王嘉敏,杨文柱,焦 燕,等.内蒙古沿黄流域城市群 $PM_{2.5}$ 区域输送及源解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5338-5356.
Wang J N, Yang W Z, Jiao Y, et al. Regional transport and source analysis of $PM_{2.5}$ in urban agglomerations along the Yellow River Basin in Inner Mongolia [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5338-5356.

内蒙古沿黄流域城市群 $PM_{2.5}$ 区域输送及源解析

王嘉敏[1],杨文柱[1*],焦 燕[1],闫颖超[1],田 莉[1],袁小冬[2] (1.内蒙古师范大学化学与环境科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022；2.包头市生态环境技术保障中心,内蒙古 包头 014000)

摘要：为探究呼和浩特市和乌海市夏冬季细颗粒物($PM_{2.5}$)的组分变化规律和污染特征及其区域输送.获取了大气超级站 2022 年 6~8 月、12 月和 2023 年 1~2 月两个城市 $PM_{2.5}$ 及其水溶性离子、有机碳(OC)及元素碳(EC)、金属元素等化学组分的浓度和气象数据,并根据正定矩阵因子分解(PMF)模型和后向轨迹(HYSPLIT)模型对其来源和输送路径进行解析.结果表明, 两个城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度冬季>夏季,且同一季节 $PM_{2.5}$ 质量浓度乌海市>呼和浩特市;两个城市 $PM_{2.5}$ 在冬季和夏季偏碱性,且呼和浩特市夏季颗粒物碱性强于乌海市,在冬季碱性弱于乌海市;两个城市 $PM_{2.5}$ 中 K、Mn、Cu、Ba、Ti、K^+、Cl^-含量在冬季>夏季,说明两个城市冬季受生物质燃烧、燃煤排放和机动车尾气排放影响较大;呼和浩特市夏季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源,冬季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃煤源、生物质燃烧源、二次无机源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源、机械磨损源;乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车源、道路扬尘源,冬季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源、机械磨损源.呼和浩特市夏冬季均以二次源为主;乌海市夏季以机动车与道路扬尘混合源为主,冬季以二次无机源为主;呼和浩特市夏季主要受到来自山西省南部、陕西省北部以及蒙古国南部地区的气流影响,潜在源区为山西省南部、河北省南部、河南省北部等地区,乌海市夏季主要受到来自新疆东部、阿拉善盟、陕西省南部以及巴彦淖尔市等地区的气流影响,呼和浩特市和乌海市冬季均受到来自阿拉善盟和境外蒙古国南部地区的气流影响,不同的是乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输还受到来自新疆北部地区的气流影响,其中呼和浩特市冬季潜在源区为本地及包头、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、阿拉善盟东北部、蒙古国偏南区域,乌海市夏冬季潜在源区为新疆东部、河西走廊地区、阿拉善盟、鄂尔多斯市、乌兰察布市、乌海市本地.研究结果为沿黄流域典型城市大气污染防控提供数据支撑.

关键词：$PM_{2.5}$；后向轨迹；正定矩阵因子分析法(PMF)；成分分析
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5338-19

Regional transport and source analysis of $PM_{2.5}$ in urban agglomerations along the Yellow River Basin in Inner Mongolia.

WANG Jia-min[1], YANG Wen-zhu[1*], JIAO Yan[1], YAN Ying-chao[1], TIAN Li[1], YUAN Xiao-dong[2] (1.College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University,Hohhot 010022, China；2.Baotou Ecological Environment Technology Protection Centre, Baotou 014000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5338~5356

Abstract：To investigate the variation rules, pollution characteristics, and their regional transport of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) components in different seasons from Hohhot and Wuhai cities. In this study, the concentration of $PM_{2.5}$ and its chemical components, such as water-soluble ions, organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and metallic elements, and meteorological data, were obtained from the atmospheric super station in June-August and December of 2022, and January-February of 2023 from Hohhot and Wuhai. The sources and transport paths were also analyzed according to the Positive Definite Matrix Factor Decomposition (PMF) model and the Backward Trajectory (HYSPLIT) model. $PM_{2.5}$ mass concentration in winter was higher than that in summer in both cities. $PM_{2.5}$ mass concentration in Wuhai was higher than that in Hohhot in the same season. $PM_{2.5}$ in both cities is alkaline in winter and summer. The alkalinity of $PM_{2.5}$ in Hohhot was stronger than that in Wuhai during summer, and weaker than that in Wuhai during winter. The content of K, Mn, Cu, Ba, Ti, K^+, and Cl^- in $PM_{2.5}$ in winter was higher than that in summer in the two cities. The two cities were more affected by biomass combustion, coal-fired emissions, and motor vehicle emissions in winter. $PM_{2.5}$ in Hohhot during summer mainly came from combustion sources, secondary inorganic sources, industrial sources, soil dust sources, and mixed sources motor of vehicle and road dust, while in winter it mainly came from coal combustion sources, biomass combustion sources, secondary inorganic sources, soil dust sources, mixed sources of motor vehicle and road dust, and mechanical wear sources. $PM_{2.5}$ in Wuhai during summer mainly came from combustion sources, secondary inorganic sources, industrial sources, soil dust sources,

