

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017081404

李宏艳, 高雪莹, 李宏宇, 等. 山西省大气 PM_{2.5} 污染时空分布特征[J]. 环境化学, 2018, 37(5): 913-923.

LI Hongyan, GAO Xueying, LI Hongyu, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of PM_{2.5} in Shanxi[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(5): 913-923.

山西省大气 PM_{2.5} 污染时空分布特征*

李宏艳¹ 高雪莹¹ 李宏宇¹ 闫雨龙² 郭利利¹ 何秋生^{1**}

(1. 太原科技大学环境与安全学院, 太原, 030024; 2. 华北电力大学环境科学与工程学院, 北京, 102206)

摘 要 本文基于国家空气质量自动监测位点 2015 年 3 月到 2016 年 2 月全年的逐时监测数据, 对山西省 11 个地级市 PM_{2.5} 的污染状况与时空分布进行了详细研究. 结果表明, 山西省 11 个地级城市 PM_{2.5} 年均浓度均超过了国家年均浓度的二级标准限值, 其中, 长治和运城污染最为严重, 超标率均高达 27.51%. PM_{2.5} 月均浓度变化特征分析发现, 各地区 PM_{2.5} 污染高峰主要出现在冬季, 9 个城市在夏季出现另一小高峰, 太原在春季出现另一小高峰. PM_{2.5}/PM₁₀ 月均浓度变化特征分析发现, 太原、大同、晋城、朔州、晋中和忻州等 6 个城市 PM_{2.5}/PM₁₀ 的值从春季到冬季逐渐增长, 临汾和运城该比值波动于 50%—70% 之间, 阳泉和吕梁 PM_{2.5}/PM₁₀ 的值在 7 月和 11 月出现两次高峰, 长治则在 7 月和 1 月出现两次高峰, 提示不同地区可能受到不同污染源的影响. PM_{2.5} 日变化规律总体较为一致, 呈明显的双峰分布, 其特征是中午和午夜高, 凌晨和下午低. 不同季节 PM_{2.5} 的空间分布虽有很大差异, 但总体上南部城市高于北部城市. 局部自相关分析发现, 山西省 PM_{2.5} 污染的热点区域主要集中在运城.

关键词 山西省, 细颗粒物, 污染水平, 时空分布, 空间自相关.

Spatial-temporal distribution and variation characteristics of PM_{2.5} in Shanxi

LI Hongyan¹ GAO Xueying¹ LI Hongyu¹ YAN Yulong² GUO Lili¹ HE Qiusheng^{1**}

(1. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, 030024, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China)

Abstract: Levels and spatial-temporal distribution of PM_{2.5} in the 11 cities were analyzed in this study, based on the monitoring data from the National Air Quality Automatic Monitoring Station from March 2015 to February 2016. The results showed that the annual average concentrations of PM_{2.5} in 11 prefecture-level cities all exceeded the Chinese Grade II Standard value. Changzhi and Yuncheng were the most polluted cities, with 27.51% of the days exceeding the Grade II daily PM_{2.5} limit. The monthly variation of PM_{2.5} concentration showed that the larger pollution peak in the whole year mainly occurred in winter, nine cities displayed the other pollution peak in summer, while Taiyuan had the other peak in spring. For PM_{2.5}/PM₁₀ ratio, the value gradually increased from spring to winter in six cities including Taiyuan, Datong, Jincheng, Shuozhou, Jinzhong and Xinzhou. This ratio in Linfen and Yuncheng fluctuated between 50% and 70%. The PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in Yangquan and Lvliang peaked in July and November, respectively, while Changzhi showed two peaks in July and January. The different variation characteristics of PM_{2.5}/PM₁₀ ratio indicated that the cities were

2017 年 8 月 14 日收稿 (Received: August 14, 2017).

* 国家自然科学基金 (41501543, 41472311) 和山西省基础研究计划项目 (2015021059) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41501543, 41472311) and Basic Research Project of Shanxi Province (2015021059).

** 通讯联系人, Tel: 0351-6998326, E-mail: heqs@tyust.edu.cn

Corresponding author, Tel: 0351-6998326, E-mail: heqs@tyust.edu.cn

possibly influenced by different sources. The daily variation of $PM_{2.5}$ was consistent for all the cities with a remarkable bimodal distribution, peaking at noon and midnight, and declining to the lowest level in the morning and afternoon. The spatial distribution of $PM_{2.5}$ varied in different seasons, while the $PM_{2.5}$ levels in southern cities were always higher than those of the northern cities. The local autocorrelation analysis found that the hot spot region of $PM_{2.5}$ pollution in Shanxi Province was mainly concentrated in Yuncheng.

Keywords: Shanxi Province, $PM_{2.5}$, pollution levels, spatial-temporal characteristics, spatial autocorrelation.

近年来,我国灰霾事件频发,严重威胁群众健康,影响环境安全.卫星观测结果表明,我国约 30% 国土面积、近 8 亿人口正遭受灰霾的危害^[1].作为引发灰霾天气的核心物质, $PM_{2.5}$ 的污染问题受到广泛关注. $PM_{2.5}$ 是指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物,主要由燃烧过程(如煤炭燃烧、汽车尾气等)产生,或气态污染物在大气中经过气-粒转化(凝聚、吸附、反应等)生成^[2].大气灰霾是细颗粒物消光造成大气能见度下降的现象^[1].由于 $PM_{2.5}$ 可直接进入肺泡和血管,其高浓度暴露又是灰霾天气人群呼吸系统疾病、心血管疾病和神经系统疾病等发病率和死亡率增加的主要因素^[3-6].2013 年对欧洲 9 国 312944 人进行的一项调查研究发现,颗粒物没有安全浓度, $PM_{2.5}$ 暴露浓度每增加 10 $\mu g \cdot m^{-3}$,会导致肺癌发病率增加 36%^[7].

2011 年,国家环境保护部门制定了新的环境空气质量标准(GB3095—2012),正式将 $PM_{2.5}$ 纳入常规空气质量监测范围和评价体系,并建立了全国空气质量实时发布平台,为掌握各地的污染状况,研究区域传输和协同变化等提供了丰富的信息.近年来,有学者利用该平台数据对全国 31 个省会城市六大环境空气污染物基本项目的空间分布与单日和全年的时间变化规律等进行了系统研究,获得了各污染物在全国的一个总体分布情况、主要集中区域、高峰出现的主要时间点和月份等信息,为国家层面宏观环境污染防治治理政策的制定提供了重要的参考依据^[8-10].然而,一个省会城市不能完全代表一个省的整体情况,因此,还需要针对重点污染省份或区域开展更加深入细致的研究,以在省级及以下层面制定出更加具体和有针对性的环境政策.

