

近10年中国大气PM₁₀污染时空格局演变

李名升, 张建辉, 张殷俊, 周磊, 李茜, 陈远航
(中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 为分析近10年来中国PM₁₀污染时空格局演变, 运用统计学和GIS方法对2002-2012年PM₁₀监测数据进行分析, 结果表明: ① 地级及以上城市p (PM₁₀) 年均值由0.130 mg·m⁻³下降至0.076 mg·m⁻³, 达标城市比例由37.6%上升至92.0%; 环保重点城市p (PM₁₀) 日均值超标天数比例由24.7%下降至7.0%。② 12月份PM₁₀污染最重, 其次为1月和11月; 8月份污染最轻, 其次为7月和9月。③ PM₁₀的重污染区域明显减小, 由集中连片分布变为零星点状分布。但空间格局未发生明显变化, 北方尤其是西北、华北地区及山东、江苏、湖北一直是PM₁₀污染相对严重地区。④ 北方地区PM₁₀污染重于南方地区, 两者的差异主要发生在北方采暖期(1-4月及11-12月)。⑤ PM₁₀污染的改善主要体现在重污染城市的改善, 1/10左右的重污染城市对降低全国PM₁₀平均浓度的贡献约占1/3, 而清洁城市PM₁₀污染则有加重趋势。⑥ 环保重点城市污染天气以轻度污染为主, 占全部污染天数的80.4%。受沙尘天气影响, 3、4月份发生严重污染天气的比例较高。

关键词: 可吸入颗粒物; PM₁₀; 时空格局; 空间分异; 空气质量

DOI: 10.11821/dlxb201311006

随着工业化、城市化快速发展及机动车保有量的大幅增加, 环境空气质量尤其是城市空气质量受到不同程度污染, 已成为威胁可持续发展和人类健康的重要挑战。影响环境空气质量的主要污染物包括二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、臭氧(O₃)、颗粒物(PM)及有机物等。其中, 颗粒物是空气污染中较为普遍且危害较大的污染物之一^[1]。颗粒物中空气动力学直径小于或等于10 μm的称为可吸入颗粒物(PM₁₀)。由于PM₁₀能够进入人体的呼吸系统甚至深入肺泡进入人体的血液循环^[2-3], 对人体健康的危害更大。有研究表明: 空气中可吸入颗粒物的浓度与呼吸统疾病、心脑血管疾病等的发病率、死亡率有很强的正相关关系^[4-5], 此外, 颗粒物浓度对大气能见度^[6]和全球气候变化^[7]也有重要影响。因此, 围绕污染分布^[8]、健康风险评价^[9]、污染来源^[10]、影响因素^[11]、预测与模拟^[12-13]等方面, PM₁₀的研究已经成为国际大气环境研究的热点之一。

PM₁₀是影响我国环境空气质量的首要污染物^[14], 开展对PM₁₀的相关研究对我国更具有重要意义。自2000年以来, 众多学者在PM₁₀的污染特征^[15-16]、健康评价^[17-19]、源解析^[20]、跨界污染^[21]等方面取得了可喜的成果, 分析气象因素^[22-23]、沙尘^[24]等条件对PM₁₀污染的影响, 试图建立颗粒物的排放源清单^[25], 尝试应用遥感手段进行PM₁₀监测^[26-27]。但这些研究多针对某一城市, 且时间序列较短^[15-16, 18-20], 缺乏大尺度长时间序列的研究, 对PM₁₀空间分布规律的探讨更少。

本文利用地级及以上城市2002年以来的监测数据对PM₁₀污染时空格局进行分析, 以

收稿日期: 2013-05-28; 修订日期: 2013-07-26

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201304301); 教育部人文社会科学研究基金项目(10YJCZH130; 11YJA630008) [Foundation: The Forestry Public Welfare Project of China, No.201304301; The Research Projects of the Social Science and Humanity of the Ministry of Education, No.10YJCZH130; No.11YJA630008]

作者简介: 李名升(1981-), 男, 山东安丘人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境质量综合分析与评价研究。

E-mail: lirms@cncemc.cn

期为我国PM₁₀污染防控提供科学依据。

1 数据处理与说明

本文中所称地级及以上城市含地级地区、自治州、盟及部分省辖县级市,环境保护重点城市是指原国家环保总局于2002年划定的大气污染防治重点城市。由于监测条件、数据传输等原因,每年地级及以上城市和环保重点城市所包含的城市数量略有差别,其中地级及以上城市自2008年起保持在325个,环保重点城市自2006年起保持在113个。城市名单参见《中国环境质量报告2011》^[14]。

我国颗粒物监测经历了降尘—总悬浮颗粒物(TSP)—可吸入颗粒物(PM₁₀)—细颗粒物(PM_{2.5})的过程。2000年开始,部分城市开始开展PM₁₀监测,大部分城市仍然监测TSP;2002年,监测PM₁₀和TSP的城市各约占1/2;至2006年,地级及以上城市基本实现PM₁₀监测。

