

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

1980 ~ 2012 年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析

刘端阳¹, 魏建苏^{2*}, 严文莲², 吕军³, 孙燕²

(1. 江苏省无锡市气象局, 无锡 214101; 2. 江苏省气象台, 南京 210008; 3. 江苏省气象信息中心, 南京 210008)

摘要: 利用 1980 ~ 2012 年江苏省气象观测资料, 对江苏省城市霾时空分布及成因进行了分析。结果表明, 1980 ~ 2012 年江苏省霾日增加, 重度和中度霾增加显著, 苏北和沿海城市霾日增加显著。秋季和冬季霾日最多, 夏季最少。秋、冬季霾主要在内陆, 沿海略少。除苏南三城市, 6 月其他城市霾日都比较多。80 年代霾日较为均匀, 90 年代苏南、苏西南增加, 2000 年代江淮之间和苏北增加, 2010 ~ 2012 年苏北霾日增加显著, 苏南地区霾日略有减少。全省连续性霾日、区域性霾日及连续性区域霾都呈增加趋势。城市建成区面积逐年扩大、由工业及汽车尾气排放的污染物逐年增加, 导致区域气温升高、空气相对湿度下降, 形成城市热岛和干岛效应, 加上污染物的增多, 增强了霾形成和维持的条件, 持续性霾、区域性霾和持续性区域霾也增加较为显著。

关键词: 霾日; 气候特征; 大气污染; 江苏; 持续性霾

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3247-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.002

Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years

LIU Duan-yang¹, WEI Jian-su², YAN Wen-lian², LÜ Jun³, SUN Yan²

(1. Wuxi Meteorological Observatory of Jiangsu Province, Wuxi 214101, China; 2. Observatory of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Meteorological Information Center, Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the surface meteorological data of Jiangsu Province during 1980-2012, climatic characteristics and trends of the weather phenomenon of haze were analyzed. The result indicates that during 1980-2012, the haze day increased, and the severe and moderate haze days significantly increased. In the northern and coastal cities, haze days had a significant increase. Haze is often appeared in the fall and winter, and is rare in the summer, it also occurs inland, and is less in the coast. The haze happens more frequently in June since the straw burning during summer harvest time. The haze day was evenly distributed during the 80's, and increased during the 90's over southern and southwestern Jiangsu Province, middle and northern Jiangsu haze days had a growing after 2000, especially after 2010. The continuous, regional, and regional-continuous haze days were in an increasing trend. As the urban built-up area has been expanded each year, industrial emissions, coal consumption, and car ownership increase every year, resulting in regional temperature increase and relative humidity decrease, resulting in urban heat island and dry island effects. Thence the haze formation and maintenance conditions increased, which led to the increasing of haze days, and the continuous, regional and regional-continuous haze days were significantly increased.

Key words: haze day; climatic characteristics; atmospheric pollution; Jiangsu Province; continuous haze

霾也称灰霾^[1], 在中国气象局《霾的观测和预报等级》^[2] (2010) 规范中, 霾的天气定义是: “大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中, 使水平能见度小于 10.0 km 的空气普遍混浊现象。霾使远处光亮物体微带黄、红色, 使黑暗物体微带蓝色。”霾的成因比较复杂^[3], 霾天气中的气溶胶除了因消光引起视程障碍外^[4,5], 其中含有的大量有毒有害物质^[6~10]还会危害人体健康, 引起呼吸系统及心脑血管疾病的发生^[11]。

国内外许多学者都对霾的气候特征进行了相关研究^[12~20]: 高歌^[12]研究认为, 我国年和四季霾日的空间分布均呈东多西少分布, 且全国霾日呈明显增加趋势。孙彧等^[13]研究 1971 ~ 2010 年我国霾日气候特征发现, 霾主要集中于华北、河南以及珠三角和长三角地区。我国华东地区^[22~26]、京津冀地区^[27~29]和珠三角地区^[30~34]经济发展迅速, 城市化

水平较高, 但大气污染也最为严重。而 Vautard 等^[35]分析发现, 1980 ~ 2009 年欧洲在过去 30 a 中低能见度天气 (如雾、轻雾、霾) 呈下降趋势, 认为这与二氧化硫等污染物排放量的下降具有一致性, 说明了空气质量提高的显著贡献。

随着经济和城市化的发展, 近年来江苏省气候特征也出现了较大变化, 包括霾在内的灾害性极端天气频发^[36,37], 毛宇清等^[38]、童尧青等^[39]分析了南京地区霾气候特征及影响要素。由于以上对霾气候研究都是根据观测员记录所得, 标准不一致, 因此

收稿日期: 2013-12-17; 修订日期: 2014-04-07

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20130111); 国家自然科学基金项目 (41340042); 江苏省气象局重点项目 (KZ201405); 无锡市科技发展资金社会发展项目 (CSE11N1301); 江苏省气象局环境气象科技创新团队项目; 江苏省气象局预报员专项 (201212)

作者简介: 刘端阳 (1981 ~), 男, 博士, 主要研究方向为雾霾物理化学过程, E-mail: liuduanyang2001@126.com

* 通讯联系人, E-mail: weijiansu@aliyun.com

科学性不够高,另外,对霾连续性和区域性特征及成因也没有进行相关分析. 为分析近年来江苏省霾日气候特征,本研究在文献[2]的基础上略作修改,重建了江苏省城市霾日气候特征,对江苏省城市霾日时空分布特征进行讨论,并利用经济发展统计数据和污染物排放量数据分析霾日变化成因.