山西省是我国雾霾的高发区之一.该省作为我国重要的能源重化工基地,煤炭、冶金、机械等支柱性产业在生产过程中排放出大量的颗粒物和其他气态污染物^[11],导致严重的空气污染.太原、临汾和运城等城市被各种官方机构列入全国乃至全世界大气污染最严重城市名单中^[12-14].本世纪初,山西省各地级市环境空气质量极度恶劣,大同、阳泉、吕梁、临汾一度被认为是全国空气污染最为严重的城市^[15-19].近年来,随着各种治理措施的实施,大同、吕梁等地空气质量有了明显的提升,但据 2015 年山西省环境状况公告,全省 11 个地级市环境空气污染依然严重,空气质量均超过了二级标准^[20].国务院在 2013 年印发的大气污染防治行动计划中将山西中北部地区列入我国大气污染重点控制的“三区十群”之中^[21].然而,目前对山西省 $PM_{2.5}$ 的污染状况尚缺乏系统的研究.因此,本文章提出利用山西省 11 个地级市,国家空气质量自动监测位点 2015 年 3 月到 2016 年 2 月全年的逐时监测数据,对 $PM_{2.5}$ 的污染水平、时空分布特征与变化规律进行分析,旨在为该省大气污染防治政策的制定提供科学依据.

1 实验部分(Experimental section)

研究数据来源于全国空气质量发布平台(<http://113.108.142.147:20,035/emcpublish/>),为国家空气质量自动监测点位的空气质量自动监测结果,不包括地方空气质量监测点位.山西境内共有 59 个监测点位,主要设在其下辖的 11 个地级城市,其中太原设有监测点位 9 个,大同、长治、临汾、阳泉和晋城各设 6 个,朔州和运城各设 5 个,晋中设 4 个,忻州和吕梁各设 3 个(图 1).大同、朔州、忻州位于山西的北部,太原、晋中、阳泉、吕梁位于山西中部,长治、临汾、晋城和运城位于山西南部.大同、朔州、忻州、太原、晋中、长治、临汾和运城都处于盆地之中,而晋城、阳泉和吕梁地形比较复杂,其中吕梁属黄土丘陵沟壑区,山区、半山区面积占 92%.山西区域整体概况在其它文献中已有详细报道,本文不再赘述^[22].

在本研究中,以每个城市所有监测位点逐时监测值的平均值来表征该城市的逐时浓度值,再计算其月平均值、各季平均值和年平均值进行分析对比.由于存在监测仪器校零、校对等日常维护行为,以及仪器电信故障、停电等现象,某些站点会出现个别天或时间段的数据缺失,因对总体分析影响不大,故不作进一步处理.

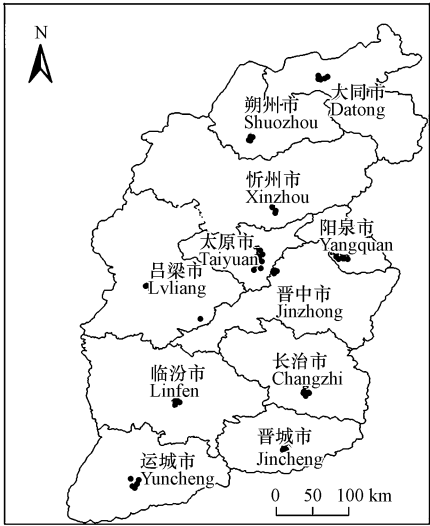


图 1 山西省 11 个地级城市的区位图
Fig.1 Location of the 11 prefecture cities in Shanxi Province

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 PM_{2.5} 的污染水平

从表 1 可以看出,山西省各地级城市 PM_{2.5} 年平均浓度主要分布在 36.44 — 68.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,均超过了我国环保部所规定的 PM_{2.5} 年平均浓度的二级标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (GB3095—2012)^[23].除大同和吕梁 PM_{2.5} 污染较轻外,其他地区污染都比较严重,全年有 18% 以上的天数都超过了国家二级标准限值(75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),日均浓度最高值超过 180 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中,运城和长治污染最为严重,年均值分别为 68.24 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 68.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率均高达 27.51%,PM_{2.5} 日均浓度最高分别达到 408.25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 288.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 与全国其他城市相比,山西地级城市 PM_{2.5} 总体处于中等污染水平,年均值普遍低于北京(78.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、哈尔滨(71.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、济南(84.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、沈阳(74.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、石家庄(102.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、天津(80.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、郑州(92.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、合肥(73.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 等城市,而高于福州(31.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、海口(22.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、昆明(30.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和拉萨(22.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 等城市^[24].

季节比较可以看出,太原和忻州两地 PM_{2.5} 污染主要集中在秋、冬两季,秋季超标率甚至高于冬季,春、夏季污染较轻;临汾、晋城和朔州污染主要集中在冬季,超标率达到 40% 以上,其次为秋季,超标率在 20% 左右;长治冬季污染极为严重,超标率达到 60.67%,其次为夏秋季,超标率均在 20% 左右;运城冬季污染也很严重,超标率达到 64.04% 以上,其次为夏季,超标率为 21.11%;阳泉和晋中冬季 PM_{2.5} 超标率在 40% 以上,污染严重,其它季节污染都较轻;大同冬季污染略高于其它季节,而吕梁夏季污染反而高于冬季,全年日均最高浓度也出现在夏季.

从采暖期和非采暖期的统计结果来看,山西除吕梁外,其余 10 个地区 PM_{2.5} 超标污染主要发生在采暖期,超标率除大同较低外(14.19%),其余均在 35% 以上;非采暖期只有太原、长治、运城、忻州和吕梁超标率高于 10%,其余均低于 10%.

表 1 山西省各城市 PM_{2.5} 的污染状况
Table 1 Pollution Situation of PM_{2.5} in Cities of Shanxi Province