由于部分城市在研究初期未开展PM₁₀监测,根据《环境空气质量标准》^[28](GB 3095-1996,以下所称《环境空气质量标准》均为此标准)中PM₁₀和TSP的标准限值,将监测TSP城市的TSP监测数据按下式进行统一换算,换算后的数值作为本研究中PM₁₀的浓度值:

$$\rho_{iPM_{10}} = \frac{S_{PM_{10}}}{S_{TSP}} \cdot \rho_{iTSP}$$

式中, i 为第 i 个城市, S 为《环境空气质量标准》中PM₁₀或TSP的年均值二级标准限值, ρ_{TSP} 为TSP的实际监测值, $\rho_{PM_{10}}$ 为PM₁₀的换算浓度值。

2 PM₁₀污染时空格局演变

2.1 时间变化趋势

2.1.1 地级及以上城市年均值变化 2002年以来,全国地级及以上城市 ρ (PM₁₀)年均浓度的平均值呈下降趋势,由2002年的0.130 mg·m⁻³下降至2012年的0.076 mg·m⁻³,降幅为41.5%。并且自2005年起,年均浓度平均值已优于《环境空气质量标准》中PM₁₀年均浓度二级标准限值(0.10 mg·m⁻³)。

在全国PM₁₀平均浓度下降的同时,地级及以上城市中 ρ (PM₁₀)年均值达到或好于《环境空气质量标准》中二级标准限值的城市(简称达标城市)逐年增多,达标城市占全部地级及以上城市的比例由2002年的37.6%上升至2012年的92.0%。即,11a来,平均每年约有18个地级及以上城市PM₁₀污染程度由超标变为达标。

利用Spearman秩相关系数法对地级及以上城市PM₁₀的变化趋势及统计学显著性特征进行分析,结果显示:有11a完整监测数据的306个城市中, ρ (PM₁₀)年均值呈下降趋势的265个,占86.6%,其中180个呈显著下降趋势($p = 0.05$);呈上升趋势的41个,占13.4%,其中仅8个呈显著上升趋势($p = 0.05$)。

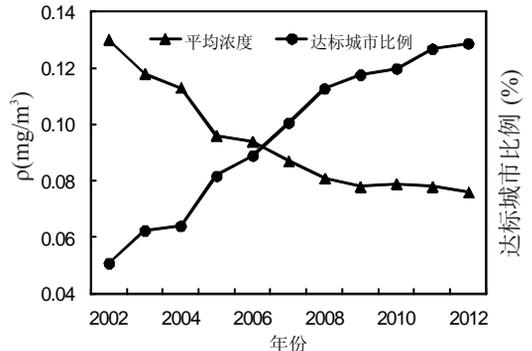


图1 2002-2012年中国地级及以上城市 ρ (PM₁₀)年均值与达标城市比例变化趋势

Fig. 1 The PM₁₀ concentration and ratio of reaching standard cities at county level or above in China from 2002 to 2012

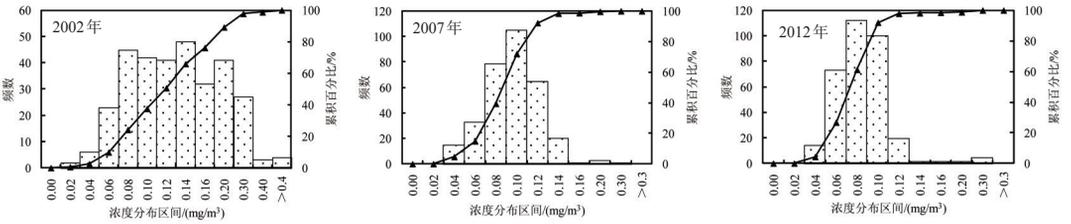


图2 主要年份中国地级及以上城市 ρ (PM_{10}) 年均值分布直方图

Fig. 2 PM_{10} concentration distribution histogram at county level or above in China in 2002, 2007 and 2012

分析历年各城市 ρ (PM_{10}) 年均值分布直方图 (图2) 可看出: ① 浓度分布区间在逐年缩小。2002年浓度分布区间为 $0.012\sim 0.728\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 2012年已缩小至 $0.021\sim 0.262\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。② 城市集中分布趋势明显。2002年分布于区间 $0.04\sim 0.10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的城市数量仅为110个 (占全部城市数的35.0%), 至2007年已增长至217个, 2012年则增长至285个 (占全部城市数的87.7%)。③ 高浓度区和低浓度区城市分布变化趋势不一致。低浓度区 ($0\sim 0.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 城市数量11 a来保持在10个左右, 而高浓度区 ($>0.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 城市数量由2002年的32个减少至2012年的4个。