1 材料与方法

1.1 资料

本研究选取江苏省 13 个地级市国家基准或基本气象站观测数据,从 1980 ~ 2012 年共计 33 a,包括 08:00、14:00 和 20:00 的天气现象、能见度、相对湿度、气温、降水量等气象要素. 13 个站点中,苏州在 1994 年,常州在 1999 年,淮安在 2001 年,盐城在 2003 年,南京、南通、无锡在 2008 年出现了迁站,连云港 2010 年出现迁站,经过对比校验,迁站前后的资料和数据具有一致性和连续性.

本文还使用了 1994 ~ 2011 年《江苏省统计年鉴》资料,主要包括全建成区面积、燃煤量、工业废气排放量、汽车拥有量等经济发展资料.

研究中还使用了欧盟委员会大气研究排放数据库提供的 1980 ~ 2008 年区域大气污染物数据,研究

范围为 116°E ~ 122°E 和 30°N ~ 35°N. 本研究中以 10 a 为一个年代,分别统计了 NO_x 、 SO_2 和 PM_{10} 的年代平均排放的区域分布.

1.2 分析方法

目前对于霾的界定方法各异,许多学者对霾的研究标准也有差别,本文在吴兑所用方法^[40,41]基础上略作修改,选取 1980 ~ 2012 年的逐日气象资料,对每天 08:00、14:00、20:00 这 3 个时次的能见度、相对湿度进行判断,当满足任一时次能见度 < 10 km,且相对湿度 < 90%,并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为一个霾日. 根据不同能见度将霾分为 4 个等级^[2], $5 \text{ km} \leq \text{vis} < 10 \text{ km}$ 轻微霾, $3 \text{ km} \leq \text{vis} < 5 \text{ km}$ 为轻度霾, $2 \text{ km} \leq \text{vis} < 3 \text{ km}$ 为中度霾, $\text{vis} < 2 \text{ km}$ 为重度霾.

为研究霾区域性特征,借鉴周自江等^[42]对区域性浓雾的判定方法,选取淮河以南 8 个城市,以相邻 3 个站点在同一天都出现霾,覆盖 3 个地级市时,统计为区域性霾,由于能见度在 5 000 m 以下霾影响较大,所分析区域性霾能见度均在 5 000 m 以下. 而区域性连续霾则选取 3 个站以上连续天数超过 3 d 的霾日作为统计对象.

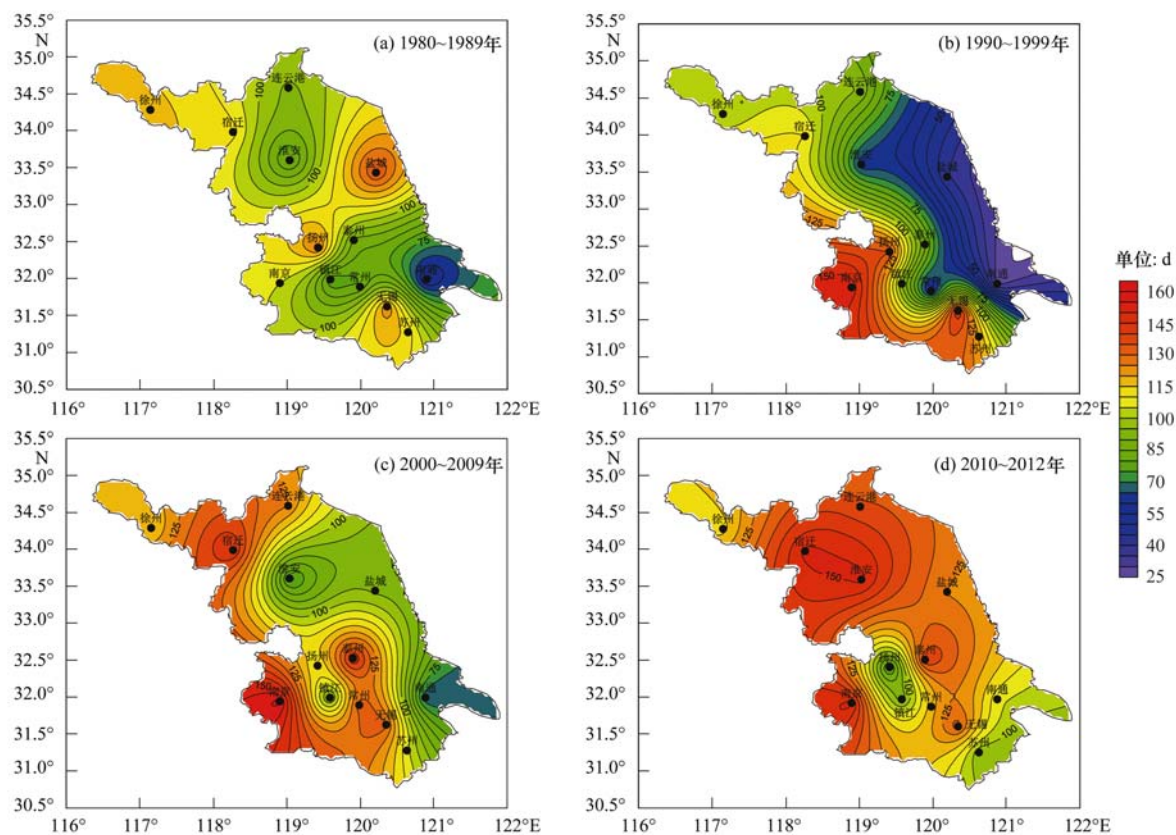


图 1 1980 ~ 2012 年不同年代霾日时空分布特征

Fig. 1 Spatial and temporal distribution of haze days from 1980 to 2012

2 霾日时空分布特征

2.1 年际年代际变化

20 世纪 80 年代以来,全省霾日总体呈增加趋势,重度和中度霾日也呈增加趋势(表 1).
从区域分布来看,20 世纪 80 年代苏中地区城市霾日不到 80 d,苏南和苏北城市都超过了 110 d. 90 年代沿海 3 个城市霾日下降,而苏南和沿江霾日都出现不同程度增加,其中南京增加最快,达到 154 d. 90 年代以后,苏北地区霾日增加较快,苏西南和苏南地区霾日变化不大(图 1).