城市 City	项目 Item	全年 Annual	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	非采暖期 Non-heating period	采暖期 Heating period
太原 Taiyuan	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	54.77	52.26	43.47	58.43	64.96	46.63	65.82
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	5.00—232.75	12.89—134.44	14.00—92.78	9.78—166.38	5.00—232.75	9.78—138.44	5.00—232.75
	超标率 Over-standard rate/%	23.78	16.87	10.00	34.48	33.71	14.93	35.81
大同 Datong	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	36.44	33.09	30.61	36.20	45.69	29.78	45.49
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	7.50—126.00	10.50—106.67	7.50—81.67	8.50—102.00	10.67—126.00	7.50—93.00	10.50—126.00
	超标率 Over-standard rate/%	7.16	4.82	2.22	8.05	13.48	1.99	14.19
长治 Changzhi	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	68.50	47.07	58.03	56.29	111.00	52.74	89.89
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	10.40—288.20	14.40—96.60	19.40—122.40	10.40—151.20	11.80—288.20	14.40—128.80	10.40—288.20
	超标率 Over-standard rate/%	27.51	8.43	20	19.54	60.67	15.92	43.24
临汾 Linfen	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	54.86	47.26	31.53	61.65	90.67	39.12	83.31
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.50—244.83	8.67—97.67	10.20—92.17	11.50—244.83	8.50—222.00	10.20—116.67	8.50—244.83
	超标率 Over-standard rate/%	24.07	9.64	1.11	26.44	58.43	4.98	50.00
阳泉 Yangquan	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	54.54	47.58	45.24	46.47	78.34	40.73	73.31
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	6.67—244.00	8.67—148.17	6.66—149.00	6.83—227.17	9.67—244.00	6.67—149.00	8.67—244.00
	超标率 Over-standard rate/%	20.06	13.25	12.22	11.49	42.70	7.46	37.16
晋城 Jincheng	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	57.10	44.26	46.71	52.01	84.86	44.58	74.21
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	5.33—222.00	13.83—103.33	12.00—149.50	8.17—192.50	5.33—222.00	8.17—158.00	5.33—222.00
	超标率 Over-standard rate/%	22.64	9.64	10.00	20.69	49.44	9.45	40.54
朔州 Shuozhou	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	49.21	38.34	41.29	48.20	68.35	38.45	63.83
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	9.80—181.80	11.80—104.80	11.20—97.40	9.80—180.40	11.40—181.80	9.80—110.00	11.40—181.80
	超标率 Over-standard rate/%	18.34%	4.82	5.56	19.54	42.70	5.97	35.14
晋中 Jinzhong	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	56.84	46.88	44.67	48.44	86.65	43.72	74.67
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.67—277.33	11.25—110.25	14.25—103.67	11.75—239.25	9.67—277.33	8.67—110.25	9.67—277.33
	超标率 Over-standard rate/%	22.35	12.05	8.89	10.34	48.31	9.45	39.86
运城 Yuncheng	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	68.24	49.75	62.11	44.96	114.45	51.33	91.21
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	11.75—408.25	19.00—97.20	29.75—137.00	11.75—239.25	14.50—408.25	11.75—137.00	14.50—408.25
	超标率 Over-standard rate/%	27.51	13.25	21.11	10.34	64.04	12.44	47.97
忻州 Xinzhou	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	55.87	46.62	42.27	66.50	67.86	45.01	70.62
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.50—266.00	8.50—103.33	8.67—125.33	12.33—266.00	9.33—244.00	8.67—163.33	8.50—266.00
	超标率 Over-standard rate/%	24.36	14.46	13.33	36.78	32.58	15.92	35.81
吕梁 Lvliang	均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	43.43	35.85	51.34	41.12	44.76	43.74	43.01
	范围 Range/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	9.50—133.50	9.50—92.00	19.00—133.50	15.50—86.00	10.50—117.50	12.67—133.50	9.50—117.50
	超标率 Over-standard rate/%	10.32	3.61	16.67	8.05	12.36	11.94	8.11

注:本表中的超标率为日均值超标率。
Note: The over-standard rate in this table refers to that of the daily average value.

2.2 PM_{2.5}月均浓度变化特征

如图 2 所示,山西省各地级城市 PM_{2.5} 在全年的月均浓度变化特征可基本分为 4 种类型,其中 8 个城市都属于第 1 种类型-“夏冬双峰”型(图 2a),其特征是 PM_{2.5} 浓度分别在 7 月和 12 月或 1 月出现峰值.夏峰较小,PM_{2.5} 浓度从 4、5 月份开始缓慢上升,7 月达到最高,之后开始下降,8 月或 9 月降到最低.冬峰较大,PM_{2.5} 浓度从 9 月或 10 月开始缓慢上升,11 月冬季采暖开始后,其浓度迅速升高,到 12 月或 1 月达到最大值,之后虽然采暖活动仍在持续,但气温开始回升,采暖强度降低,导致 PM_{2.5} 浓度开始回落,到 4 月份采暖结束后达到最低值.这与北京的 PM_{2.5} 月变化规律一致,然而与北方城市的总体规律有所差异.王冠岚等的研究发现,北京、天津、沧州、廊坊和唐山等地在 7 月份空气质量指数(AQI)也会出现一个小高峰,这可能与这些地区夏季农忙活动燃烧农田废物有关^[25].而 Zhao 等和 Chai 等的研究发现,我国北方城市 PM_{2.5} 浓度的峰值分别出现在 10 月和 1 月^[9,26].冬峰的出现说明冬季采暖活动是造成该季节 PM_{2.5} 污染严重的主要因素.另一方面,进入深秋和冬季后大气层结趋于稳定,边界层和气温低,风速小,降水少,导致静稳天气增多而湿沉降减少,使污染物容易积累而不易扩散^[9],因此,冬季成为我国灰霾高发的主要季节.

太原表现为第 2 种类型-“冬春双峰”型(图 2b),冬季受采暖活动影响,在 12 月份出现大峰;春季可能受沙尘暴的影响,3 月份 PM_{2.5} 浓度出现小高峰.临汾表现为第 3 种类型-“冬季单峰”型(图 2c),峰值同样出现在 12 月份.吕梁虽然也表现为“夏冬双峰”型(图 2d),但各月份浓度差异很小,且夏季峰值和冬季峰值基本持平,这可能与吕梁的山区地貌和大陆性季风气候有关,虽然冬季采暖活动导致污染物排放量会高于夏季,但冬季大风天气多于夏季,平均风速也比夏季高,因此污染物不易积聚^[27].

