3 浙江省 $PM_{2.5}$ 的人口经济暴露水平

位于华东东南部的浙江省, 近些年经济增速快、能源消耗多, 并且经常受到北面上游地区污染物输送的影响, 大气环境问题日益显现<sup>[36, 37]</sup>. 从上文的分析也可见, 虽然相对位于北部的山东省、江苏省和上海市, 浙江省  $PM_{2.5}$  浓度稍低一些, 但  $PM_{2.5}$  变化趋势和所处华东这个大背景区域以及北部省份都有着较好的对应关系, 间接说明浙江省的

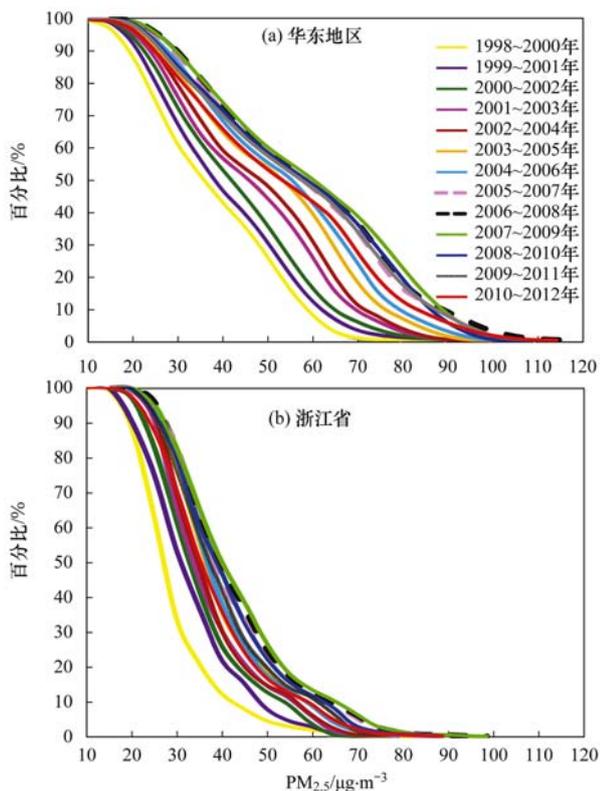


图4 1998~2012年PM<sub>2.5</sub>浓度超过限值的地区累积分布

Fig. 4 Cumulative distribution of the regions where the PM<sub>2.5</sub> concentrations exceed the limit during 1998-2012

表2 华东地区及省市PM<sub>2.5</sub>浓度超过限值的地区累积百分比<sup>1)</sup>/%

Table 2 Cumulative percentage of the regions where the PM<sub>2.5</sub> concentrations exceed the limit over East China and each province/%

地区	25 μg·m <sup>-3</sup>			35 μg·m <sup>-3</sup>			50 μg·m <sup>-3</sup>			75 μg·m <sup>-3</sup>		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
华东	74.9	95.9	90.0	51.8	82.4	74.2	26.4	60.5	53.5	0.2	31.9	19.1
浙江	62.7	94.9	88.0	21.1	65.9	52.2	4.6	27.4	17.2	0.5	3.0	0.9
山东	94.3	99.8	99.8	77.3	98.9	98.8	47.7	90.7	88.4	0.0	62.6	58.9
江苏	98.5	100.0	100.0	96.4	99.9	99.9	52.2	99.8	99.4	1.1	59.6	27.6
上海	77.4	100.0	100.0	35.9	100.0	100.0	11.3	100.0	88.1	3.8	20.3	8.5
安徽	97.0	100.0	100.0	79.7	99.6	96.2	50.1	81.9	74.4	0.0	53.6	17.9
江西	71.9	100.0	99.2	29.4	95.6	78.4	1.2	49.4	30.9	0.0	3.5	0.1
福建	15.1	78.0	44.3	1.7	22.1	2.8	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

1) T1为1998~2000年, T2为2007~2009年(山东和福建为2006~2008年), T3为2010~2012年

研究人员估计在东亚和南亚地区 PM<sub>2.5</sub>暴露水平超过 35 μg·m<sup>-3</sup>的人口比例, 从1998年的51.0%上升到了2010年的70.0%<sup>[25]</sup>, 2010年浙江地区 PM<sub>2.5</sub>暴露水平超过 35 μg·m<sup>-3</sup>的人口比例略高于东亚和南亚地区, 很大一部分浙江人所处的环境质量还达不到我国现有 PM<sub>2.5</sub>质量标准.