表 1 不同等级霾年代际变化/ $d \cdot (a \cdot \text{station})^{-1}$

时间	重度霾	中度霾	霾日
1980 年	3.8	5.4	100.3
1990 年	4.8	6.9	94.4
2000 年	6.1	9.9	115.2
2010 ~ 2012 年	6.3	8.9	122.4

根据霾日变化特征及区域性差异,将全省 13 个地市分为 4 个区域:苏南(苏州、无锡和常州)、沿海(连云港、盐城和南通)、苏西南(镇江、扬州、泰州和南京)、苏北(徐州、淮安和宿迁)(图 2):苏南

三地霾日在 1980 年后基本维持在 90 ~ 150 d 之间,33 年内起伏不大;苏西南 4 个城市 33 a 霾日也基本持平;沿海三地霾日在 1995 年前后达到最低值,而后出现增长,尤其近 3 年来霾日数达到近 33 年来的最大;苏北三地霾日 1980 年后在 100 d 左右,1990 年下降到 90 d 左右后,2000 年后又呈上升趋势,这种增加趋势与沿海三地类似.

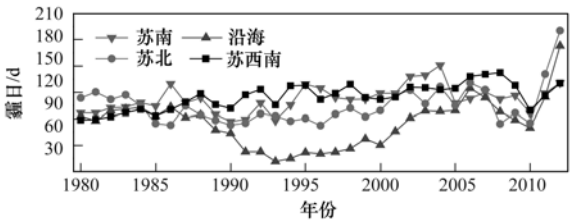


图 2 霾日的年际变化

Fig. 2 Changes of haze day

2.2 季节及月变化

全省不同程度霾具有显著季节特征(表 2),秋季(9 ~ 11 月)和冬季(12 月 ~ 次年 2 月)霾日较多,且两季差异不大,都为 393.8 d. 春季(3 ~ 5 月)和夏季(6 ~ 8 月)霾日较少,分别在 305 d 和 273.1 d 左右. 重度霾和中度霾分别在 18 d 和 30 d 以上. 四季分布也有区域性差异(图 3),但基本都是南部和