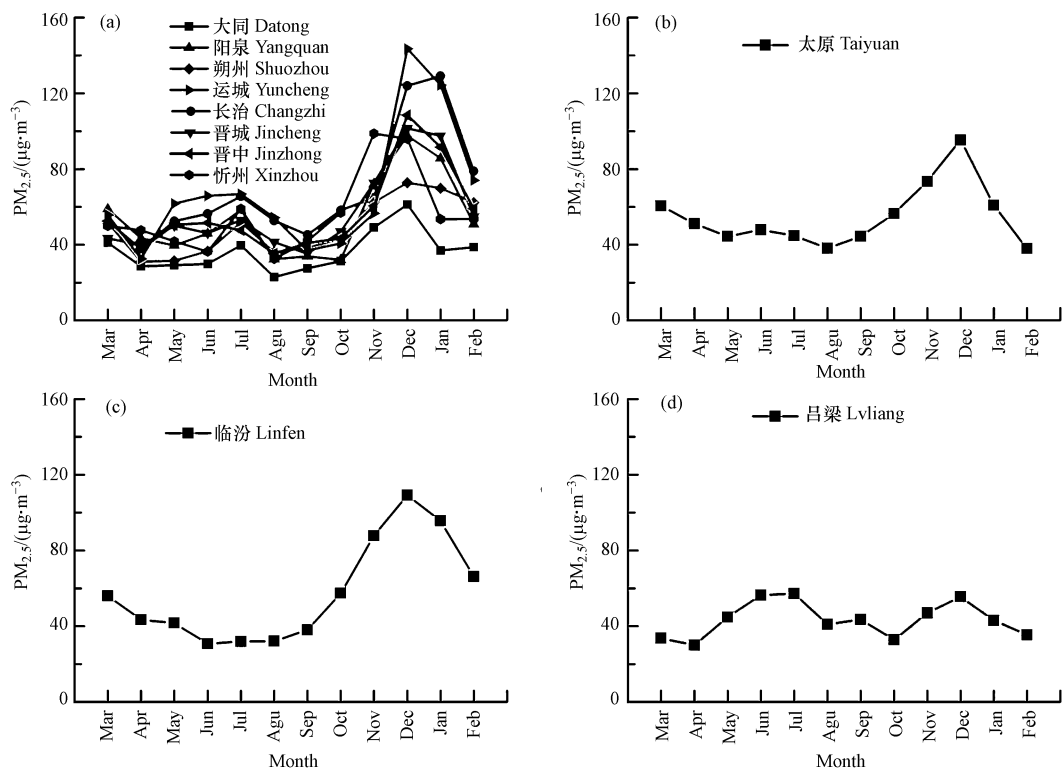


图 2 山西省各地级城市 PM_{2.5} 在全年的月均浓度变化图

Fig.2 Annual variation of monthly mean concentrations of PM_{2.5} in the 11 prefecture cities in Shanxi Province

2.3 PM_{2.5}/PM₁₀月均浓度变化特征

PM_{2.5} 与 PM₁₀ 之间的比值 (PM_{2.5}/PM₁₀) 是反映地区粗细颗粒物分布特征、分析颗粒物来源的重要指标^[22].我国 PM_{2.5} 一般占到 PM₁₀ 质量浓度的 50% 左右^[9].Wang 等的研究发现,我国北方城市容易受到来自于塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠沙尘天气(包括浮尘、沙尘暴和高吹尘等)的影响,粗颗粒(PM_{2.5-10})质量浓度增加导致 PM_{2.5}/PM₁₀ 低于 50%,在兰州、西安等易受沙尘暴影响的地区接近于 40%^[8].

如图 3 所示,山西省各地级城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 在全年的月均浓度变化特征也可分为 4 种类型,其中太原、大同、晋城、朔州、晋中和忻州等 6 个城市属于第 1 种类型(图 3a),其主要特征是 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值从春季到冬季逐渐增长,春季(3—5 月)该比值除忻州以外均在 50% 以下,说明这些地区在春季受到了沙尘天气的影响.夏秋季(6—10 月) $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值波动于 40%—70% 之间,这可能与夏秋季大气层结不稳定有关.11 月 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值达到最大值(60%—80%),11 月到次年 2 月呈现缓慢下降趋势,但基本保持在 50% 以上,其主要原因是冬季燃煤取暖可增加 $PM_{2.5}$ 的排放.同时,进入深秋和冬季后大气层结趋于稳定,静稳天气增多,有利于二次细颗粒物的形成.大同处于山西最北端,紧邻内蒙古,风大,易受沙尘天气影响,因此与其它地区相比 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值几乎处于最低水平.

临汾和运城属于第 2 种类型(图 3b),全年 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值波动于 50%—70% 之间,这可能与它们的盆地地形有关,盆地的地理边缘多与高山断崖相连,静风频率高,可有效避免沙尘暴的影响;同时,盆地易于形成逆温层,使污染物的垂直扩散受到抑制,二次污染物转化效率增加.

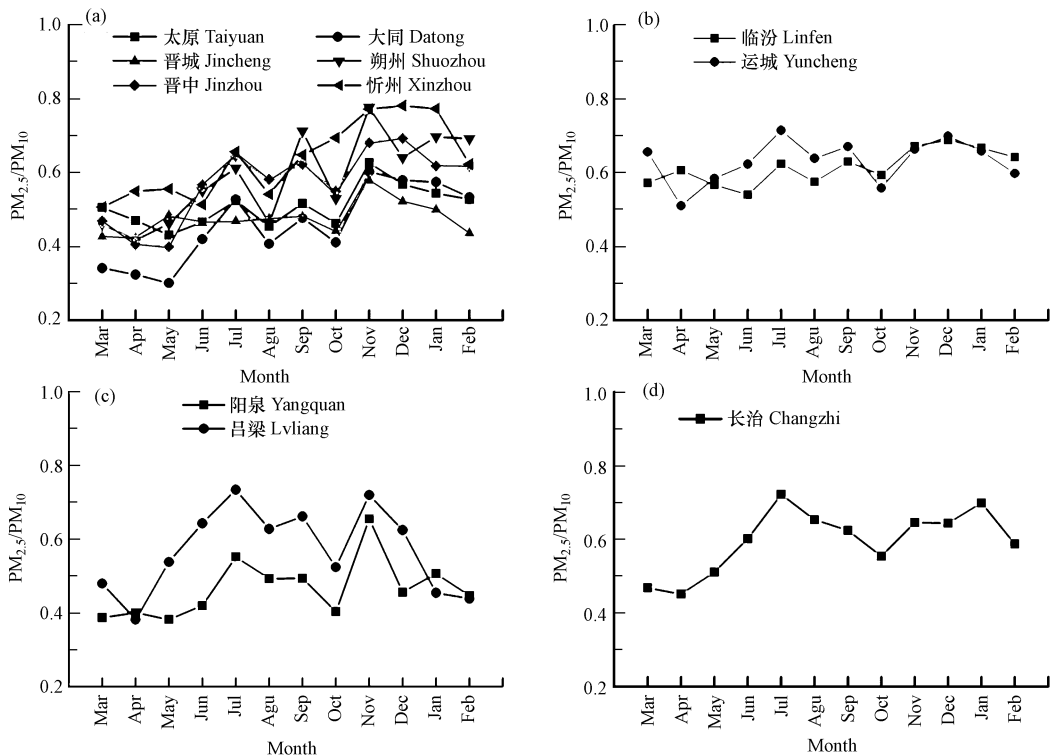


图 3 山西省各地级城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 在全年的月均浓度变化图

Fig.3 Annual variations of monthly mean $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio in the 11 prefecture cities in Shanxi Province

阳泉和吕梁属于第 3 种类型(图 3c),其特征是 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值在 7 月和 11 月出现两次高峰,3 月、4 月和 10 月比值最低.3 月和 4 月属春季,是我国沙尘暴发生的主要季节.不同的地貌特征和工业生产导致这两地区 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值又有所差异.吕梁属黄土丘陵沟壑区,土地裸露,春季多大风扬沙天气,致使 1 月到 4 月 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值低于 50%,其余月份均高于 50%,这可能与城区地面硬化改造和大量的工业排放有关,如炼焦和冶金等;而阳泉地形复杂,矿区较多,除 7 月、11 月和 1 月外, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值均低于 50%.长治属于第 4 种类型(图 3d),其特征是 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值在 7 月和 1 月出现两次高峰,3 月和 4 月比值最低,其次是 10 月.长治在地域上比较独立,气候也与其他地方不同,全年冬无严寒,夏无酷暑,因此其 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值的变化特征也与其它地方有所不同.

