

# 威海市环翠区 2021—2022 年 大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组成季节变化特征

王丽霞<sup>1</sup>, 刘海燕<sup>1</sup>, 张晓明<sup>1</sup>, 刘军深<sup>2</sup>

(1. 山东省威海生态环境监测中心, 山东 威海 264200; 2. 鲁东大学 a. 化学与材料科学学院; b. 环境科学研究所, 山东 烟台 264039)

**摘要:** 以威海市环翠区 2021 年 6 月至 2022 年 5 月一年中采样所得大气中 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度日均值及其中水溶性离子 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>)、碳组分(有机碳(OC)、元素碳(EC))及无机元素的监测数据为依据,分析了 PM<sub>2.5</sub> 及其化学组分的季节变化特征。结果表明,威海市环翠区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度为 32 μg·m<sup>-3</sup>, 低于 PM<sub>2.5</sub> 的国家空气质量标准二级限值,季节性特征明显,冬季最高,夏季最低,春季略高于秋季。PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子年均浓度为 16.50 μg·m<sup>-3</sup>, 占 PM<sub>2.5</sub> 总质量的 51.6%, 各水溶性离子浓度次序为: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > F<sup>-</sup>; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 浓度均表现为秋冬季较高,夏春季较低,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度夏季最高,其它季节浓度相差不大,其它离子的季节浓度除 Na<sup>+</sup> 春季浓度最高外,均呈现出冬季最高的特征; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 是其中的主要水溶性离子,不同季节这 3 种离子浓度之和的次序为: 17.61 μg·m<sup>-3</sup>(冬季) > 14.04 μg·m<sup>-3</sup>(秋季) > 12.56 μg·m<sup>-3</sup>(春季) > 11.48 μg·m<sup>-3</sup>(夏季); 硫酸化率(SOR)、氮氧化率(NOR)的季节变化特征明显,基本表现为冬季>秋季>春季>夏季的趋势。PM<sub>2.5</sub> 的总碳(TC)和 OC 的季节变化趋势相同,二者各自的数据冬春季接近,夏秋季数据接近,但冬春季明显高于夏秋季; EC 值除夏季较低外,其它 3 个季节的浓度相差不大。PM<sub>2.5</sub> 的无机元素主要有 S、Si、K、Fe, 少量 Ca、Al、Na、Zn; 对于同一种元素,大多表现为冬春季浓度较高,夏秋季较低,与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的季节变化基本一致; S 元素冬春季浓度较低,夏秋季较高。PM<sub>2.5</sub> 中的已鉴别物种成分年平均浓度为 23.7 μg·m<sup>-3</sup>, 占 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度的 74.0%, 仍有 26.0% 的质量成分未能鉴别出来。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 化学组成; 水溶性离子; 季节变化; 威海市

**中图分类号:** X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)04-0311-09

大气中的 PM<sub>2.5</sub> 具有粒径小、表面积大、活性强,易附带有毒、有害物质(例如:重金属、微生物等),且在大气中的停留时间长、输送距离远等特性,因而对人体健康和大气环境质量的影响很大。PM<sub>2.5</sub> 的成分较为复杂,主要包含水溶性离子、总碳(TC)(其中包括有机碳(OC)、元素碳(EC))、地壳元素和微量元素等<sup>[1]</sup>。深入探讨 PM<sub>2.5</sub> 化学组成的分布特征,对解析 PM<sub>2.5</sub> 的理化性质、存在形式、毒理学机制及主要来源等具有重要意义,因此对 PM<sub>2.5</sub> 组成及其特征的研究备受重视。国内有关天津<sup>[2-3]</sup>、上海<sup>[4]</sup>、广州<sup>[5]</sup>、深圳<sup>[6-7]</sup>等沿海城市大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分的研究表明,各地大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度和化学组分特征均具有明显的地域和季节差

异性,并且其污染来源受工业结构、气象条件、近距离传输和组分的存在形态等多种因素的影响。

在对山东半岛沿海城市大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分研究中,周睿智等<sup>[8]</sup>对目前公开发表的 39 项山东省 PM<sub>2.5</sub> 源解析研究进行了梳理与总结,综述了山东省各地级市 PM<sub>2.5</sub> 源解析的研究现状和进展,概括了其时空分布特征,并对其影响因素进行了分析。山东半岛地区(如青岛、烟台、威海等市)二次源的贡献最大,平均贡献为 36%,其次是尘源和机动车源,平均贡献分别为 18% 和 17%。

Wu 等<sup>[9]</sup>较早研究了青岛市 2006—2007 年 PM<sub>2.5</sub> 及其中水溶性离子、有机碳和元素碳、无机元素的质量浓度特征及季节性变化特点。李秀镇

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 威海市细颗粒物与臭氧污染协同防控政府采购项目(SDGP37100000202202000124A001)

第一作者简介: 王丽霞(1968—),女,山东威海人,高级工程师,研究方向为环境监测综合分析。E-mail: whzhs@wh.shandong.cn

通信作者简介: 刘军深(1964—),男,山东威海人,教授,硕士生导师,博士,研究方向为环境分析化学。E-mail: liujunshen@163.com

等<sup>[10]</sup>分析了青岛市PM<sub>2.5</sub>浓度特征、元素组成和来源。周佳佳等<sup>[11]</sup>分析了青岛市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的浓度特征。徐少才等<sup>[12]</sup>分析了青岛市PM<sub>2.5</sub>中的无机元素、水溶性离子、碳等组分的质量浓度,采用CMB模型估算法估算了青岛市的一次源类、二次源类对PM<sub>2.5</sub>的贡献,并结合排放源清单及系数分配得到综合的PM<sub>2.5</sub>源解析结果。