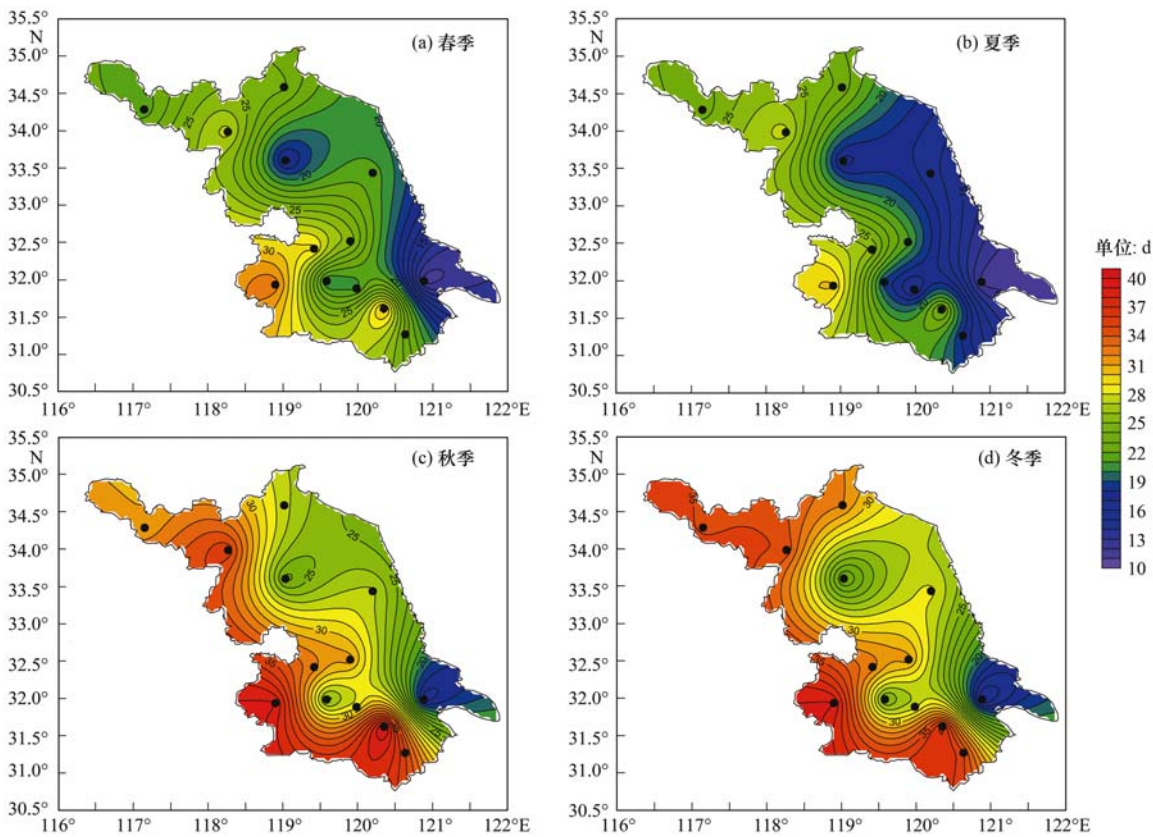


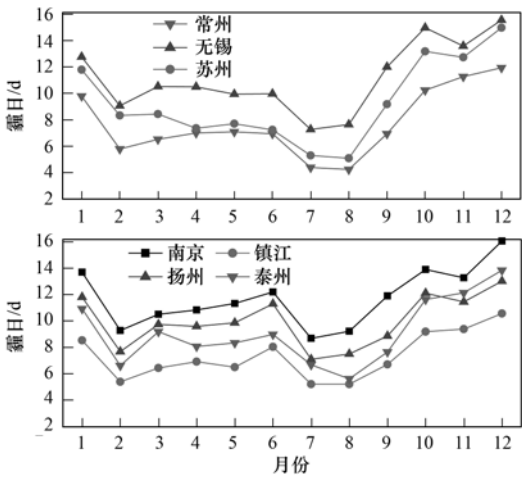
图 3 1980 ~ 2012 年全省 4 个季节霾日的空间分布(33 a 平均值)

Fig. 3 Spatial distribution of haze days in four seasons during 1980 and 2012

表 2 霾季节变化/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$

Table 2 Seasonal changes of haze/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$

季节	重度霾	中度霾	霾日
春季	9.2	15.7	305.0
夏季	9.3	16.4	273.1
秋季	17.9	29.8	393.8
冬季	18.4	31.3	393.8



西北部霾日较多、沿海较少.

全省 13 个城市霾日数的月变化中(图 4),10 月~次年 1 月霾日较多,其中无锡、苏州、南京、泰州、扬州、徐州、宿迁霾日较多,7~8 月霾日最少,除了苏州、无锡、常州这 3 个城市外,其他城市 6 月霾日数出现一个峰值,主要因为 6 月为夏收夏种期间,秸秆焚烧所产生污染造成空气质量恶化形成霾.

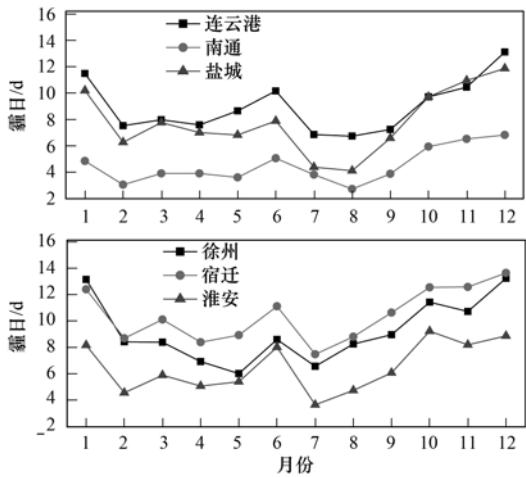


图 4 1980~2012 年全省 13 个城市霾月变化特征(33 a 平均值)

Fig. 4 Monthly changes of haze days during 1980 and 2012

2.3 连续霾的时空分布特征

随着经济的发展,霾持续时间与霾日数同步变化(表 3),1980~2012 年全省 13 个城市连续 3 d 及以上霾日数共 5 104 次,33 年中全省出现超过 8 d 的连续霾为 301 次,超过 12 d 的连续霾为 56 次,其中淮安、宿迁和南京各有一次过程持续时间超过了 20 d. 全省连续霾的分布与霾日分布呈正相关,霾日较

多的城市连续霾出现的次数也比较多. 图 5 选取了泰州和南京两个站点对比分析年霾日和连续霾日的年际变化特征,可以看出,连续 3 d 以上霾日出现次数与霾日出现次数呈正相关,且随着霾日数起伏.

不仅连续性霾日增多,区域性霾也逐年增多(图 6). 以相邻 3 个站点在同一天都出现霾统计为区域性霾,由于能见度在 5 000 m 以下霾影响较大,

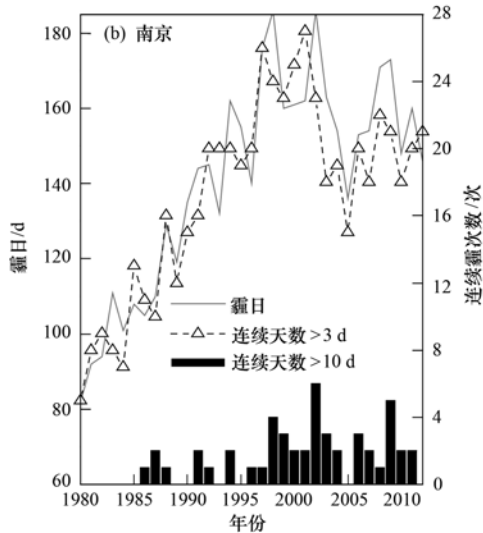
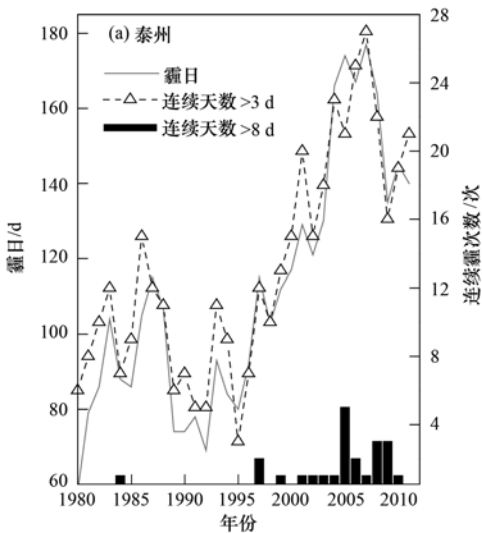