根据2010年浙江省GDP分布及PM<sub>2.5</sub>浓度分布计算得到, GDP的PM<sub>2.5</sub>暴露水平与人口相似, 有70.8%的GDP产生的环境PM<sub>2.5</sub>浓度年平均值为

PM<sub>2.5</sub>也受到整个华东, 特别是上游地区的输入性影响. 因此进一步以浙江省为例评估分析了华东区域PM<sub>2.5</sub>变化背景下的人口经济暴露水平, 以期为浙江省的政府决策服务提供生态环境变化的科学依据.

由图5可见, 2010年浙江省所有人口生活在PM<sub>2.5</sub>浓度年平均值为10 μg·m<sup>-3</sup>以上的环境中, 有74.0%的浙江人口所生活的环境PM<sub>2.5</sub>浓度年平均值为35 μg·m<sup>-3</sup>以上, 其中在50 μg·m<sup>-3</sup>以上的为38.1%, 还有3.1%左右的在70 μg·m<sup>-3</sup>以上.

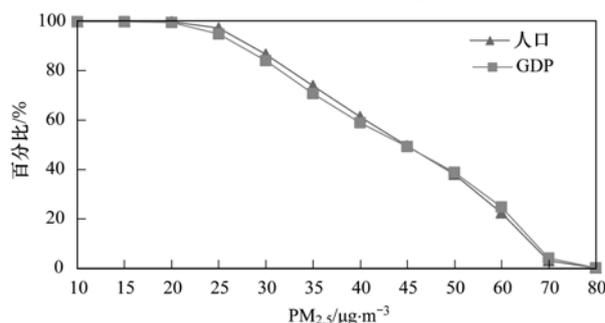


图5 2010年浙江省PM<sub>2.5</sub>暴露水平超过各级限值的人口和GDP百分比

Fig. 5 Percentage of population and GDP for which PM<sub>2.5</sub> exposure levels exceed the limit at each degree over Zhejiang Province in 2010

35 μg·m<sup>-3</sup>以上, 其中在50 μg·m<sup>-3</sup>以上的为38.9%, 还有4.1%的在70 μg·m<sup>-3</sup>以上.

### 3 结论

(1)1998~2012年浙江省区域平均PM<sub>2.5</sub>浓度整体变化呈现出先增加、后下降的特征, 拐点出现在2007~2009年前后, 与华东区域大背景的变化趋势一致. 1998~2009年PM<sub>2.5</sub>浓度上升趋势非常明显, 华东地区的平均变化趋势为2.58 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>, 浙江省为1.43 μg·(m<sup>3</sup>·a)<sup>-1</sup>. 此后

PM<sub>2.5</sub>浓度呈现出下降的变化趋势,华东地区和浙江省的平均变化趋势分别为  $-1.75 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$  和  $-1.58 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ .

(2)1998~2000年华东南部与山东东部的年平均PM<sub>2.5</sub>浓度基本在  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,其余地区大多在  $50\sim 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,华东地区PM<sub>2.5</sub>浓度超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的地区占到51.8%,浙江省为21.1%.随着PM<sub>2.5</sub>浓度持续升高,2007~2009年华东大部分地区PM<sub>2.5</sub>浓度达到最大值,华东地区和浙江省PM<sub>2.5</sub>浓度超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的地区分别占到82.1%和65.9%.此后华东大部分地区PM<sub>2.5</sub>浓度开始出现下降的趋势,2010~2012年华东地区PM<sub>2.5</sub>浓度超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的地区比例略有下降,但山东、安徽、江苏、上海变化不大.