刘童等<sup>[13]</sup>于2016—2019年四个季节在烟台市3个点位采集分析了其PM<sub>2.5</sub>质量浓度和化学组分特征,以CMB模型对受体进行解析,并利用后向轨迹和PSCF对传输气流和潜在源区进行了分析。王中杰等<sup>[14]</sup>利用2015—2019年山东省日照市PM<sub>2.5</sub>质量浓度和气象要素的小时数据,对日照市PM<sub>2.5</sub>季节污染特征和日照市海陆风特征进行了分析,并探讨了日照市不同季节PM<sub>2.5</sub>主要传输路径和其轨迹污染特征及其潜在源区分布和贡献,也分析了海陆风对日照市污染物的影响。结果表明:日照市PM<sub>2.5</sub>呈现冬季最高、夏季最低的分布特征,监测站点颗粒物浓度在偏西北风影响下较高。李明燕等<sup>[15]</sup>为明确威海市采暖期细颗粒物的组分及来源,于2018年1—3月在威海市5个空气质量例行监测点采集了环境空气PM<sub>2.5</sub>,分析了OC、EC、水溶性离子及元素组分特征,利用PMA模型解析PM<sub>2.5</sub>来源。崔宜少<sup>[16]</sup>分析了2013年10月—2014年1月威海监测站逐日、逐时的PM<sub>2.5</sub>平均值与气象要素的相关性。总体而言,对烟台、威海和日照市区域内近几年PM<sub>2.5</sub>中的化学组成季节变化研究较少。

威海市位于山东半岛东端,地处北纬36°41′~37°35′、东经121°11′~122°42′。北、东、南三面濒临黄海,北与辽东半岛相对,东与朝鲜半岛隔海相望,西与烟台市接壤。东西最大横距135 km,南北最大纵距81 km,总面积5 799.84 km<sup>2</sup>,其中市区面积2 607.28 km<sup>2</sup>。海岸线长978 km。威海市辖环翠区、文登区、荣成市和乳山市,其中环翠区为中心区。威海市地处中纬度,属于北温带季风型大陆性气候,四季变化和季风进退都较明显。与同纬度的内陆地区相比,具有雨水丰富、年温适中、气候温和的特点。另外,受海洋的调节作用,又具有春冷、夏凉、秋暖、冬温,昼夜温差小、无霜期长、大风多和湿度大等海洋性气候特点。全市历年平均气温12.2℃,历年平均降水量737.7 mm,历年平均日照时数2 480.0 h。2020年全市平均气温12.9℃,平均

降水量873.3 mm,平均总日照时数2 175.3 h<sup>[17]</sup>。

至2021年底,威海市环境空气质量已连续六年达到国家二级标准,持续保持全省第一。经过全市多年来不断加大污染治理力度,随着燃煤锅炉超低、工业污染源标准的提高等,靠末端治理而形成的污染减排空间逐渐变小,持续保持和改善环境空气质量的难度更大。影响威海市环境空气质量的污染指标主要是PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>。目前,威海市大气污染防治工作的重点是加强PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>的协同控制,深化挥发性有机物和氮氧化物的协同治理,聚焦扬尘整治、挥发性有机物治理、移动源污染防治和空气污染过程应对等关键领域,开展集中整治攻坚行动,坚持精准、科学、依法治污,深入打好蓝天保卫战。

为了更好地为防控PM<sub>2.5</sub>污染提供更准确及时的信息,威海市自2021年6月开始对市中心区环翠区大气中PM<sub>2.5</sub>组分开展手工监测。本文以2021年6月至2022年5月一年的数据为依据,讨论威海市环翠区不同季节PM<sub>2.5</sub>的质量浓度及其中水溶性离子、碳组分(有机碳、元素碳)及无机元素等的变化特征,以期为保持乃至改善该区域的大气质量提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

按照《国家大气颗粒物组分网手工监测作业指导书(第一版)》<sup>[18]</sup>《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》<sup>[19]</sup>和《大气颗粒物组分手工监测质量保证与质量控制规定(第一版)》<sup>[20]</sup>等相关规范要求,在威海市区环翠区域布设了1个大气PM<sub>2.5</sub>组分手工监测点“市监测站”。

该监测点位于山东省威海生态环境监测中心楼顶空气自动站,周围是居住区与商业区,采样点位周围无明显污染源,能较好地代表威海市中心区PM<sub>2.5</sub>污染水平。采样点的基本信息见表1。

采样时间:2021年6月—8月(夏季)、2021年9月—11月(秋季)、2021年12月—2022年2月(冬季)和2022年3月—5月(春季)。

采样频次:一般为1次/3日(除2022年3月采样2次外,其余各月均采样10~11次),共采样114天,每天采集4个样品。

表1 威海市环翠区大气颗粒物组分监测采样点位信息

Tab.1 List of monitoring sampling point of atmospheric particulate matter components in Huancui District of Weihai City