图 5 泰州及南京霾及连续性霾的年际变化特征

Fig. 5 Continuous haze days in Taizhou and Nanjing

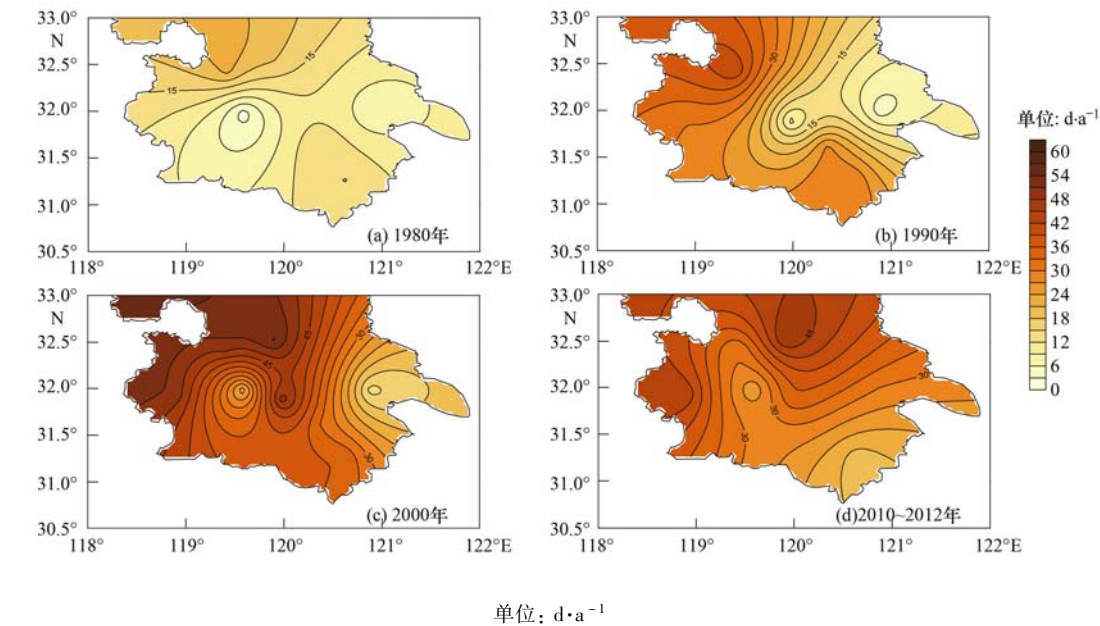


图 6 淮河以南地区年代际区域霾的时空分布特征

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of continuous haze days in the south of the Huaihe River

表 3 全省 13 个城市连续多日霾(次)
Table 3 Continuous haze day distribution (time)

城市	持续时间				霾天
	3 ~ 7 d	> 8 d	> 12 d	> 3 d	
南通	137	6	1	143	1 785
镇江	262	7	2	269	2 915
淮安	209	11	3	220	2 576
连云港	490	14	4	504	3 542
徐州	367	16	3	383	3 655
盐城	312	21	4	333	3 085
常州	299	22	4	321	3 041
扬州	458	22	0	480	3 966
泰州	403	22	2	425	3 626
苏州	402	31	5	433	3 673
宿迁	449	36	9	484	4 137
无锡	490	45	7	535	4 413
南京	526	48	12	574	4 653
全省	4 804	301	56	5 104	45 067

本部分选取能见度在5 000 m以下的霾. 1980 年代区域性霾较少,在 10 ~ 20 d 间; 1990 年代区域性霾增多,基本在 20 ~ 30 d, 2000 年代区域性霾日增加较快,大部分城市均多于 30 d,其中泰州最多为 542 d. 2010 ~ 2012 年仍然维持在 30 d 左右.

图 7 为淮河以南 8 个城市区域性霾日月变化特征,西部 4 个城市(南京、镇江、扬州和泰州)在 1 月、6 月和 10 ~ 12 月区域性霾日出现最多,东部 4 个城市(常州、无锡、苏州和南通)仅在 10 ~ 12 月较多. 西部城市 6 月区域性霾日较多与夏收夏种时期秸秆焚烧密切相关.

2.4 区域性霾的连续性特征

前面讨论了能见度5 000 m以下的不同城市霾的连续性特征和不同城市霾的区域性特征,以下讨

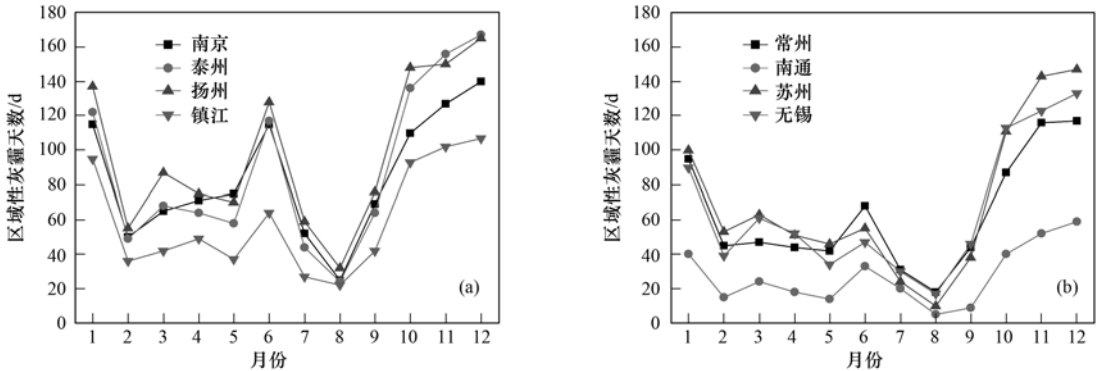


图 7 淮河以南地区区域性霾月变化(33 a 总和)