2.4 $PM_{2.5}$ 的日变化特征

山西省各地级城市环境空气中的 $PM_{2.5}$ 日变化规律总体较为一致(图 4),呈明显的双峰分布,其特征是中午和午夜高,凌晨和下午低,这与 Zhao 等研究中石家庄、郑州等城市 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化规律是一致的^[9].夜间,大气层结趋于稳定,污染物难以扩散,不断积累,导致 $PM_{2.5}$ 浓度在午夜出现高峰;早上,人们的活动逐步增强,不断排放出污染物,使得 $PM_{2.5}$ 在上午到中午不同时间段出现另一污染高峰.由于

不同季节、不同城市人们的生活规律不同,导致上午 PM_{2.5} 浓度峰值出现的时间点随季节和城市的不同而不同.

春季,PM_{2.5} 浓度极小值主要出现在下午 17—18 时,其后浓度逐渐上升,在午夜 23 时到次日 1 时达到高峰,之后浓度缓慢下降,从凌晨 5 时起浓度开始回升,上午 9—12 时不同城市陆续达到单日峰值,太原、阳泉和朔州到达峰值时间最早(9 时),其次是晋城(10 时),进而是大同、长治、晋中、运城和忻州(11 时),临汾和吕梁最晚(12 时)(图 4a).

夏季,PM_{2.5} 浓度极小值主要出现在下午 19 时左右,之后浓度缓慢上升,午夜 23 时到次日凌晨 5 时之间浓度基本保持稳定,之后浓度再次上升,在上午 8—13 时不同城市陆续达到峰值,基本次序为:太原(8 时)—大同和朔州(9 时)—阳泉、晋城和运城(10 时)—长治和晋中(11 时)—忻州(12 时)—临汾和吕梁(13 时)(图 4b).

秋季,PM_{2.5} 浓度极小值主要出现在下午 17 时和凌晨 6 时左右,而且这两个时段的浓度基本持平,峰值分别出现在午夜 23 时和中午 10—13 时,其中太原、大同、临汾、晋中、运城、忻州和吕梁午夜 23 时 PM_{2.5} 浓度高于中午之浓度,其余城市正好相反(图 4c).上午这些城市达到峰值的基本次序为:太原、阳泉和朔州(10 时)—大同、临汾、晋城和运城(11 时)—吕梁(12 时)—长治、晋中和忻州(13 时)(图 4c).

冬季,PM_{2.5} 浓度极小值主要出现在下午 18 时和早晨 7 时左右,前者略低于后者,峰值主要集中在中午 10—12 时,其中太原峰值出现最早(10 时),长治、临汾和运城在 12 时出现峰值,其余城市出现峰值时间为 11 时.长治、运城和临汾在午夜 22 时到次日 0 时出现另一高峰,浓度与中午峰值持平,其余城市在下午 18 时后缓慢增长,到午夜 23 时后浓度保持稳定或轻微下降,早晨 7 时开始显著上升(图 4d).

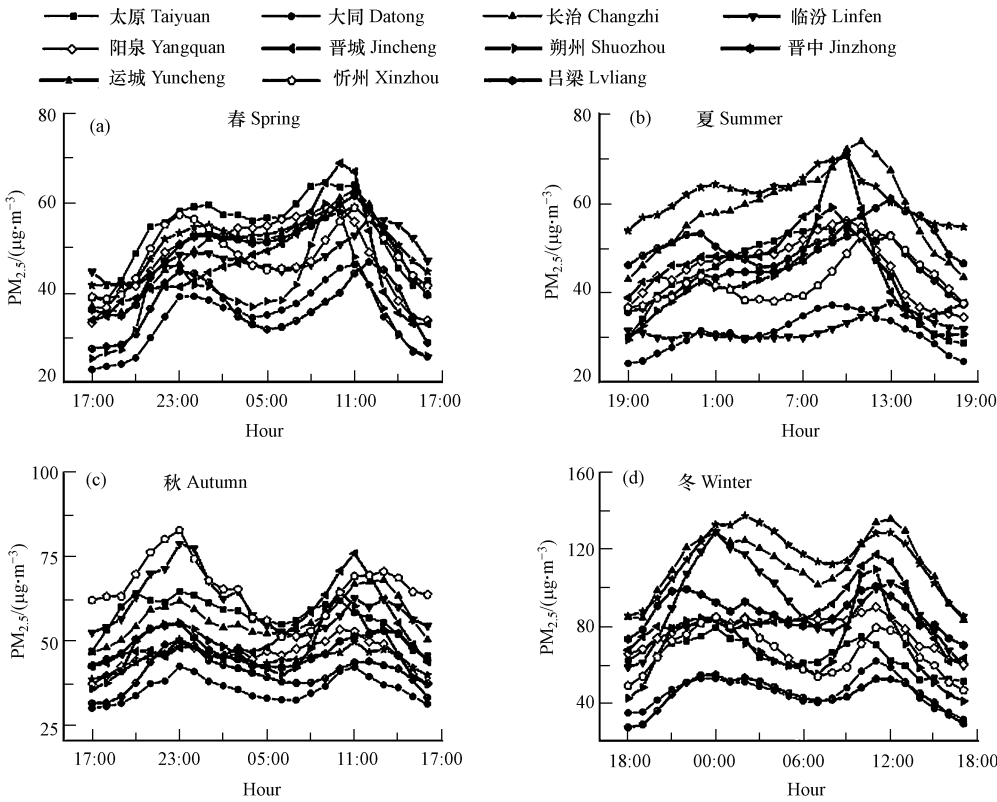


图 4 山西省各地级城市 PM_{2.5} 小时浓度在不同季节的日变化图

Fig.4 Diurnal variations of hourly mean concentrations of PM_{2.5} in the 11 prefecture cities in Shanxi Province

从中午和午夜峰值的高低来看,春、夏季节上午峰值略高于午夜峰值,而秋、冬季节则正好相反.从凌晨和下午谷值的高低来看,无论哪个季节,下午 PM_{2.5} 的浓度都低于凌晨浓度,也就是说下午是一天中 PM_{2.5} 浓度最低的时候.从日变化差异(日极大值与极小值的差)来看,春(15.33—35.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、夏(8.11—36.39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、秋(11.92—33.62 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)三季日变化较小,冬季(27.54—70.82 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)差异

较大.