2.1.2 环保重点城市日均值变化

根据环保重点城市空气质量日报监测系统, 环保重点城市 ρ (PM_{10}) 日均值超过《环境空气质量标准》中二级标准限值 ($0.15\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的天数 (超标天数) 占监测总天数的比例呈逐年下降趋势 (图3)。2002年, 超标天数为24.7%, 此后逐年下降, 至2008年超标比例已降至10%以下。2012年, 超标比例进一步降低至7.0%, 较2002年降低14.4个百分点。因此, 11a

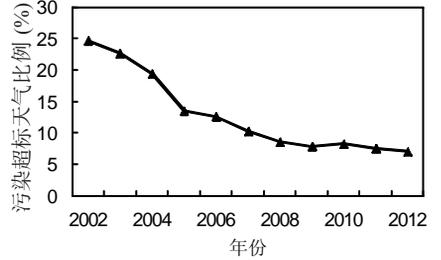


图3 中国环保重点城市超标天数比例年际变化

Fig. 3 Ratio of daily PM_{10} concentration exceeding standard in the key environmental protection cities in China from 2002 to 2012

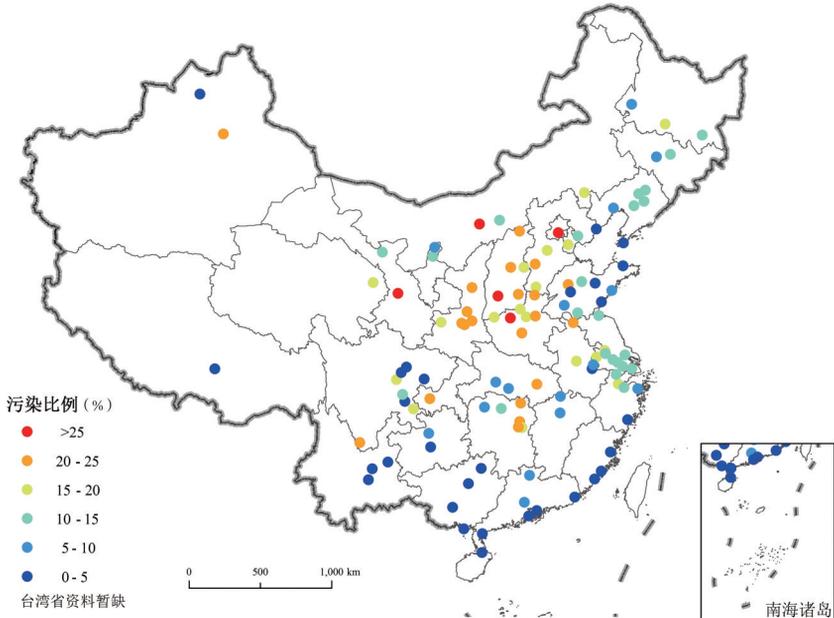


图4 中国环保重点城市 ρ (PM_{10}) 日均值总体超标天数比例

Fig. 4 Ratio of daily PM_{10} concentration exceeding standard of key environmental protection cities in China

来, 每个城市平均每年有6.4天PM₁₀污染等级由污染变为优或良。

分城市看, 城市间PM₁₀污染差异较大。珠海、湛江、海口3市11a中均未发生PM₁₀超标现象, 而徐州、临汾、包头3市2002年超标天数比例在80%以上。总体而言, 30个城市超标天数比例低于5%, 主要分布在东部沿海地区; 有26个城市11a中超标天数比例超过20%, 其中兰州、临汾、包头、北京4个城市超过30%。

分月份看, 12月份超标比例最高, 为26.0%, 其次为1月和11月; 8月份超标比例最低, 为3.0%, 其次为7月和9月。按季度看, 春、夏、秋、冬季超标比例分别为12.0%、4.5%、12.2%、21.6%, 夏季PM₁₀污染较轻, 冬季最重。

2.2 空间变化趋势

以地级及以上城市2002年、2007年和2012年份 ρ (PM₁₀) 年均值数据在ArcGIS中进行空间插值, 得到相应年份我国PM₁₀污染的空间格局分布图(图6)。

2002-2012年, 全国PM₁₀污染有较大程度减轻, 重污染区域也明显减小, 且由集中连片分布变为零星点状分布。但从区域分布看, PM₁₀污染空间格局未发生明显变化, 北方地区尤其是西北、华北地区及山东、江苏、湖北是我国PM₁₀污染相对严重地区。

2002年, 全国PM₁₀污染极其严重, 除东南沿海、两广地区、海南、云南等地外, 其

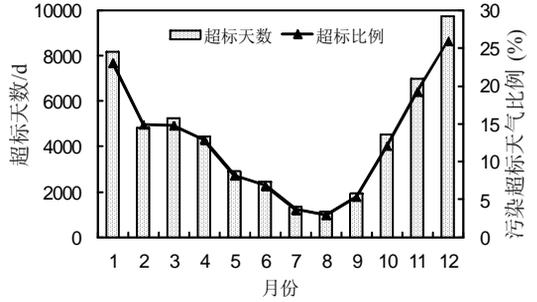


图5 中国环保重点城市超标天数月度分布

Fig. 5 Monthly days which daily PM₁₀ concentration exceeding standard in the key environmental protection cities in China