Fig. 7 Monthly changes of regional haze day in the south of the Huaihe River

论淮河以南 8 个城市能见度在5 000 m以下的连续多日霾的区域性特征. 同样选取 3 个站以上连续天数超过 3 d 的霾作为统计对象,从表 4 可以看出,连续 3 d 的出现站点超过 3 个的区域性霾 1980 ~ 2012 年间共出现了 71 次之多,4 d 的出现了 31 次之多,5 d 的出现了 11 次,而连续 6 ~ 11 d 的区域性霾在

淮河以南地区共计出现了 12 次,对于连续 6 d 以上的区域性霾,站点个数非常多,基本苏南城市无一遗漏.

从以上分析可以看出,连续多日的霾具有非常强的区域性特征. 且连续多日的区域性霾基本出现在 10 月 ~ 次年 2 月.

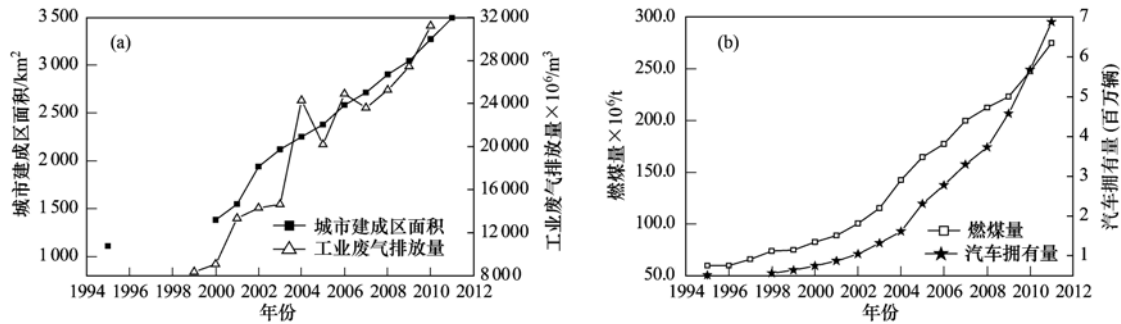
表 4 连续多日霾的区域性特征

Table 4 Regional characteristics of continuous haze days			
连续天数/d	次数	日期(年-月-日)	站数
3	71		
4	31		
5	11		
6	3	1994-07-24 ~ 1994-07-29	6
		2002-02-03 ~ 2002-02-08	7
		2004-12-12 ~ 2004-12-17	8
7	4	1990-12-04 ~ 1990-12-10	7
		1992-01-22 ~ 1992-01-28	8
		2003-01-08 ~ 2003-01-14	8
		2008-01-04 ~ 2008-01-10	8
8	1	2006-12-20 ~ 2006-12-27	7
9	1	2006-10-28 ~ 2006-11-05	8
10	2	1999-12-26 ~ 2000-01-04	8
		2001-11-16 ~ 2001-11-25	8
11	1	2006-10-04 ~ 2006-10-14	8

3 影响霾日变化的因素

从全省城市建成区总面积看,1994 ~ 2011 年底增加了 3.15 倍(图 8). 全省工业废气排放总量

2010 年底则比 1999 年增加了 2.74 倍. 2011 年底全省燃煤总量和汽车拥有量则分别比 1995 年增加了 4.6 倍和 12.45 倍,这与江苏省霾日的年际和年代际增加呈正相关关系.



(a) 城市建成区面积和工业废气排放量; (b) 燃煤量和汽车拥有量

图 8 全省各项社会经济指标

Fig. 8 Socio-economic indicators in Jiangsu Province

除了以上 4 项经济指标外,20 世纪 80 年来以来,江苏省及周边地区包括 NO_x、PM₁₀ 和 SO₂ 在内的污染物的年均排放量也与日俱增(图 9):①自 20 世纪 80 年代以来,三类污染物在空间分布上都是苏南及沿江地区高于苏北和沿海地区,所以苏南及沿江地区霾日大部分时间内都较苏北及沿海高;②2000 年后,苏北及沿海地区污染物排放量增加较

为显著,所以在近几年内苏北和沿海地区霾日增加显著;③淮河以南地区高浓度污染物区域已连成一片,且范围逐渐增大,所以这一区域内连续性霾和区域性霾增多显著.