2.5 PM_{2.5}的空间分布特征

图 5 所示为利用 Arcgis 地统计克里金插值法模拟得到的不同季节 PM_{2.5} 浓度的空间分布情况.可以看出,不同季节 PM_{2.5} 的浓度分布有很大差异.春季,PM_{2.5} 高浓度区主要分布在太原、阳泉和运城,中部盆地区域(由北到南分别有忻定盆地、太原盆地、临汾盆地和运城盆地等)高于两侧的山区;夏季,PM_{2.5} 高浓度区主要分布在长治和运城,其次为晋中和临汾;秋季,PM_{2.5} 高浓度区主要集中于临汾、吕梁和太原一带;冬季,PM_{2.5} 从北向南浓度逐渐增高,运城污染最为严重,其次是临汾和长治.

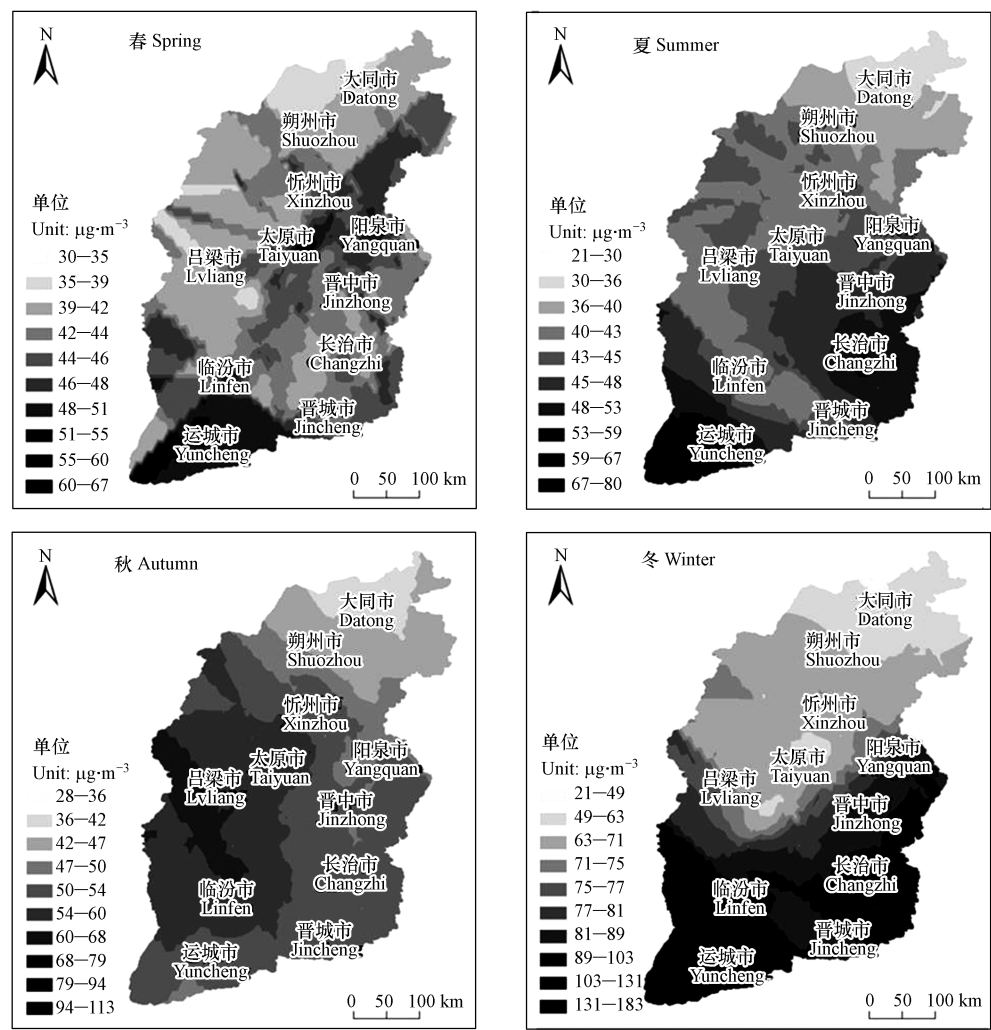


图 5 不同季节山西省 PM_{2.5} 的空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of PM_{2.5} in different seasons of Shanxi Province

2.6 PM_{2.5} 季节平均浓度局部自相关

为了揭示山西省 11 个地级市 PM_{2.5} 的污染是否存在空间依赖性、空间异质性和空间结构性,本研究采用 GeoDa0.9.5i 软件和 R 3.3.2 软件进行了不同季节的空间自相关分析,具体方法参照张兵等^[28] 和杨中庆^[29] 的报道.从表 2 的 Moran's I 系数可以看出,山西省 11 个地级城市 PM_{2.5} 季节平均浓度的空间分布格局在春季和冬季呈现出一定的空间正相关.这可能与春季大范围的强季风气候和冬季统一的取暖燃煤活动有关.反之,夏季和秋季表现出一定的空间负相关,说明各个空间邻近城市 PM_{2.5} 季节平均浓度之间不具有相似性,提示这两个季节各个城市 PM_{2.5} 的污染成因是相对独立的和不同的.Moran's I 系数检验发现只有冬季的全局自相关 Moran's I 系数是显著的,其余三季均不显著.

表 2 山西省 11 个地级城市 PM_{2.5} 季节平均浓度 Moran's I

Table 2 Moran's I for the seasonal mean concentrations of PM_{2.5} in 11 prefecture cities in Shanxi Province

污染物 Pollutant	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
PM _{2.5}	0.233	-0.369	-0.252	0.461 *

注: * 表示对于 Moran's I 进行随机性检验 (Randomness test for Moran's I), $P < 0.05$.

PM_{2.5} 季节平均浓度局部自相关研究结果 (Moran 散点图) 显示, 山西省春季在 LISA 中有重要影响的城市是吕梁和 大同, 其中吕梁处于第 II 象限, 呈现出 L-H 型的分布格局 (L 代表低值区, H 代表高值区), 这意味着吕梁本身 PM_{2.5} 浓度并不高, 但与这个城市相连的周边城市具有相对较高的 PM_{2.5} 污染; 而大同处于第 III 象限, 呈现出 L-L 型的分布格局, 属于冷点区域, 说明以其为中心的区域在春季 PM_{2.5} 污染较轻, 这与表 1 结果相吻合 (图 6a).