点位名称	功能区	经纬度	详细地址
威海市环境监测站楼顶监测点	二类区	122.111 63E ,37.507 84N	威海市环翠区光明路92-1号

### 1.2 样品分析与质量控制

分析项目: PM<sub>2.5</sub>质量浓度, PM<sub>2.5</sub>中的水溶性离子( NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>)、碳组分( TC、OC、EC)和无机元素( Na、K、Mg、Ca、Ba、Cd、Sn、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Pb、Al、S和Si等22种元素)。分析方法及依据见表2,质量控制严格按照文献[20]的要求实施。

### 1.3 PM<sub>2.5</sub>质量浓度评价标准

以我国《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中PM<sub>2.5</sub>的二级限值作为评价标准,其年平均标准限值为35 μg·m<sup>-3</sup>,24 h标准限值为75 μg·m<sup>-3</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>浓度水平及季节变化特征

在2021年6月至2022年5月一年的研究期内,

PM<sub>2.5</sub>的年平均浓度为32 μg·m<sup>-3</sup>,低于PM<sub>2.5</sub>的国家空气质量标准二级限值(35 μg·m<sup>-3</sup>)。其中有8天日均浓度超过PM<sub>2.5</sub>的国家空气质量标准二级限值(75 μg·m<sup>-3</sup>),日均浓度超标率为7.0%。最高浓度出现在2021年11月18日,达到124 μg·m<sup>-3</sup>,其它7天超标日期按浓度高低分布分别是:2021年11月3日(118 μg·m<sup>-3</sup>),2022年2月10日(103 μg·m<sup>-3</sup>),2022年1月23日(98 μg·m<sup>-3</sup>),2021年12月15日(89 μg·m<sup>-3</sup>),2022年4月18日(83 μg·m<sup>-3</sup>),2022年1月8日(79 μg·m<sup>-3</sup>)和2021年10月25日(78 μg·m<sup>-3</sup>)。研究期内各季节PM<sub>2.5</sub>的季节浓度变化见表3。

比较表3研究期内威海市环翠区PM<sub>2.5</sub>的季节浓度变化,可以看出,PM<sub>2.5</sub>表现为冬季最高,夏季最低,春季略高于秋季的情况。威海市环翠区环境空气中PM<sub>2.5</sub>的浓度大小主要受三方面的因素影响。一是受来自固定和流动污染源的人为污染物排放的影响;二是受城市地形地貌和气象条件等自然条件的影响;三是受源自沿海及内陆的长距离区域输送的影响。

表2 样品的分析测试方法

Tab.2 Methods for analyzing and testing samples

分析项目	方法	方法依据
PM <sub>2.5</sub> 质量浓度	重量法	《环境空气PM <sub>10</sub> 和PM <sub>2.5</sub> 的测定重量法》(HJ 618—2011)
水溶性阳离子	离子色谱法	《环境空气颗粒物中水溶性阳离子(Li <sup>+</sup> 、Na <sup>+</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> )的测定离子色谱法》(HJ 800—2016)
水溶性阴离子	离子色谱法	《环境空气颗粒物中水溶性阴离子(F <sup>-</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、Br <sup>-</sup> 、NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 、SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )的测定离子色谱法》(HJ 799—2016)
无机元素	X射线荧光光谱法	《环境空气颗粒物中无机元素的测定波长色散X射线荧光光谱法》(HJ 830—2017)
OC/EC	热光法	《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南7.5.1》(生态环境部监测函(2020)8号)

表3 研究期内采样点各季节PM<sub>2.5</sub>的浓度Tab.3 PM<sub>2.5</sub> concentrations in each season at the sampling site during the study period

监测时间	监测次数	超标天数/d	浓度范围/(μg·m <sup>-3</sup> )	平均浓度/(μg·m <sup>-3</sup> )
春季	22	1	13~83	32
夏季	31	0	6~60	25
秋季	31	3	11~124	31
冬季	30	4	14~103	39
全年	114	8	6~124	32

冬季  $PM_{2.5}$  浓度最大的主要原因是威海市地形地貌属于起伏缓和、谷宽坡缓的波状丘陵区,地势中部高,山脉大多东西走向。威海市环翠区南北邻山,冬季盛行西、西北风,受山脉的阻挡,会造成污染物在背风处出现涡流,无法扩散。其次威海市位于山东半岛最东端,极易受到海陆风环流的影响。特别是深秋和冬季,当地区发生海陆风时,极易出现低空逆温,逆温的存在抑制了城市大气污染物的输送和扩散,造成了污染物的累积<sup>[16]</sup>。三是威海市属于温带季风性气候,冬季降水量为全年最少,仅占全年的 5%,并且大风多、强度大。少雨、植被稀疏、干旱、大风容易将地面的沙尘卷入空中,污染大气,使大气中可吸入颗粒物、细颗粒物增加。

夏季  $PM_{2.5}$  浓度最小的主要原因是夏季由于太平洋高压加强北上,夏季季风开始,多为 3~4 级南到东南风,有利于暖湿空气北上,因而降水多,湿度大。降水对环境空气有净化作用,有利于颗粒物的沉降。其次夏季光照时间长,强度大,气体污染物(二氧化硫、氮氧化物)光化学反应活跃。三是由于威海市三面环海,受海洋的调节作用,夏季早晚凉爽,这种情况下近地面的空气垂直对流运动会比较明显,对于污染物的扩散往往比较有利。风力较其他季节小,也会影响颗粒物输送、扩散、沉降以及二次粒子生成。春秋  $PM_{2.5}$  浓度介于冬夏季之间。