霾的形成由多种气象要素和环境要素决定,且与气温和相对湿度这两类气象要素关系较为密切. 有研究认为气象条件变化、区域城市化和土地利用

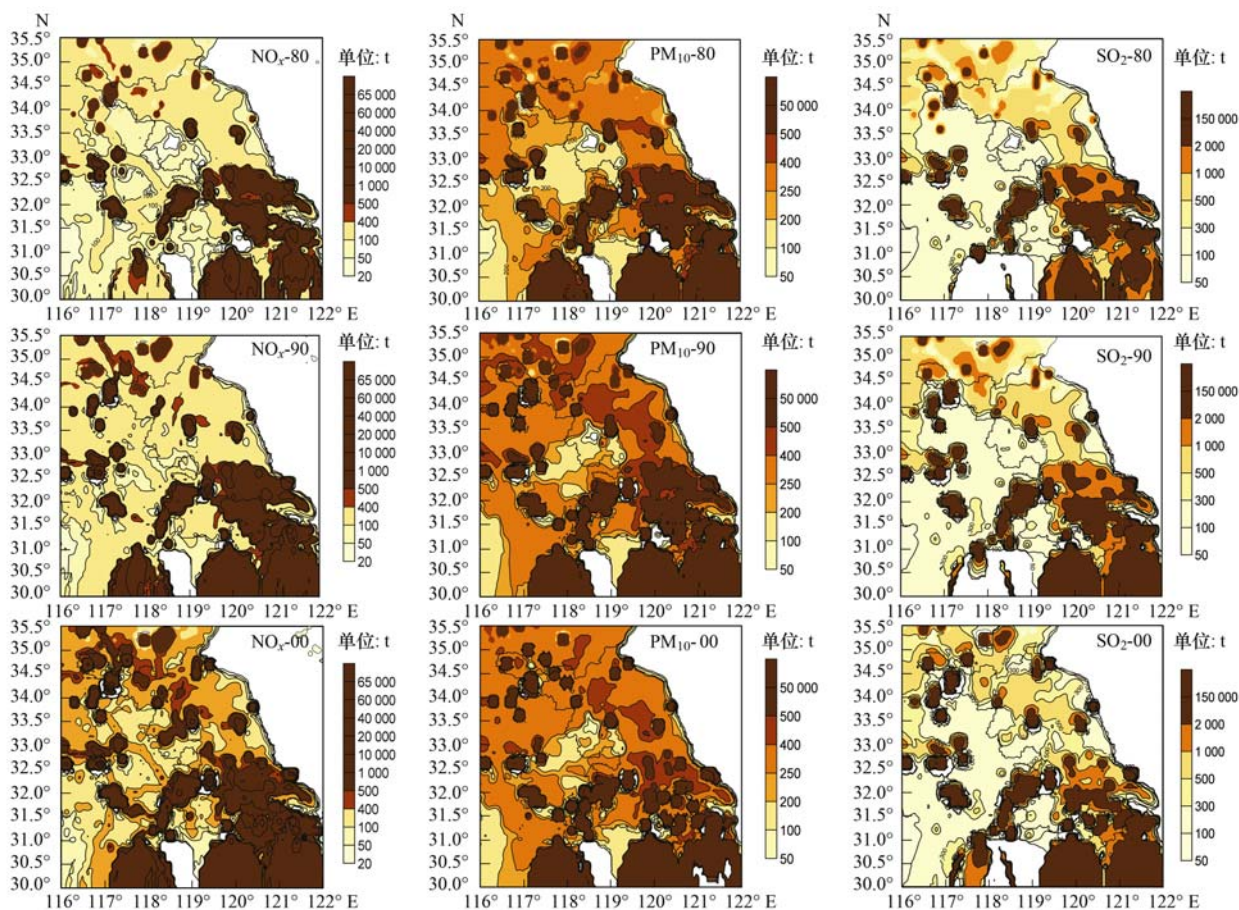


图9 江苏及周边地区 NO_x 、 PM_{10} 和 SO_2 年排放总量的年代际变化图(年均值)

Fig. 9 Decadal changes of the NO_x , PM_{10} and SO_2 emissions in Jiangsu Province and neighboring areas

变化会导致气温升高和相对湿度下降^[12,21,43],从而霾出现频率增多. Li 等^[26]分析了1978年后中国城市及经济发展后对雾的影响,其研究发现,随着城市建成区面积的扩大,城市植被覆盖率逐年下降,相对湿度减小,城市热岛相应越来越明显,城市雾日呈减少趋势.可见,城市面积的扩大,工业废气排放量的增加及燃煤量的增加,导致了城市霾日增加.

1980~2012年江苏省4个区域年平均气温和平均相对湿度都出现了较大变化(图10),1980~2006年气温升高显著、相对湿度则呈下降趋势,这一时段内,全省4个区域内的霾日呈上升趋势,2006~2012年4个区域的气温都又呈下降趋势,除了苏北三城市的相对湿度仍然下降外,其他地区基本保持不变,从而苏南及苏西南霾日数也出现了相应的下降.另外,由于2000年以来苏北、苏西南及苏南的相对湿度远远低于沿海地区,且苏南和苏西南气温高于沿海城市,所以内陆霾日数要高于沿海.

从以上分析可知,随着城市和经济的发展,城市建

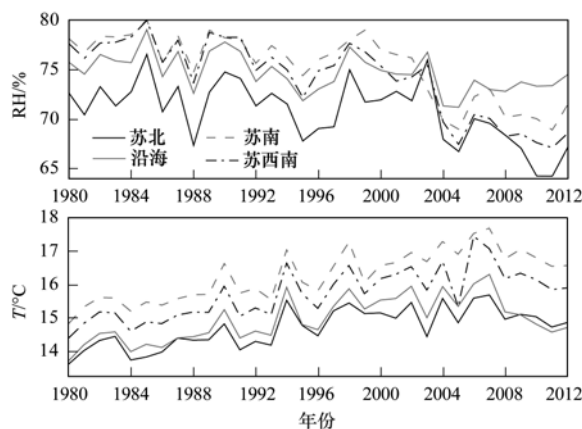


图10 全省13个城市年平均气温和相对湿度的逐年变化

Fig. 10 Average annual temperature and RH of Jiangsu Province

成区面积扩大,工业废气及汽车尾气排放量增加,导致城市及周边气象环境出现变化,气温缓慢增高,空气相对湿度降低,从而形成城市热岛和干岛效应,雾形成条件逐渐减弱;另外,污染物排放量的增加则增强了霾形成和维持条件,所以持续性霾、区域性霾和持续性区域霾也增加较为显著.