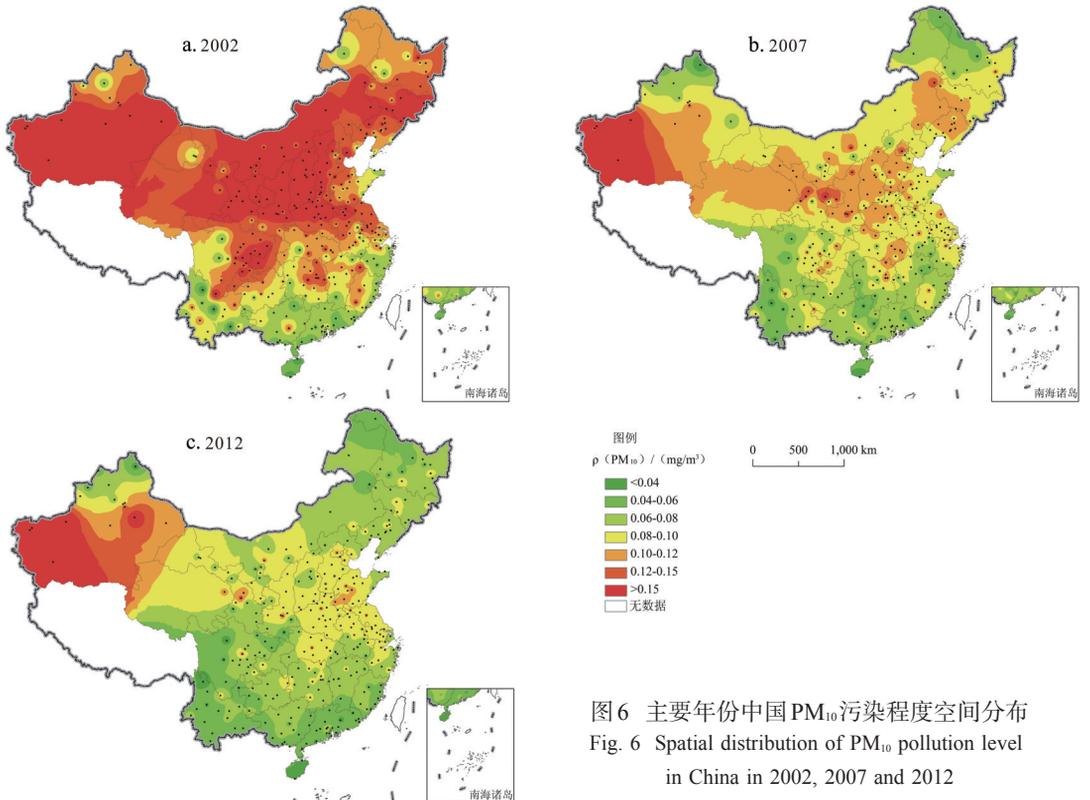


图6 主要年份中国PM₁₀污染程度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of PM₁₀ pollution level in China in 2002, 2007 and 2012

余地区呈现大范围连片超标现象。其中,华北、西北地区大部分城市,吉林、河南、四川、山东等省的部分城市污染最为严重,空气中 $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值劣于《环境空气质量标准》中三级标准限值。

2007年与2002年相比,全国 PM_{10} 污染区域明显减少:西北地区的新疆、甘肃部分地区,华北地区的内蒙古、河北部分地区,华东地区大部地区,西南地区四川、贵州大部地区,中南地区湖北、湖南大部地区 $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值已达标;污染程度明显减轻:超标现象多为超过二级标准,仅新疆部分地区和宁夏固原地区劣于三级标准。

2012年,仅新疆部分地区 PM_{10} 污染呈连片分布,其他超标地区呈零星分布状态。

3 PM_{10} 污染空间分异分析

3.1 南方地区与北方地区变化状况

将大陆地区31个省(自治区、直辖市)划分为南方地区和北方地区^①进行分析,结果表明:

(1) 与全国 $\rho(\text{PM}_{10})$ 变化趋势一致,南方和北方地区 $\rho(\text{PM}_{10})$ 也均呈下降趋势,但北方地区降低幅度(48.4%)明显大于南方地区(31.5%)。

(2) 北方地区气温相对较低,冬季普遍燃煤取暖,气候条件也有利于颗粒物的生成与堆积,且受沙尘天气影响明显。因此,北方地区 PM_{10} 污染明显重于南方地区, $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均高出南方地区 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(3) 南北方地区 PM_{10} 污染差异在逐年缩小,两者 $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值的极差已由2002年的 $0.067 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 缩小至2012年的 $0.018 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(4) 南、北方地区 PM_{10} 污染差异主要发生在1-4月及11-12月。5-10月,虽然北方地区 PM_{10} 污染重于南方地区,但两者相差不大, $\rho(\text{PM}_{10})$ 日均值超标天数比例仅相差2个百分点。在其余6个月份, $\rho(\text{PM}_{10})$ 日均值超标天数比例相差12个百分点。