(3)2010年浙江地区PM<sub>2.5</sub>暴露水平超过  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的人口比例和GDP比例分别为74.0%和70.8%,其中38.1%的人口所生活的环境和38.9%的GDP产生的环境PM<sub>2.5</sub>浓度年平均平均值在  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.

致谢:感谢美国国家航空航天局社会经济数据与应用中心(SEDAC)提供的卫星遥感PM<sub>2.5</sub>数据.

#### 参考文献:

- [1] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 604-619.
- Xu X B. Observational study advances of haze and photochemical pollution in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 604-619.
- [2] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. PM<sub>2.5</sub>浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2191-2201.
- Wu J S, Wang X, Li J C, et al. Comparison of models on spatial variation of PM<sub>2.5</sub> concentration; a case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2191-2201.
- [3] 吴兑, 廖碧婷, 陈慧忠, 等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 248-264.
- Wu D, Liao B T, Chen H Z, et al. Advances in studies of haze weather over Pearl River Delta[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2): 248-264.
- [4] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010; a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. The Lancet, 2012, 380(9859): 2224-2260.
- [5] WHO. Air quality guidelines; global update 2005 [R]. Bonn: WHO Regional Office for Europe, 2005. 9-13.
- [6] 曹军骥. PM<sub>2.5</sub>与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 1-2.
- Cao J J. PM<sub>2.5</sub> and the environment in China [M]. Beijing: Science Press, 2014. 1-2.
- [7] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国PM<sub>2.5</sub>污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.
- Wang W, Tang D G, Liu H J, et al. Research on current pollution status and pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1-5.
- [8] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
- [9] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市PM<sub>2.5</sub>污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 641-650.
- Li M S, Ren X X, Yu Y, et al. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) pollution in mainland China [J]. China Environmental Science, 2016, 36(3): 641-650.
- [10] Zhang Y L, Cao F. Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in China at a city level [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14884.
- [11] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2836-2846.
- Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term data [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2836-2846.
- [12] 蔡子颖, 刘爱霞, 韩素芹, 等. 天津低能见度特征初探[J]. 气象, 2014, 40(1): 114-118.
- Cai Z Y, Liu A X, Han S Q, et al. Research of characteristics on low visibility in Tianjin [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(1): 114-118.
- [13] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州PM<sub>2.5</sub>污染特征及影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 15-21.
- Zhu Q R, Liu Y H, Xu W J, et al. Analysis on the pollution characteristics and influence factors of PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(2): 15-21.
- [14] Gu Z P, Feng J L, Han W L, et al. Diurnal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with PM<sub>2.5</sub> in Shanghai, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(3): 389-396.
- [15] Wang W X, Wang S S, Xu J H, et al. Gas-phase ammonia and PM<sub>2.5</sub> ammonium in a busy traffic area of Nanjing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1691-1702.
- [16] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, 26(2): 44-48.
- Bao Z, Feng Y C, Jiao L, et al. Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Hangzhou [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, 26(2): 44-48.
- [17] Jansen R C, Shi Y, Chen J M, et al. Using hourly measurements to explore the role of secondary inorganic aerosol in PM<sub>2.5</sub> during haze and fog in Hangzhou, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(6): 1427-1434.
- [18] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2006.
- [19] 曾静, 廖晓兰, 任玉芬, 等. 奥运期间北京PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、CO的动态特征及影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6227-6233.
- Zeng J, Liao X L, Ren Y F, et al. Dynamics of atmospheric PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, CO during the Beijing Olympic Games [J].