4 结论

(1)1980~2012年间江苏省范围内霾日呈增加趋势,重度和中度霾增加显著,苏北和沿海城市霾日增加显著。秋季和冬季节霾日最多,夏季最少。秋、冬季霾主要在内陆,沿海略少。10月~次年1月霾日最多;除苏南三城市,6月其他城市霾日都比较多。

(2)1980年代全省霾日较为均匀,1990年代苏南、苏西南增加,2000年代江淮之间和苏北开始增加,2010~2012年苏北霾日增加显著,苏南地区霾日略有减少。霾持续时间及区域性霾的日数与霾日数同步变化,霾日较多的城市连续霾出现的次数也比较多。

(3)城市建成区面积逐年扩大、由工业及汽车尾气排放的污染物逐年增加,导致区域气温升高、空气相对湿度下降,加上污染物的增多,增强了霾形成和维持的条件,持续性霾、区域性霾和持续性区域霾也增加较为显著。

参考文献:

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] 中国气象局. 霾的观测和预报等级[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [3] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [4] 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1057-1062.
- [5] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 416-423.
- [6] 马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 等. 佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3549-3554.
- [7] 钱冉冉, 闫景明, 吴水平, 等. 厦门市冬春季灰霾期间大气 PM_{10} 中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2939-2945.
- [8] 黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 等. 北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1236-1244.
- [9] 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 等. 广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1982-1987.
- [10] 陶俊, 柴发合, 高健, 等. 16届亚运会期间广州城区 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及其对霾天气的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 409-415.
- [11] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1894-1898.
- [12] 高歌. 1961-2005年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(7): 761-768.
- [13] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(3): 397-406.
- [14] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 257-269.
- [15] 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006~2009年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2925-2932.
- [16] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, **97**(3-4): 235-242.
- [17] Westcott N E, Kristovich D A R. A climatology and case study of continental cold season dense fog associated with low clouds[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, **48**(11): 2201-2214.
- [18] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Vega-Rodríguez M I, *et al.* Comparison of regression techniques for mapping fog frequency: application to the Aragón region (northeast Spain) [J]. International Journal of Climatology, 2009, **30**(6): 935-945.
- [19] Tokinaga H, Xie S P. Ocean tidal cooling effect on summer sea fog over the Okhotsk Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, **114**(D14): doi: 10.1029/2008JD011477.
- [20] 周宁芳, 李峰, 饶晓琴, 等. 2006年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象, 2008, **34**(6): 81-88.
- [21] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析[J]. 地理学报, 2010, **65**(5): 533-542.
- [22] 牛彧文, 顾骏强, 浦静姣, 等. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(6): 807-812.
- [23] 张蓬勃, 姜爱军, 孙佳丽, 等. 江苏秋季霾的年代际变化特征及其影响因素分析[J]. 气候变化研究进展, 2012, **8**(3): 205-212.
- [24] 宋娟, 程婷, 谢志清, 等. 江苏省快速城市化进程对雾霾日时空变化的影响[J]. 气象科学, 2012, **32**(3): 275-281.
- [25] 石春娥, 翟武全, 杨军, 等. 长江三角洲地区四省会城市 PM_{10} 污染特征[J]. 高原气象, 2008, **27**(2): 408-414.
- [26] Li Z H, Yang J, Shi C N, *et al.* Urbanization effects on fog in China: field research and modeling [J]. Pure & Applied Geophysics, 2012, **169**(6): 927-939.
- [27] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 31-36.
- [28] 王喜全, 孙明生, 杨婷, 等. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(2): 165-170.
- [29] 魏文秀. 河北省霾时空分布特征分析[J]. 气象, 2010, **36**(3): 77-82.
- [30] 吴兑, 刘啟汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子($PM_{2.5}$)污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- [31] 黄健, 吴兑, 黄敏辉, 等. 1954—2004年珠江三角洲大气能见度变化趋势[J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 61-70.
- [32] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广

- 州地区能见度下降[J]. 热带气象学报, 2007, **23**(1): 1-6.
- [33] 张运英, 黄菲, 杜鹃, 等. 广东雾霾天气能见度时空特征分析——年际年代际变化[J]. 热带地理, 2009, **29**(4): 324-328.
- [34] 钱峻屏, 黄菲, 杜鹃, 等. 广东省雾霾天气能见度的时空特征分析 I: 季节变化[J]. 生态环境, 2006, **15**(6): 1324-1330.
- [35] Vautard R, Yiou P, Van Oldenborgh G J. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years [J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(2): 115-119.
- [36] 潘敖大, 范苏丹, 陈海山. 江苏省近 45 a 极端气候的变化特征[J]. 气象科学, 2010, **30**(1): 87-92.
- [37] 姜爱军, 项瑛, 彭海燕, 等. 近 40 a 江苏省各区域气候变化分析[J]. 气象科学, 2006, **26**(5): 525-529.
- [38] 毛宇清, 孙燕, 姜爱军, 等. 南京地区霾预报方法试验研究[J]. 气候与环境研究, 2011, **16**(3): 273-279.
- [39] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [40] 吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 327-330.
- [41] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, **31**(4): 3-7.
- [42] 周自江, 朱燕君, 鞠晓慧. 长江三角洲地区的浓雾事件及其气候特征[J]. 自然科学进展, 2007, **17**(1): 66-71.
- [43] Yang Y J, Wu B W, Shi C N, *et al.* Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui Province, China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2012, **170**(11): 1969-1983.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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

国内外公开发行人