(5) 南方地区10月份污染程度在12个月份中居第4位,而北方地区10月份污染程度居第7位;北方地区2月份污染程度居第4位,南方地区2月份污染程度居第6位。其余10个月份按污染程度所排位次基本相同。

3.2 重污染城市与清洁城市变化状况

3.2.1 重污染城市 2006年, PM_{10} 污染最重的30个地级及以上城市依次为:和田、阿克苏、吕梁、忻州、固原、兰州、阿图什、临汾、喀什、北京、大同、达州、乌鲁木齐、中卫、兴安、运城、库尔勒、石家庄、太原、平顶山、白银、渭南、包头、邢台、赤峰、西宁、西安、延安、长治、乌海, $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值分布区间为 $0.128\sim 0.274 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $0.161 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中,14个城市年均浓度大于 $0.150 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,劣于三级标准限值。30个

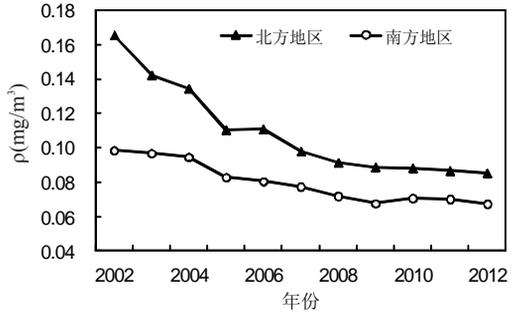


图7 南方与北方地区地级及以上城市 $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值变化趋势

Fig. 7 Annual average PM_{10} concentration of southern and northern China

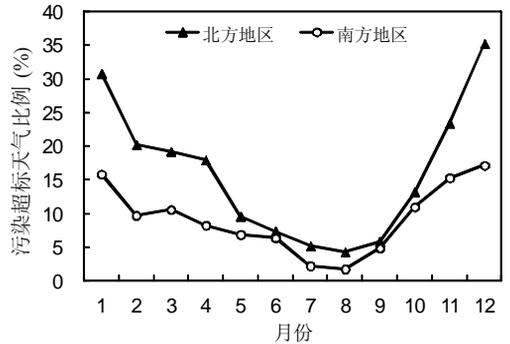


图8 南方与北方地区环保重点城市 $\rho(\text{PM}_{10})$ 日均值逐月超标比例

Fig. 8 Monthly ratio of daily PM_{10} concentration exceeding standard of southern and northern China

^① 本文北方地区指华北、东北、西北诸省及山东、河南,其余省份为南方地区。

城市分布于11个省(自治区、直辖市),其中山西和新疆数量最多,分别为7个和6个。除平顶山外,其余29个城市均分布于我国西北、华北地区。

2012年,上述30个城市 ρ (PM₁₀)分布区间为0.037~0.262 mg·m⁻³,平均值为0.111 mg·m⁻³。其中,仅4个城市年均浓度劣于三级标准限值。与2006年相比,仅喀什地区年均浓度出现上升,其余城市均有不同程度下降,降幅在4.4%~75.2%。

定义 C_i 为*i*城市 ρ (PM₁₀)变化对全国 ρ (PM₁₀)变化的贡献:

$$C_i = \frac{\rho_{it} - \rho_{it_0}}{\sum(\rho_{it} - \rho_{it_0})} \cdot 100\%$$

式中, ρ 为*i*城市PM₁₀的年均浓度, t 为年份, t_0 为基准期年份。

则上述30个城市2006-2012年 ρ (PM₁₀)变化对同期全国 ρ (PM₁₀)变化的贡献率为30.5%。即:全国1/10左右的城市对降低全国PM₁₀平均浓度的贡献约占1/3。

3.2.2 清洁城市 2006年,PM₁₀污染最轻的30个城市按依次为:三亚、阿勒泰、景洪、康定、桂林、梧州、大理、河源、阳江、丽江、楚雄、伊春、海口、香格里拉、北海、汕尾、珠海、钦州、赣州、马尔康、惠州、湛江、普洱、娄底、永州、柳州、日照、威海、烟台、梅州, ρ (PM₁₀)年均值分布区间为0.019~0.056 mg·m⁻³,平均值为0.042 mg·m⁻³。12个城市年均浓度好于空气质量一级标准限值。

2012年,上述30个城市中有22个城市 ρ (PM₁₀)有不同程度的上升,上升幅度在6.1%~136.7%。浓度分布区间为0.021~0.086 mg·m⁻³,平均值为0.049 mg·m⁻³,比2006年升高16.7%。