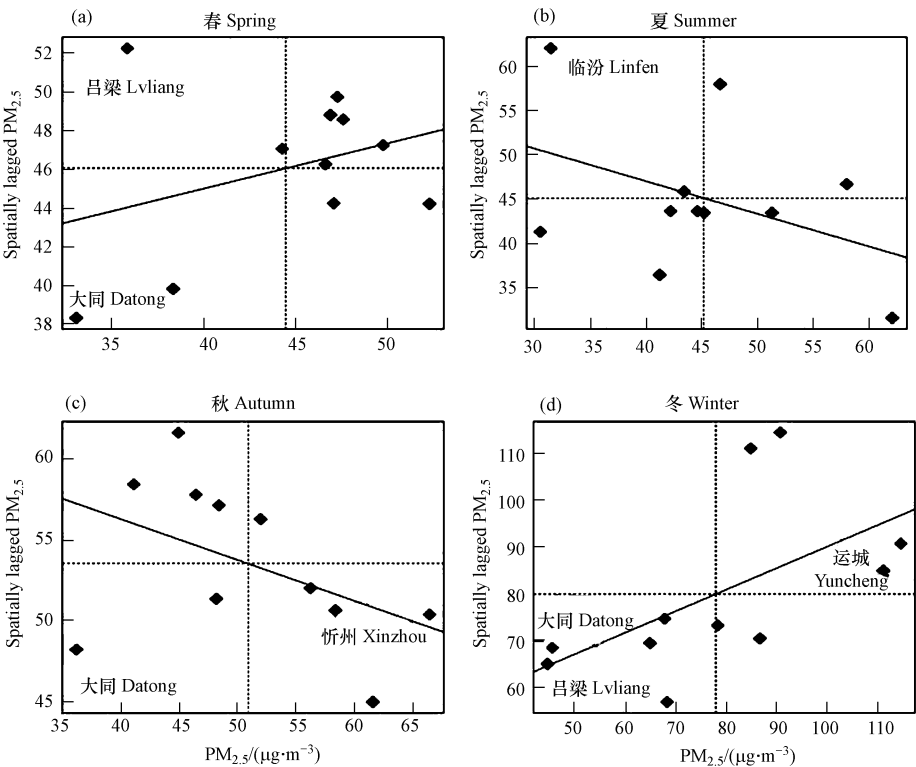


图 6 山西省 11 个地级城市 PM_{2.5} 季节平均浓度显著性 Moran 散点图

Fig.6 Moran scatter plots of seasonal mean concentrations of PM_{2.5} in 11 prefecture cities in Shanxi Province

夏季在 LISA 中有重要影响的城市是临汾, 呈现出 L-H 型的分布格局 (图 6b). 秋季在 LISA 中有重要影响的城市是大同和忻州. 与春季相类似, 大同呈现出 L-L 型的分布格局. 忻州处于第 IV 象限, 呈现出 H-L 型的分布格局, 意味着忻州本身 PM_{2.5} 污染较重, 但与其相连的周边城市污染则比较轻 (图 6c). 冬季山西省 PM_{2.5} 季节平均浓度主要分布在第 I 象限和第 III 象限, 对应为 H-H 聚集和 L-L 聚集现象, 与全局空间自相关分析的结果一致. PM_{2.5} 污染的热点区域主要集中在运城, 冷点区域主要分布于大同和吕梁 (图 6d). 张兵等曾采用与本文相同的方法研究了 2004—2008 年我国 110 个城市大气污染物的空间分布特征, 发现临汾、大同和阳泉在 2004—2006 年期间为全国 PM₁₀ 和 SO₂ 污染的热点区域, 2007 年开始从热点区域中消失^[28], 本研究发现 2016 年大同在春、秋和冬 3 个季节均属于冷点区域, 临汾在夏季呈现出 L-H 型的分布格局, 提示近年来这些城市, 尤其是大同的大气环境质量已得到很大改善, 污染治理效果明显. 山西省历年环境状况公报数据^[20] 也显示, 大同空气综合质量指数已从 2008 年以前的倒数第一上升到全省第一位.

3 结论 (Conclusion)

(1) 山西省 11 个地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均超过了国家年均浓度二级标准限值, 与全国其他城市相比, 总体处于中等污染水平. 其中, 运城和长治污染最为严重, 年均值分别为 $68.24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $68.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标率均高达 27.51%. 冬季因采暖燃煤活动增强, 而低温导致静稳天气增多, 使之成为 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的季节, 这也是冬季灰霾高发的主要原因. 因此, 加强对采暖期污染物排放的控制是改善山西省空气质量的核心.

(2) 山西省各地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 在全年的月均浓度变化特征可基本分为 4 种类型, 其中太原和临汾分别表现为“冬春双峰”和“冬季单峰”型; 剩余 9 个城市表现为“夏冬双峰”型, 除吕梁夏峰和冬峰持平外, 其余各城市冬季峰值均高于其它季节的峰值. $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 在全年的月均浓度变化特征也可分为 4 种类型, 其中太原、大同、晋城、朔州、晋中和忻州等 6 个城市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的值从春季到冬季逐渐增长; 临汾和运城该比值波动于 50%—70% 之间; 阳泉和吕梁在 7 月和 11 月出现两次高峰; 长治则在 7 月和 1 月出现两次高峰, 提示不同地区可能受到不同污染源的影响.

(3) 山西省各地级城市环境空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化规律总体较为一致, 呈明显的双峰分布, 其特征是中午和午夜高, 凌晨和下午低. 而且, 下午是一天中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低的时候. 春、夏季节上午峰值略高于午夜峰值, 而秋、冬季节则正好相反, 且冬季日变化差异远大于其它季节. 各城市午夜峰值出现的时间比较统一, 上午因各地居民生活规律的不同, 峰值出现的时间不同.

(4) 山西省不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布虽有很大差异, 但总体上南部城市的污染要高于北部城市. 山西省 11 个地级城市季节平均浓度的空间分布格局在春季和冬季呈现出一定的空间正相关, 夏秋季节各个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染成因是相对独立的和不同的. 局部自相关分析发现, 山西省 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的热点区域主要集中在运城. 2013 年, 国务院发布的大气污染防治行动计划中, 将山西省中北部定为重点防治的“十群”之一, 从现有结果来看, 山西的污染防治重点区域需要做出调整.