## 2.2 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化特征

### 2.2.1 水溶性离子的季节变化特征

研究期间,威海市环翠区  $PM_{2.5}$  中水溶性离子的季节变化情况见表 4。

表 4  $PM_{2.5}$  中水溶性离子组分的季节变化  
Tab.4 Seasonal variations of water-soluble

ion fractions in $PM_{2.5}$ 单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$					
离子组分	年均值	春季	夏季	秋季	冬季
$\text{Na}^+$	0.68	1.07	0.62	0.34	0.68
$\text{NH}_4^+$	3.56	2.91	3.01	3.69	4.62
$\text{K}^+$	0.29	0.26	0.11	0.33	0.45
$\text{Mg}^{2+}$	0.23	0.17	0.21	0.10	0.43
$\text{Ca}^{2+}$	0.64	0.68	0.63	0.28	0.96
$\text{F}^-$	0.09	0.08	0.04	0.10	0.12
$\text{Cl}^-$	0.65	0.64	0.23	0.59	1.15
$\text{NO}_3^-$	6.17	5.96	2.82	6.75	9.16
$\text{SO}_4^{2-}$	4.19	3.69	5.65	3.60	3.83
总计	16.50	15.46	13.32	15.78	21.40

从表 4 可知,9 种水溶性离子年均总浓度为  $16.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占  $PM_{2.5}$  总质量的 51.6%,说明水溶性离子是大气  $PM_{2.5}$  的重要组成部分。不同季节水溶性离子的总量分别为:冬季( $21.41 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) > 秋季( $15.77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) > 春季( $14.47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) > 夏季( $13.34 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),与  $PM_{2.5}$  浓度的季节变化情况基本相同。同时可以看出,各离子浓度由高到低依次为:  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ 。其中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  是主要离子,其年平均浓度和占总离子浓度的 84.4%,而其它离子浓度都较低。由于各个离子组分的来源不同,呈现出的季节变化特征也有所差异。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度均表现为冬秋季较高,夏春季较低。在夏季高温条件下,二次颗粒物  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  易分解成气态的硝酸和氨,导致  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  在夏季浓度低。冬季低温条件,稳定的大气层结构及  $\text{NO}_x$  的排放增多均有利于  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的生成,故  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度冬季最高<sup>[21-23]</sup>。

$\text{SO}_4^{2-}$  浓度夏季最高,其它季节浓度相差不大。夏季  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高是由于高温高湿的气象条件以及强烈的光化学反应促使  $\text{SO}_2$  转化为  $\text{SO}_4^{2-}$  的反应速率大大增强,转化率有时高达 90% 以上。冬季  $\text{SO}_4^{2-}$  气温较低,  $\text{SO}_2$  转化为  $\text{SO}_4^{2-}$  的气相反应速率较低,但冬季采暖期大量燃煤而导致气态  $\text{SO}_2$  的排放量增加,液相反应及充足的  $\text{SO}_2$  来源也能导致大量  $\text{SO}_4^{2-}$  的生成,故其浓度与春秋两季相差不大<sup>[24-25]</sup>。

其它离子的季节浓度除  $\text{Na}^+$  (主要来自海盐)春季浓度最高外,均呈现出冬季最高的特征。这主要由于威海市东、西、北三面濒临黄海,春季和冬季西北风较多,受海盐影响较大,冬季采暖期长,一般是 11 月 10 日至次年 4 月 10 日左右。同时冬、春季绿色植物处于干枯期,大风天气较多,降水较少,裸露土地处于干松状态,遇风易引起扬尘。冬、春季也是全国大范围雾霾现象频发时期。而夏、秋季绿色植被旺盛,土地裸露较少,同时降水较多,对于颗粒物有明显的冲洗效果。

### 2.2.2 $PM_{2.5}$ 中二次离子的变化特征

#### 1) SNA 四季浓度及占比

一般认为,作为水溶性离子主要成分的  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  (3 种离子统称为 SNA) 是由气态前体物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  通过均相或非均相反应生成的二次污染物。威海市 SNA 的年均浓度为  $13.92 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占水溶性离子总浓度( $16.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

的比例高达84.4%。SNA的季节浓度分别为:冬季(17.61 μg·m<sup>-3</sup>)>秋季(14.04 μg·m<sup>-3</sup>)>春季(12.56 μg·m<sup>-3</sup>)>夏季(11.48 μg·m<sup>-3</sup>) ,占水溶性离子总浓度的比例分别为:82.3%、89.0%、81.2%、86.2% ,均超过80%。

## 2) 二次离子生成机制

通常用硫酸化率(SOR)、氮氧化率(NOR)来衡量气态前体物SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>向SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的转化程度,当SOR和NOR大于0.1时,表示有二次转化发生<sup>[25-26]</sup>,SOR和NOR计算公式如下:

$$SOR = C_1 / (C_1 + C_2) \quad (1)$$

$$NOR = C_3 / (C_3 + C_4) \quad (2)$$

式中,C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>分别表示SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NO<sub>2</sub>的浓度。

研究周期的SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的浓度值取自同一监测站点同一时间段的环境空气污染指标监测数据平均值(见表5)

表5 各季节SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>监测浓度  
Tab.5 Monitoring concentrations of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in each season

监测时间	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
春季	7	17
夏季	5	15
秋季	5	20
冬季	6	22
全年	6	18

取表4和表5的相关数据,可以计算出威海市各季及全年的SOR、NOR均大于0.1(见表6),表明威海市中心区的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来自于二次转化。