根据贡献率公式,上述30个城市2006-2012年PM₁₀浓度变化对同期全国PM₁₀浓度变化的贡献率为-4.1%。

4 PM₁₀重污染天气分析

空气污染指数(API)是根据环境保护部《环境空气质量标准》(GB3095-1996)和污染物对生态环境及人体健康的影响程度,将常规监测污染物的日均质量浓度转化为单一的概念性指数值,并分级表征当天空气污染程度。

2002-2012年,环保重点城市共发生污染天数54312天。污染天气以轻微污染为主,占全部污染天数的80.4%,轻度污染、中度污染和重污染分别占13.9%、2.3%和3.4%。

分月份看,轻度及以上污染(以下简称轻度污染)与重污染的月度分布并不完全一致(图9):轻度污染主要发生在12月、1月及11月,占全年的55.4%;重污染天气主要发生在12月、1月及3月,占全年的55.7%。3月和4月重污染占轻度污染天数的比例最高,尤其是3月中下旬重污染天数较多,比例更高。这可能与我国3、4月份沙尘天气多发有关:根据《沙尘天气年鉴》^[29],2002-2009年间,3、4月份沙尘天气发生天数占全年的62.3%。

北方地区发生轻度及重污染天气较多,分别占全国的75.0%和87.1%。重污染天数最多的30个城市均位于北方,轻度污染最多的30个城市中有26个位于北方。

表1 API范围及空气质量等级
Tab. 1 Ranges of API and their grade

API	空气质量等级	对健康影响
0-50	优	可正常活动
51-100	良	可正常活动
101-150	轻微污染	易感人群症状有轻度加剧,健康人群出现刺激症状
151-200	轻度污染	易感人群症状有轻度加剧,健康人群出现刺激症状
201-300	重度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧,运动耐受力降低,健康人群中普遍出现症状
>300	重污染	健康人运动耐受力降低,有明显强烈症状,提前出现某些疾病

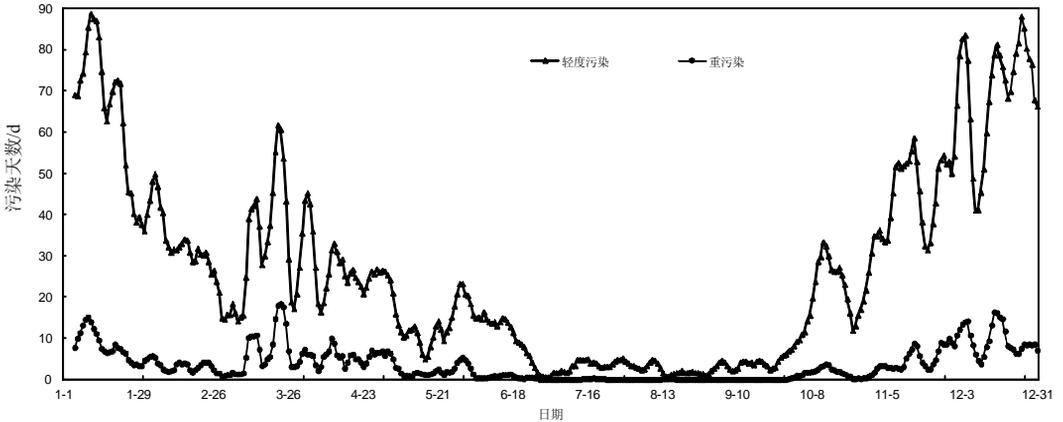


图9 中国环保重点城市轻度和重污染天数5日滑动平均分布

Fig. 9 The days of slightly pollution and severe pollution by 5 days moving average in the key environmental protection cities in China

5 结论

(1) 2002-2012年, 全国 PM_{10} 污染明显减轻: 地级及以上城市 $\rho(PM_{10})$ 年均值由 $0.130\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $0.076\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 达标城市比例由37.6%上升至92.0%; 58.8%的地级及以上城市 $\rho(PM_{10})$ 呈显著下降趋势, 仅2.6%的城市呈显著上升趋势; 环保重点城市 $\rho(PM_{10})$ 日均值超标天数比例由24.7%下降至7.0%。

(2) 12月份 PM_{10} 污染最重, 超标天数比例为26.0%, 其次为1月和11月; 8月份污染最轻, 超标天数比例为3.0%, 其次为7月和9月。

(3) 11a来, PM_{10} 的重污染区域明显减小, 且由集中连片分布变为零星点状分布。但从区域分布看, PM_{10} 污染空间格局未发生明显变化, 北方尤其是西北、华北地区及山东、江苏、湖北是我国 PM_{10} 污染相对严重地区。

(4) 北方地区 PM_{10} 污染重于南方地区, $\rho(PM_{10})$ 平均高出南方地区 $0.29\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。但北方地区 $\rho(PM_{10})$ 11a间降低48.4%, 降幅高于南方地区31.5%的降幅。