收稿日期：2025-03-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42175038);内蒙古自治区杰出青年基金资助项目(2022JQ02);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT23041);2025 年度内蒙古重点研发和成果转化计划-科技合作资助项目(2025KJHZ0017);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2024MS04026)
* 责任作者, 副教授, yangwzh@imnu.edu.cn

motor vehicle sources, road dust sources, while in winter it mainly came from combustion sources, secondary inorganic sources, industrial sources, soil dust sources, mixed sources of motor vehicle and road dust, and mechanical wear sources. Hohhot city was dominated by secondary sources in both summer and winter. Wuhai city was dominated by the mixture of motor vehicle and road dust in summer, while by secondary inorganic sources in winter. Hohhot City was mainly affected by air currents from southern Shanxi Province, northern Shaanxi Province, and southern Mongolia in summer, with potential source areas being southern Shanxi Province, southern Hebei Province, and northern Henan Province. Wuhai was mainly affected by air currents from eastern Xinjiang, Alxa League, southern Shaanxi Province, and Bayannur City in summer. Hohhot and Wuhai were affected by air currents from Alxa League and southern Mongolia in winter, with the difference that $PM_{2.5}$ transport in Wuhai in winter was also affected by air currents from northern Xinjiang. The potential source areas for winter in Hohhot are local, Baotou., Bayannur, Ordos, northeastern Alashan League, and the southern region of Mongolia, while that in Wuhai City during summer and winter were the eastern part of Xinjiang, Hexi Corridor region, Alashan League, Ordos City, Ulanqab City, and Wuhai City. The research results provide data support for the prevention and control of air pollution in typical cities along the Yellow River Basin.

Key words：$PM_{2.5}$；backward trajectory；Positive Definite Matrix Factor Analysis (PMF)；compositional analysis

近几十年来,细颗粒物($PM_{2.5}$)对人体健康、空气质量和全球气候变化的显著影响引起了世界各国的广泛关注[1].大气细颗粒物($PM_{2.5}$)中主要组分包括无机碳、有机碳、离子和元素等一次排放,以及在大气中通过不同氧化途径生成的二次无机盐和有机物,不同的物质组成代表了特定的污染来源和颗粒物氧化生成方式.硫酸盐(SO_4^{2-})、硝酸盐(NO_3^-)和氨盐(NH_4^+)是北方城市大气 $PM_{2.5}$ 中重要组成成分,统称为二次无机气溶胶(SNA),而 SNA 主要由煤炭等化石燃料燃烧、工业、机动车和农业畜牧业等排放的 SO_2、NO_x 和 NH_3 等经大气氧化、吸附和沉降等物理化学过程二次转化生成[2].

“十四五”时期,中国深入开展污染防治行动,加强城市大气质量达标管理,持续改善京津冀及周边地区、汾渭平原、长三角地区空气质量,基本消除重污染天气.黄河从宁蒙界都思兔河口流入内蒙古,穿行于库布其、乌兰布和两大沙漠之间,是我国北方重要的生态防线[3].内蒙古黄河流域盟市包括呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、乌海市和阿拉善盟,荒漠化土地面积 0.366 亿 hm^2,占全区荒漠化土地面积的 60.1%[3].

其中,呼和浩特市是内蒙古地区省会城市,具有蒙古高原典型的大陆性气候特征,其年温差较大,日温差也较大,具有显著的季节性变化[1],工业生产主要以制造业为主,电力、热力生产和供应业、石油、煤炭及其他燃料加工业次之[4].而乌海市处于干旱半干旱地区,属中温带大陆性气候.春季多风少雨,夏季短而炎热,昼夜温差大,秋季长且气温骤降,冬季长,温度低;乌海作为内蒙古西部主要的工业城市,能源消费结构主要以煤炭为主,由于工业布局不合理、产业结构同质化严重、地理环境特殊等原因,常年经受严重的雾霾污染的困扰;该地区能源消耗高,人为源污染物排放量大,加之典型的峡谷城市地形,静风逆温等不利污染物扩散的气象条件时有发生,导致乌海空气质量严重下滑.而以煤炭为主的能源结构,是乌海市及周边地区大气污染严重的主要原因之一[5].当前对呼和浩特市和乌海市等典型西北地区城市的研究较少.