表6 各季节SOR和NOR值  
Tab.6 SOR and NOR values for each season

监测时间	SOR	NOR
春季	0.345	0.260
夏季	0.531	0.158
秋季	0.419	0.252
冬季	0.390	0.294
全年	0.411	0.255

作SOR、NOR与各季节的变化趋势如图1所示。

由图1可以看出,SOR、NOR与各季节的变化趋势呈现相反状态。SOR值夏季(0.531)最高,秋季(0.419)次之,冬季(0.390)较低,春季(0.345)最低。来源主要为SO<sub>2</sub>与O<sub>3</sub>、OH自由基在大气中发生的气相氧化反应和SO<sub>2</sub>与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等氧化剂在气溶胶颗粒物表面发生的液相非均相氧

化反应,其中温度是影响气相氧化反应的主要因素,而湿度则是影响液相非均相氧化反应的主要因素<sup>[28-30]</sup>。结合威海市温度和相对湿度变化趋势可知,夏季温度最高,气相氧化反应增强,同时湿度较高促进液相非均相反应,促使夏季SOR值最高。

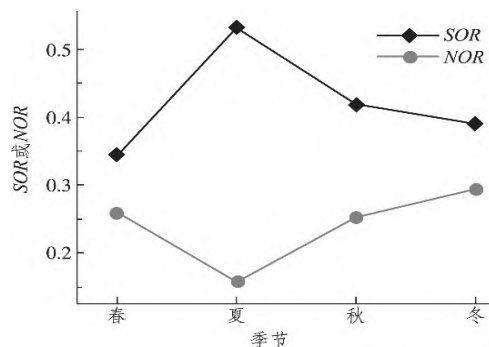


图1 SOR、NOR各季节的变化趋势

Fig.1 Seasonal seasonal trend chart of SOR and NOR

NOR值则是冬季(0.294)最高,春季(0.260)次之,秋季(0.252)较低,夏季(0.158)最低,这是由于夏季温度较高利于HNO<sub>3</sub>向NO<sub>2</sub>转化并同时易导致NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>分解<sup>[27-28]</sup>,而冬季温度最低湿度较高,利于NO<sub>2</sub>二次转化<sup>[31]</sup>。

## 2.2.3 水溶性离子中阴阳离子平衡分析

通过离子平衡计算,可以较好地反映气溶胶及其他环境样品中的离子酸碱平衡,表征颗粒物的酸碱性。降水的pH在一定程度上受到大气颗粒物酸碱性的影响,可导致降水的酸化,也可以中和酸性降水<sup>[32]</sup>。有研究表明<sup>[33-34]</sup>,Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>等阴离子可增强颗粒物的酸性;Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等阳离子可增强颗粒物的碱性。

利用公式(3)和(4)通过计算阴离子电荷当量AE(anion equivalent)与阳离子电荷当量CE(cation equivalent)的比值AE/CE可以判断颗粒物的酸碱性,若AE/CE>1,表明PM<sub>2.5</sub>呈酸性;若AE/CE<1,表明PM<sub>2.5</sub>呈碱性<sup>[33]</sup>。

阴离子电荷数公式(单位:μeq·m<sup>-3</sup>):

$$AE = \frac{[SO_4^{2-}]}{48} + \frac{[NO_3^-]}{62} + \frac{[Cl^-]}{35.5} + \frac{[F^-]}{19} \quad (3)$$

阳离子电荷数公式(单位:μeq·m<sup>-3</sup>):

$$CE = \frac{[Na^+]}{23} + \frac{[NH_4^+]}{18} + \frac{[K^+]}{39} + \frac{[Mg^{2+}]}{12} + \frac{[Ca^{2+}]}{20} \quad (4)$$

威海市环翠区全年的AE/CE为0.75,其季

节均值依次为: 秋季(0.82) > 春季(0.80) > 夏、冬季(0.70), 说明威海市环翠区  $PM_{2.5}$  中阳离子较多, 导致  $PM_{2.5}$  呈碱性。

#### 2.2.4 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子间相关性分析

通过对  $PM_{2.5}$  中水溶性离子组分进行相关分析, 可以对各离子的可能来源和相互之间的结合方式进行初步探讨<sup>[32, 35]</sup>。采用 Origin 9.1 软件得出  $PM_{2.5}$  中水溶性离子间的 Pearson 相关系数如表 7 所示。

表 7  $PM_{2.5}$  中水溶性离子间的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients for the concentrations of water-soluble ions in  $PM_{2.5}$

离子	$Na^+$	$NH_4^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$F^-$	$Cl^-$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
$Na^+$	1								
$NH_4^+$	-0.372	1							
$K^+$	-0.113	0.873	1						
$Mg^{2+}$	0.171	0.727	0.530	1					
$Ca^{2+}$	0.550	0.412	0.314	0.910	1				
$F^-$	-0.141	0.830	0.993*	0.428	0.212	1			
$Cl^-$	0.122	0.848	0.952*	0.722	0.585	0.916	1		
$NO_3^-$	-0.033	0.844	0.997*	0.539	0.353	0.989*	0.965*	1	
$SO_4^{2-}$	-0.093	-0.405	-0.791	0.0132	0.0766	-0.846	-0.679	-0.810	1