(5) 南北方污染程度的差异主要发生在1-4月及11-12月。5-10月, 两者 $\rho(PM_{10})$ 日均值超标天数比例仅相差2个百分点, 而在其余6个月份, $\rho(PM_{10})$ 日均值超标天数比例相差12个百分点。

(6) 11a来, 中国 PM_{10} 污染的改善主要体现在重污染城市的改善, 1/10左右的重污染城市对降低全国 PM_{10} 平均浓度的贡献约占1/3, 而清洁城市 PM_{10} 污染则有加重趋势。因此, 就 PM_{10} 而言, 中国尚未摆脱工业化国家“先污染, 后治理”的发展道路。

(7) 环保重点城市污染天气以轻度污染为主, 占全部污染天数的80.4%。受沙尘天气影响, 3、4月份发生重污染天气的比例较高。

参考文献 (References)

- [1] Hu M G, Jia L, Wang J F et al. Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Beijing, China using the empirical mode decomposition method. *Science of the Total Environment*, 2013, (458-460): 70-80.
- [2] Qiu H, Yu I T, Tian L W et al. Effects of coarse particulate matter on emergency hospital admissions for respiratory diseases: A time-series analysis in Hong Kong. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(4): 572-576.
- [3] Brunekreef B, Holgate S T. Air pollution and health. *The Lancet*, 2002, 360(9341): 1233-1242.

- [4] Laden F, Schwartz J, Speizer F E et al. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard six cities study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2006, 173(6): 667-672.
- [5] Yanosky J D, Paciorek C J, Schwartz J et al. Spatio-temporal modeling of chronic PM₁₀ exposure for the nurses' health study. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(18): 4047-4062.
- [6] Tsai Y I, Kuoc S C, Lee W J et al. Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two rural areas of Taiwan. *Science of Total Environment*, 2007, 382(2/3): 324-341.
- [7] Buseck P R, Posfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: Effects on climate and the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(7): 3372-3379.
- [8] Juneng L, Latif M T, Tangang F T et al. Spatio-temporal characteristics of PM₁₀ concentration across Malaysia. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(30): 4584-4594.
- [9] Zelm R, Huijbregts M A J, Den Hollander H A et al. European characterization factors for human health damage of PM₁₀ and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(3): 441-453.
- [10] Chuersuan N, Nimrat S, Lekphet S et al. Levels and major sources of PM_{2.5} and PM₁₀ in Bangkok Metropolitan Region. *Environment International*, 2008, 34(5): 671-677.
- [11] Juneng L, Latif M T, Tangang F. Factors influencing the variations of PM₁₀ aerosol dust in Klang Valley, Malaysia during the summer. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(26): 4370-4378.
- [12] Perez P. Combined model for PM₁₀ forecasting in a large city. *Atmospheric Environment*, 2012, 60(4): 271-276.
- [13] Wang W C, Chen K S, Wang S K et al. Modeling atmospheric PM₁₀ concentrations during severe pollution events in southern Taiwan. *Atmospheric Research*, 2009, 92(2): 159-171.
- [14] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. *China Environment Quality Report 2011*. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. [中华人民共和国环境保护部. 中国环境质量报告2011. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.]
- [15] Pan Jianguo, Cao Junji, Mai Chaoan et al. Spatial-temporal variations of atmospheric PM₁₀ over Zhuhai. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(5): 6-10. [潘建国, 曹军骥, 麦潮安等. 珠海空气中可吸入颗粒物 (PM₁₀) 的时空变化特征. 环境科学研究, 2003, 16(5): 6-10.]
- [16] Zhao Yue, Pan Jun, Zhang Hongyuan et al. Analysis of inhalable particles pollution in the atmosphere in Beijing Area. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1): 67-69. [赵越, 潘钧, 张红远等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析. 环境科学研究, 2004, 17(1): 67-69.]
- [17] Deng Shaopo, Luo Yongming, Song Jing et al. Concentrations of polychlorinated biphenyls, cadmium and copper in Inhalable Particulate (PM₁₀) from an E-waste recycling area and human health risk assessment. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6): 733-740. [邓绍坡, 骆永明, 宋静等. 电子废弃物拆解地PM₁₀中多氯联苯、镉和铜含量调查及人体健康风险评估. 环境科学研究, 2010, 23(6): 733-740.]
- [18] Sun Zhaobin, An Xingqin, Tao Yan et al. Assessment on population exposure levels of PM₁₀ in Lanzhou based on GIS and atmospheric numerical simulation technology. *China Environmental Science*, 2012, 32(10): 1753-1757. [孙兆彬, 安兴琴, 陶燕等. 基于GIS和大气数值模拟技术评估兰州市PM₁₀的人群暴露水平. 中国环境科学, 2012, 32(10): 1753-1757.]
- [19] Yang Wei, Zhao Wenji, Gong Zhaoning et al. Spatial distribution of inhalable particulate and association with respiratory disease in Beijing City. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 237-243. [杨维, 赵文吉, 宫兆宁等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析. 环境科学, 2013, 34(1): 237-243.]
- [20] Xiao Zhimei, Bi Xiaohui, Feng Yinchang et al. Source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in urban area of Ningbo City. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 549-555. [肖致美, 毕晓辉, 冯银厂等. 宁波市环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}来源解析. 环境科学研究, 2012, 25(5): 549-555.]
- [21] Hu Xiaoyu, Li Yunpeng, Li Jinfeng et al. Interaction of ambient PM₁₀ among the cities over the Pearl River Delta. *Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(3): 519-524. [胡晓宇, 李云鹏, 李金凤等. 珠江三角洲城市群PM₁₀的相互影响研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(3): 519-524.]
- [22] Gong Shiyi, Feng Jialiang. Relationships among relative humidity, PM₁₀ concentration and atmospheric visibility in Shanghai. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 628-632. [龚诗懿, 冯加良. 上海地区大气相对湿度与PM₁₀浓度和大气能见度的相关性分析. 环境科学研究, 2012, 25(6): 628-632.]
- [23] Guo Yuanxi, Gong Daoyi, Wang Wenshan. Spatiotemporal variation of PM₁₀ concentration and its relationship with autumn daily temperature over central and eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1155-1164. [郭元喜, 龚道溢, 汪文珊等. 中国中东部秋季PM₁₀时空变化及其与日气温的关系. 地理学报, 2012, 67(9): 1155-1164.]
- [24] Jia Xiaopeng, Chen Kaifeng. Impact of dust events on air PM₁₀ concentration in the Lanzhou Valley. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1573-1578. [贾晓鹏, 陈开锋. 沙尘事件对兰州河谷大气环境PM₁₀的影响. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1573-1578.]