参考文献 (References)

- [1] 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾追因与控制 [J]. 中国科学院院刊, 2013, 28: 344-352.
HE H, WANG X M, WANG Y S, et al. Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013, 28: 344-352 (in Chinese).
- [2] 潘小川, 李国星, 高婷. 危险的呼吸: $\text{PM}_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
PAN X C, LI G X, GAO T. Dangerous breathing: health hazard and economic loss assessment of $\text{PM}_{2.5}$ [M]. Beijing: China environmental Science Press, 2012 (in Chinese).
- [3] MARIANTHI-ANNA K, SCHWARTZ J D, WEISSKOPF M G, et al. Long-term $\text{PM}_{2.5}$ exposure and neurological hospital admissions in the northeastern United States [J]. Environmental Health Perspectives, 2016, 124(1): 23-29.
- [4] SAMET J M, ZEGER S L, DOMINICI F, et al. The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States [J]. Research Report (Health Effects Institute), 2000, 94(pt 2): 5-79.
- [5] RAASCHOU-NIELSEN O, ANDERSEN Z J, BEELEN R, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: Prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE) [J]. Lancet Oncology, 2013, 14(9): 813-822.
- [6] HEI International Supervisory Commission. Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: A literature review [R]. 2004, Boston, MA, Health Effects Institute (Special Report No. 15).
- [7] KATSOUYANNI K, TOULOUMI G, SAMOLI E, et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project [J]. Epidemiology, 2001, 12(5): 521-531.
- [8] WANG Y G, YING Q, HU J L, et al. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013-2014 [J]. Environment International, 2014, 73(1): 413-422.
- [9] ZHAO S, YU Y, YIN D, et al. Annual and diurnal variations of gaseous and particulate pollutants in 31 provincial capital cities based on *in situ* air quality monitoring data from China National Environmental Monitoring Center [J]. Environment International, 2016, 86: 92-106.
- [10] YIN D, ZHAO S, QU J. Spatial and seasonal variations of gaseous and particulate matter pollutants in 31 provincial capital cities, China [J]. Air Quality Atmosphere & Health, 2016: 1-12.

- [11] 闫雨龙, 何秋生, 钱天伟. 太原市大气污染现状及监测站点优化[J]. 太原科技大学学报, 2010, 31(5): 427-431.
YAN Y L, HE Q S, QIAN T W. Status of atmospheric pollution and optimization of monitoring sites in urban area of Taiyuan [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2010, 31(5): 427-431 (in Chinese).
- [12] DAVID BIELLO. World's Top 10 Most Polluted Places [EB/OL]. [2007-9-13]. <https://www.scientificamerican.com/article/body-worlds-top-10-most-polluted-places>.
- [13] GUNTHER S. The most polluted city in the world: Linfen, China [EB/OL]. [2010-6-3]. <http://trendsupdates.com/the-worlds-most-polluted-city-china>.
- [14] The World Bank. Most Dangerously Polluted Cities [EB/OL]. [2004-5-4]. http://www.allcountries.org/air_pollution.html.
- [15] 高琳萍, 刘庆林. 山西环境污染状况及其原因分析[J]. 山西统计, 2001(8): 17.
GAO L P, LIU Q L. Analysis of environmental pollution in Shanxi Province and its causes [J]. Shanxi Statistics, 2001(8): 17 (in Chinese).
- [16] 贾晓红. 山西省主要城市大气环境污染特征分析[J]. 山西能源与节能, 2003(4): 20.
JIA X H. Analysis of air pollution characteristics of major cities in Shanxi Province [J]. Shanxi Energy and Conservation, 2003(4): 20 (in Chinese).
- [17] 中国环境保护部. 2004 中国环境状况公报[J]. 环境保护, 2005(6): 11-28.
Chinese Ministry of Environmental Protection. Bulletin of China environmental status 2004 [J]. Environmental Protection, 2005(6): 11-28 (in Chinese).
- [18] 梁富生. 改善山西大气污染现状的对策措施初探[J]. 中国环境监测, 2007, 23(4): 68-71.
LIANG F S. Preliminary searching the countermove and measure for improving the status of air pollution of Shanxi Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(4): 68-71 (in Chinese).
- [19] 国家环境保护总局. 2005 全国城市环境管理与综合整治年度报告[EB/OL]. [2010-9-9]. <http://websearch.mep.gov.cn/was5/web/search>.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Annual report of national urban environmental management and comprehensive control 2005 [EB/OL]. [2010-9-9]. <http://websearch.mep.gov.cn/was5/web/search>.
- [20] 山西省环保厅. 2015 年山西省环境状况公报[EB/OL]. [2016-6-3]. <http://www.sxhb.gov.cn/cmsContent.action?articleId=9f94fd50-aeff-4851-88a9-f6088fe472af>.
Department of Environmental Protection of Shanxi Province. Shanxi environmental status bulletin 2015 [EB/OL]. [2016-6-3]. <http://www.sxhb.gov.cn/cmsContent.action?articleId=9f94fd50-aeff-4851-88a9-f6088fe472af> (in Chinese).
- [21] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. [2013-09-12]. http://www.gov.cn/zwzk/2013-09/12/content_2486773.htm.
The State Council of the People's Republic of China. China's national air pollution control action plan [EB/OL]. [2013-9-12]. http://www.gov.cn/zwzk/2013-09/12/content_2486773.htm (in Chinese).
- [22] 赵衍君, 韩朴, 吴林, 等. 大气污染物及 AQI 时空特征分析——以山西省 2015 年上半年为例[J]. 环境保护科学, 2016, 42(3): 94-102.
ZHAO Y J, HAN P, WU L, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of air pollutants and AQI in Shanxi Province in the first half of 2015 [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(3): 94-102 (in Chinese).
- [23] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准[EB/OL]. [2016-1-1]. <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqhjlzb/201203/W020120410330232398521.pdf>.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ambient air quality standards [EB/OL]. [2016-1-1]. <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqhjlzb/201203/W020120410330232398521.pdf>.
- [24] CHEN W, TANG H, ZHAO H. Diurnal, weekly and monthly spatial variations of air pollutants and air quality of Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119: 21-34.
- [25] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014 年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42.
WANG G L, XUE J J, ZHANG J Z. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and main cause of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(1): 34-42 (in Chinese).
- [26] CHAI F, GAO J, CHEN Z, et al. Spatial and temporal variation of particulate matter and gaseous pollutants in 26 cities in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26: 75-82.
- [27] 史淑云. 吕梁市离石区大风气候特征分析[J]. 现代农业科技, 2016(18): 222.
SHI S Y. Analysis on the climatic characteristics of gales in Lishi district of Lvliang city [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(18): 222 (in Chinese).
- [28] 张兵, 侯建, 刘传姚, 等. 2004-2008 年我国 110 个城市大气污染物空间分布特征[J]. 环境与职业医学, 2013, 30(7): 498-502.
ZHANG B, HOU J, LIU C Y, et al. Spatial distributions of major air pollutants in 110 cities in China, 2004-2008 [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2013, 30(7): 498-502 (in Chinese).
- [29] 杨中庆. 基于 R 语言的空间统计分析研究与应用[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
YANG Z Q. Research and application of spatial statistics analysis based on R [D]. Guangzhou: Jinan university, 2006 (in Chinese).