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

由表 7 可以看出,  $K^+$  与阴离子中的  $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  和  $F^-$  之间均存在显著的相关性, 相关系数均在 0.95 以上。这说明  $KNO_3$ 、 $KCl$  和  $KF$  可能是  $K^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  和  $F^-$  的主要存在形式, 同时也说明这几种离子具有同源性。 $K^+$  与  $Cl^-$  主要来自海盐、燃煤和生物质燃烧等, 这与威海市三面临海, 受海洋影响更有关<sup>[15]</sup>;  $NO_3^-$  主要是二次反应转化而成, 由氮氧化物(燃煤、机动车排放和生物质燃烧过程)通过氧化反应生成;  $F^-$  的来源复杂, 可来源于工业排放、燃料的燃烧等<sup>[36]</sup>。

#### 2.3 $PM_{2.5}$ 中碳组分分析结果

研究期内  $PM_{2.5}$  中 TC、OC、EC 质量浓度在各季节的变化情况见表 8。由表 8 可见, 在研究周期内, TC 和 OC 的季节变化趋势相同, 二者各自的数据冬春季节接近, 夏秋季节数据接近, 但冬春季节明

显高于夏秋季节; EC 值除夏季较低外, 其它 3 个季节的浓度相差不大。在采样期内, OC 和 EC 的季节变化趋势相似, OC 平均含量约占 TC 的 94.73%, 可见 OC 是 TC 贡献源的主要组成部分。

表 8 各季节  $PM_{2.5}$  中碳组分的平均质量浓度

Tab.8 Average mass concentration of carbon components

in  $PM_{2.5}$  in each season 单位:  $\mu g \cdot m^{-3}$

季节	TC	OC	EC	OC/EC
春季	6.43	6.15	0.38	16.18
夏季	4.52	4.31	0.22	19.59
秋季	4.96	4.62	0.34	13.59
冬季	6.85	6.48	0.37	17.51
年平均	5.69	5.39	0.328	16.72

#### 2.4 $PM_{2.5}$ 中无机组分分析结果

研究期内  $PM_{2.5}$  中无机组分的平均质量浓度见表 9。

表 9  $PM_{2.5}$  中无机组分的平均质量浓度

Tab.9 Average mass concentration of inorganic components in  $PM_{2.5}$

单位:  $\mu g \cdot m^{-3}$

季节	Na	K	Mg	Ca	Ba	Cd	Sn	Ti	V	Cr	Mn
春季	0.072	0.209	0.033	0.159	0.042	0.022	0.031	0.020	0.020	0.013	0.025
夏季	0.027	0.080	0.013	0.058	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.008
秋季	0.057	0.176	0.024	0.079	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.019
冬季	0.076	0.276	0.025	0.090	0.021	0.012	0.015	0.009	0.010	0.006	0.014
年平均	0.058	0.185	0.024	0.097	0.016	0.009	0.012	0.007	0.008	0.005	0.017
季节	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Pb	Al	S	Si
春季	0.221	0.005	0.012	0.010	0.046	0.018	0.018	0.045	0.103	0.317	0.277
夏季	0.138	ND	0.005	0.002	0.038	ND	ND	ND	0.037	0.989	0.101
秋季	0.154	0.003	0.003	0.003	0.038	0.011	0.006	0.021	0.054	0.527	0.142
冬季	0.170	0.002	0.003	0.005	0.046	0.010	0.005	0.023	0.046	0.387	0.116
年平均	0.171	0.003	0.006	0.005	0.042	0.010	0.007	0.022	0.060	0.555	0.159

注: ND 表示低于检出限。

由表9可以看出,研究期内,无机元素主要有S、Si、K、Fe,少量Ca、Al、Na、Zn。总体来说,对同一种元素,大多表现为冬春季浓度较高,夏秋季较低,与PM<sub>2.5</sub>浓度的季节变化基本一致;S元素冬春季浓度较低,夏秋季较高,具体原因有待继续研究。另外,由表9可计算出PM<sub>2.5</sub>中无机组分的年平均质量浓度为 $1.48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### 2.5 PM<sub>2.5</sub>中未鉴别成分分析

综上所述,威海市环翠区采样点2021年6月—2022年5月一个周期年内PM<sub>2.5</sub>中的已鉴别物种的年平均浓度之和为: $16.50$ (水溶性离子)+ $5.69$ (TC)+ $1.48$ (无机组份)= $23.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占PM<sub>2.5</sub>年平均浓度( $32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )的74.0%,这说明仍有26.0%的PM<sub>2.5</sub>质量成分未能鉴别出来,其浓度为 $8.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

PM<sub>2.5</sub>中的未鉴别成分直接关系到PM<sub>2.5</sub>对相应的研究中大气环境(如吸光与消光、成云等)和人体健康(如吸入颗粒物的毒性)影响的确定。这些未鉴定的部分可能包括PM<sub>2.5</sub>的质量浓度与各化学成分测量误差、水溶性成分所吸收的水蒸气等偏差以及其它未能测量的成分等<sup>[37]</sup>。威海市中心区采样点PM<sub>2.5</sub>中的未鉴别具体成分有待今后进一步研究。

## 3 结论

1) 研究期内,威海市环翠区PM<sub>2.5</sub>年均浓度为 $32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,低于PM<sub>2.5</sub>的国家空气质量二级标准限值。其中有8天日均浓度超过PM<sub>2.5</sub>的国家空气质量二级标准限值,日均浓度超标率为7.0%;PM<sub>2.5</sub>浓度季节变化明显,冬季最高,春季略高于秋季,夏季最低。