- ActaEcologicaSinica, 2010, **30**(22): 6227-6233.
- [20] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014年北京地区 PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(6): 783-790.  
Wang H, Gao J, Li H, *et al.* Variation of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in Beijing area during 2007-2014[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(6): 783-790.
- [21] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. Nature, 2002, **419**(6903): 215-223.
- [22] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 PM<sub>2.5</sub>质量浓度的特征及其相关性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, **27**(1): 10-16.  
Wang J, Yang F M, Wang D Y, *et al.* Characteristics and relationship of aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> concentration over Beijing[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, **27**(1): 10-16.
- [23] Ma Z W, Liu Y, Zhao Q Y, *et al.* Satellite-derived high resolution PM<sub>2.5</sub> concentrations in Yangtze River Delta Region of China using improved linear mixed effects model [J]. Atmospheric Environment, 2016, **133**: 156-164.
- [24] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global annual PM<sub>2.5</sub> grids from MODIS, MISR and SeaWiFS aerosol optical depth (AOD), 1998-2012 [EB/OL]. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <http://dx.doi.org/10.7927/H4028PFS,2015>.
- [25] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter [J]. Environmental Health Perspectives, 2015, **123**(2): 135-143.
- [26] Yang X C, Yue W Z, Gao D W. Spatial improvement of human population distribution based on multi-sensor remote-sensing data: an input for exposure assessment [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, **34**(15): 5569-5583.
- [27] Yue W Z, Gao J B, Yang X C. Estimation of gross domestic product using multi-sensor remote sensing data: a case study in Zhejiang Province, East China [J]. Remote Sensing, 2014, **6**(8): 7260-7275.
- [28] Evans R G, Schneider S M, Han S. Evaluating cokriging for improving soil nutrient sampling efficiency [J]. Transactions of the ASAE, 2003, **46**(3): 845-849.
- [29] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987 [J]. Journal of Climate, 1988, **1**(6): 654-660.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 2007. 27-28.
- [31] Ma Z W, Hu X F, Sayer AM, *et al.* Satellite-based spatiotemporal trends in PM<sub>2.5</sub> concentrations: China, 2004-2013 [J]. Environmental Health Perspectives, 2016, **124**(2): 184-192.
- [32] Guan D B, Su X, Zhang Q, *et al.* The socioeconomic drivers of China's primary PM<sub>2.5</sub> emissions [J]. Environmental Research Letters, 2014, **9**(2): 024010.
- [33] Boys B L, Martin R V, van Donkelaar A, *et al.* Fifteen-year global time series of satellite-derived fine particulate matter [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(19): 11109-11118.
- [34] 聂滕, 李璇, 王占山, 等. APEC 期间北京市 PM<sub>2.5</sub>时空分布与过程分析 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 349-355.  
Nie T, Li X, Wang Z S, *et al.* Spatial and temporal distribution and process analysis of PM<sub>2.5</sub> pollution over Beijing during APEC [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 349-355.
- [35] 张恒, 周自强, 赵海燕, 等. 青奥会前后南京 PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 [J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 28-34.  
Zhang H, Zhou Z Q, Zhao H Y, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Nanjing before and after the Youth Olympic Games [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 28-34.
- [36] 高大伟, 马浩, 郁珍艳, 等. 基于连续 MODIS 真彩图的霾监测预警新方法——以浙江省一次严重霾污染过程为例 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2939-2949.  
Gao D W, Ma H, Yu Z Y, *et al.* Monitoring haze events from the MODIS true-color composite image series: a case study of severe haze pollution event in Zhejiang province [J]. China Environmental Science, 2017, **35**(10): 2939-2949.
- [37] 郁珍艳, 李正泉, 高大伟, 等. 浙江省空气质量与大气自净能力的特征分析 [J]. 气象, 2017, **43**(3): 323-332.  
Yu Z Y, Li Z Q, Gao D W, *et al.* Feature analysis of air quality and atmospheric self-purification capability in Zhejiang [J]. Meteorological Monthly, 2017, **43**(3): 323-332.

## CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai .....	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)