- [25] Zhang Chuying, Wang Shuxiao, Zhao Yu et al. Current status and future prospects of anthropogenic particulate matter emissions in China. *Environmental Science*, 2009, 30(7): 1881-1887. [张楚莹, 王书肖, 赵瑜 等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析. *环境科学*, 2009, 30(7): 1881-1887.]
- [26] Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis K L et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. *Journal of Atmospheric Science*, 2003, 27(5): 869-880. [李成才, 毛节泰, Alexis K L 等. 利用MODIS光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染. *大气科学*, 2003, 27(5): 869-880.]
- [27] Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis K L et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2488-2495.
- [28] State Environmental Protection Administration, State Technical Supervision Bureau. GB 3095-1996, State Environmental Protection Administration. Beijing: China Environmental Science Press, 1996. [国家环保局, 国家技术监督局. GB 3095-1996, 环境空气质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.]
- [29] China Meteorological Administration. Sand-dust Weather Yearbook. Beijing: China Meteorological Press, 2002-2009. [中国气象局. 沙尘天气年鉴2002-2009. 北京: 气象出版社, 2002-2009.]

Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM₁₀ pollution in China from 2002 to 2012

LI Mingsheng, ZHANG Jianhui, ZHANG Yinjun, ZHOU Lei, LI Qian, CHEN Yuanhang
(China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the annual average daily concentration of PM₁₀ by city was collected from 2002 to 2012, the statistical and GIS methods were used to study the spatio-temporal changes of concentration of PM₁₀ in ambient air of China. The results showed that during the study period, (1) annual daily average concentration of PM₁₀ in cities at or above prefecture level decreased from 0.130 mg·m⁻³ to 0.076 mg·m⁻³, and the proportion of cities meeting the Grade II national air quality standard increased from 37.6% to 92%. (2) PM₁₀ had a highest monthly average concentration in December, followed by January and November; and showed a lowest monthly average concentration in August, followed by July and September. (3) Seriously PM₁₀ polluted areas decreased significantly, and the distribution type changed from centralized distribution to scattered punctuate distribution. But the spatial pattern of PM₁₀ pollution did not change obviously. Northern China, especially northwest China, north China, Shandong, Jiangsu and Hubei were still the relatively serious PM₁₀ polluted areas. (4) PM₁₀ pollution was more serious in northern China than in southern China, and this difference was mainly observed in heating season (from November to next April). (5) Mitigation of PM₁₀ pollution was mainly reflected on the decrease of seriously polluted cities, which accounted for 1/10 of all the cities, and could reduce about 1/3 of the national average concentration of PM₁₀. Different from heavily PM₁₀ polluted cities, the situation of PM₁₀ pollution in relatively clean cities showed an aggravating trend. (6) The PM₁₀ pollution in major environmental protection cities was slightly polluted, accounting for 80.4% of the total number of pollution days. The proportion of serious pollution day was higher in March and April due to the dust-sand weather. The results can provide reference for a better understanding of the situation and changing trend of atmospheric particulate matter pollution in China, and of significance to help the governments at all levels or policy makers to make targeted prevention and control on particulate matters pollution.

Key words: PM₁₀; spatio-temporal pattern; spatial differentiation; ambient air quality