2) 威海市环翠区PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子年均浓度为 $16.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占PM<sub>2.5</sub>总质量的51.6%;各离子浓度依次为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{F}^-$ ,其中SNA为主要水溶性离子, $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 浓度均表现为秋冬季较高,夏春季较低, $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度夏季最高,其它季节浓度相差不大;其它离子的季节浓度除 $\text{Na}^+$ (主要来自海盐)春季浓度最高外,均呈现出冬季最高的特征;SNA、SOR、NOR等的季节变化特征明显,基本表现为冬季>秋季>春季>夏季的趋势。AE/CE的

年均值为0.75,说明PM<sub>2.5</sub>中阳离子较多,导致其呈碱性。

3) 在研究周期内,TC和OC的季节变化趋势相同,二者各自的数据冬春季节接近,夏秋季节数据接近,但冬春季节明显高于夏秋季节,EC值除夏季较低外,其它3个季节的浓度相差不大;无机元素主要有S、Si、K、Fe,少量Ca、Al、Na、Zn。总体来说,对同一种元素,大多表现为冬春季浓度较高,夏秋季较低,与PM<sub>2.5</sub>浓度的季节变化基本一致;S元素冬春季浓度较低,夏秋季较高。

4) 研究周期内,PM<sub>2.5</sub>中的已鉴别物种成分年平均浓度为 $23.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,占PM<sub>2.5</sub>年平均浓度的74.0%,仍有26.0%的质量成分未能鉴别出来。

### 参考文献:

- [1] 孙友敏,范晶,徐标,等.省会城市不同功能区大气PM<sub>2.5</sub>化学组分季节变化及来源分析[J].环境科学,2022,43(5):2304-2316.
- [2] 肖致美,徐虹,李鹏,等.天津市典型区域PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征[J].环境科学研究,2019,32(8):1324-1332.
- [3] 史国良,陈刚,田瑛泽,等.天津大气PM<sub>2.5</sub>中碳组分特征和来源分析[J].环境污染与防治,2016,38(1):1-7.
- [4] 陈耿,常运华,曹芳,等.上海城乡细颗粒物中碳质、无机和重金属的全组分特征及来源分析[J].科学技术与工程,2020,20(29):12218-12225.
- [5] LI J W, ZHANG Z S, WU Y F, et al. Effects of chemical compositions in fine particles and their identified sources on hygroscopic growth factor during dry season in urban Guangzhou of South China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149749.
- [6] 云慧,何凌燕,黄晓锋,等.深圳市PM<sub>2.5</sub>化学组成与时空分布特征[J].环境科学,2013,34(4):1245-1251.
- [7] 江家豪,彭杏,朱波,等.深圳大气PM<sub>2.5</sub>化学组成的长期变化特征[J].中国环境科学,2021,41(2):574-579.
- [8] 周睿智,闫才青,崔敏,等.山东省大气细颗粒物来源解析的研究现状与展望[J].中国环境科学,2021,41(7):3029-3042.
- [9] WU R D, ZHOU X H, WANG L P, et al. PM<sub>2.5</sub> characteristics in Qingdao and across coastal cities in China[J]. Atmosphere, 2017, 8(4): 1-19.
- [10] 李秀镇,盛立芳,徐华,等.青岛市大气PM<sub>2.5</sub>元素组

- 成及来源研究[J].环境科学,2012,33(5):1438-1445.
- [11] 周佳佳,石金辉,李丽平等.青岛大气中酸碱气体及PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系[J].环境科学,2015,36(9):3135-3143.
- [12] 徐少才,王静,吴建会,等.青岛市PM<sub>2.5</sub>化学组分特征及综合来源解析[J].中国环境监测,2018,24(4):44-53.
- [13] 刘童,王晓军,陈倩等.烟台市环境受体PM<sub>2.5</sub>四季污染特征与来源解析[J].环境科学,2019,40(3):1082-1090.
- [14] 王中杰,霍娟,杜惠云,等.2015—2019年日照市PM<sub>2.5</sub>长期变化特征及其潜在源区分析[J].中国环境科学,2021,41(9):3969-3980.
- [15] 李明燕,杨文,魏敏,等.典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析[J].环境科学,2020,41(4):1550-1560.
- [16] 崔宜少.威海PM<sub>2.5</sub>浓度与气象要素的相关分析.山东气象,2015,35(3):17-22.
- [17] 威海市人民政府.威海概况[EB/OL].(2021-11-25)[2022-06-13].<http://www.weihai.gov.cn/col/col58816/index.html>.
- [18] 中国环境监测总站.国家大气颗粒物组分网手工监测作业指导书(第一版)[Z].北京:2021.
- [19] 生态环境部.环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南[Z].北京:2020.
- [20] 中国环境监测总站.大气颗粒物组分手工监测质量保证与质量控制规定(第一版)[Z].北京:2019.
- [21] WANG H L, AN J L, SHEN L J, et al. Mechanism for the formation and microphysical characteristics of sub-micron aerosol during heavy haze pollution episode in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 501-508.
- [22] 刘保献,张大伟,陈添,等.北京市PM<sub>2.5</sub>主要化学组分浓度水平研究与特征分析[J].环境科学学报,2015,35(12):4053-4060.
- [23] 程渊,吴建会,毕晓辉,等.武汉市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源[J].环境科学学报,2019,39(1):189-196.
- [24] 黄含含,王羽琴,鄢袁,等.西安市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的季节变化特征[J].环境科学,2020,41(6):2528-2535.
- [25] 孟琛琛,王丽涛,张芬芬,等.邯郸市PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J].环境科学学报,2015,35(11):3443-3451.
- [26] 尹寒梅,陈军辉,冯小琼,等.绵阳市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征及来源分析[J].环境化学,2021,40(12):3755-3763.
- [27] WANG Y, ZHUANG G, TANG A, et al. The ion chemistry and the source of PM<sub>2.5</sub> aerosol in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(21):3771-3784.
- [28] 杨留明,王申博,郝祺,等.郑州市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征及来源分析[J].环境科学,2019,40(7):2977-2984.
- [29] 黄炯丽,陈志明,莫招育,等.基于高分辨率MARGA分析桂林市PM<sub>2.5</sub>水溶性离子特征[J].中国环境科学,2019,39(4):1390-1404.
- [30] GENG N, WANG J, XU Y, et al. PM<sub>2.5</sub> in an industrial district of Zhengzhou, China: Chemical composition and source apportionment[J]. Particuology, 2013, 11(1):99-109.
- [31] HE Q, YAN Y, GUO L, et al. Characterization and source analysis of water-soluble inorganic ionic species in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan city, China[J]. Atmospheric Research, 2017, 184: 48-55.
- [32] 郑敬茹,瞿厚淑,付山,等.黄石市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子浓度特征及来源分析[J].环境科学研究,2019,32(7):1170-1178.
- [33] QIAO B, CHEN Y, TIAN M, et al. Characterization of water soluble inorganic ions and their evolution processes during PM<sub>2.5</sub> pollution episodes in a small city in southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2605-2613.
- [34] GAO J, PENG X, CHEN G, et al. Insights into the chemical characterization and sources of PM<sub>2.5</sub> in Beijing at a 1-h time resolution[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 162-171.
- [35] 崔宏,平丽蓉,刘肖,等.临汾市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J].环境化学,2021,40(12):3764-3773.
- [36] 陈金媛,唐凯杰,朱莹,等.杭州市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的污染特征研究[J].浙江工业大学学报,2016,44(4):410-416.
- [37] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等.大气颗粒物与区域符合污染[M].北京:科学出版社,2011:223-229.



## Seasonal Changes of Chemical Components of PM<sub>2.5</sub> in Huancui District of Weihai City from 2021 to 2022

WANG Lixia<sup>1</sup>, LIU Haiyan<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>1</sup>, LIU Junshen<sup>2</sup>

(1. Weihai Eco-Environment Monitoring Center of Shandong Province, Weihai 264200, China;

2. a. School of Chemistry and Materials Science; b. Institute of Environmental Science, Ludong University, Yantai 264039, China)

**Abstract:** The daily mean mass concentrations of atmospheric PM<sub>2.5</sub> and its water-soluble ions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup>), carbon components (organic carbon (OC), elemental carbon (EC)) and inorganic elements in Huancui District of Weihai City from June 2021 to May 2022 were collected and the seasonal variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its chemical components were analyzed. The results showed that the average annual concentration of PM<sub>2.5</sub> in Huancui District of Weihai City was 32 μg · m<sup>-3</sup>, which was lower than the second-level limit of national air quality standard of PM<sub>2.5</sub>. The seasonal characteristics were obvious that the mass concentration was the highest concentration in winter, the lowest in summer, and slightly higher in spring than in autumn. The average annual concentration of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> was 16.50 μg · m<sup>-3</sup>, accounting for 51.6% of the total mass of PM<sub>2.5</sub>, and the concentrations of water-soluble ions were ranked as: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > F<sup>-</sup>. The concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> were higher in winter and autumn, and lower in summer and spring. The concentration of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> was the highest in summer, and there were no significant difference in other seasonal concentrations. The seasonal concentrations of other ions were the highest in winter, except for Na<sup>+</sup>, which was the highest in spring. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> were the main water-soluble ions. The sum of the concentrations of these three ions in different seasons was as following order: 17.61 μg · m<sup>-3</sup> (winter) > 14.04 μg · m<sup>-3</sup> (autumn) > 12.56 μg · m<sup>-3</sup> (spring) > 11.48 μg · m<sup>-3</sup> (summer). The seasonal variation characteristics of sulfur oxidation rate (SOR) and nitrogen oxidation rate (NOR) were obvious, and the basic trend decreased in the following order: winter, autumn, spring and summer. The seasonal variation trends of total carbon (TC) and OC of PM<sub>2.5</sub> were similar. The data of TC or OC were similar in winter and spring, and so were the data of summer and autumn, but the concentrations of EC in winter and spring were significantly higher than that in summer and autumn. The concentrations of EC in the other three seasons were similar, except that the concentration of EC in summer was lower. The inorganic elements of PM<sub>2.5</sub> mainly included S, Si, K and Fe, and a small amount of Ca, Al, Na and Zn. For the same element, the concentration was higher in winter and spring, and lower in summer and autumn, which was basically consistent with the seasonal variation of PM<sub>2.5</sub> concentration. The concentrations of S element were low in winter and spring, but high in summer and autumn. The annual average concentration of identified species in PM<sub>2.5</sub> was 23.7 μg · m<sup>-3</sup>, accounting for 74.0% of the annual average concentration of PM<sub>2.5</sub>, and 26.0% of the mass components could not be identified.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>; chemical components; water-soluble ions; seasonal variation; Weihai City

(责任编辑 李维卫)