本研究通过对 2022 年夏冬季呼和浩特市和乌海市 $PM_{2.5}$ 及其组分浓度数据进行分析,同时结合正定矩阵因子分析法(PMF)、后向轨迹聚类分析法(HYSPLIT)、厘清呼和浩特市和乌海市大气污染特征、来源及传输影响,为呼和浩特市和乌海市大气污染防治及空气质量持续改善提供科学依据,同时为进一步开展区域大气污染防治联防联控工作奠定基础.

1　材料与方法

1.1　数据来源

大气污染物 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相关成分数据以及气象数据来自呼和浩特市和乌海市大气超级站.后向轨迹模式采用的气象资料是美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 GDAS 数据,空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 1h,从 ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1 获取.

1.2　数据处理方法

1.2.1　二次有机碳(SOC)估算　二次有机气溶胶(SOA)代表在大气氧化过程中二次生成的有机物,通常用公式 SOA=1.4×SOC 计算,SOC 的质量浓度用

OC/EC 最小比值法来定量估算,如式(1)、(2)所示:

$$SOC = OC - EC \cdot \left(\frac{OC}{EC}\right)_{min} \quad (1)$$

$$POC=OC-SOC \quad (2)$$

式中:POC 为一次有机碳的质量浓度,μG/m^3;(OC/EC)$_{min}$为所测样品中的 OC/EC 的最小值;SOC 为二次有机碳的质量浓度,μG/m^3;OC 为有机碳的质量浓度,μg/m^3;EC 为元素碳的质量浓度,μg/m^3.

1.2.2 大气颗粒物酸碱性分析 一般来说,SO_4^{2-}、NO_3^-、和Cl^-等阴离子会增加颗粒物的酸性,而NH_4^+、K^+、Na^+、Mg^{2+}和 Ca^{2+}等阳离子可以增加颗粒物的碱性.阴阳离子平衡能够反映城市大气颗粒物中离子的酸碱度.常用阴离子当量 AE(μmol/m^3)和阳离子当量 CE(μmol/m^3)的比值 CE/AE 来评价颗粒物中阴阳离子的电荷平衡状况及酸碱性.CE 和 AE 的计算如式(3)、(4)所示:

$$CE = \frac{[Na^+]}{23} + \frac{[NH_4^+]}{18} + \frac{[K^+]}{39} + \frac{[Mg^{2+}]}{12} + \frac{[Ca^{2+}]}{20} \quad (3)$$

$$AE = \frac{[SO_4^{2-}]}{48} + \frac{[NO_3^-]}{62} + \frac{[Cl^-]}{35.5} \quad (4)$$

1.2.3 正定矩阵因子分解法(PMF) PMF 模型是一种多元分析工具,它无需源谱数据,因而被广泛应用.它将样本数据分为两个因子矩阵.假设 X 为 $n\times m$ 矩阵,n 为样品数,m 为化学成分,X 可以被分解为污染源贡献矩阵 $\boldsymbol{G}(n\times p,p$ 为污染源数目)和污染源成分谱矩阵 $\boldsymbol{F}(p\times m)$,则所测样本浓度可表示为式(5):

$$X_{(n\times m)}=\boldsymbol{G}_{(n\times p)}\boldsymbol{F}_{(p\times m)}+E_{(n\times m)} \quad (5)$$

模型对 $\boldsymbol{G}$ 和 $\boldsymbol{F}$ 矩阵进行非负约束,即样品中不可以存在负的贡献源,当残差与不确定度比值的平方加权值 Q 达到最小值,可以认为此次模型因子分解达到最优结果.PMF 算法通过不断的最小化 Q 值从而确定矩阵 $\boldsymbol{G}$ 和 $\boldsymbol{F}$,Q 值用式(6)计算:

$$Q = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}}\right)^2 \quad (6)$$

式中:U_{ij} 是样品的不确定度,其他各项含义同前,可以看出不确定度的取值对取得模型最优解至关重要.

传统的不确定度计算对于监测浓度低于和高于物种检出限的物种分别采用不同的计算公式.当实测浓度小于或等于方法检出限时,不确定度用式(7)计算,当实测浓度大于方法检出限时,不确定度用式(8)计算:

$$U_{ij} = 5/6\times MDL \quad (7)$$

$$U_{ij} = \sqrt{(EF\cdot C)^2 + (0.5\times MDL)^2} \quad (8)$$

式中:EF 是误差系数,一般不同功能区采用不同的值,研究显示一般取 0.05~0.2 之间,本研究取经验值 0.1;C 是各成分浓度;MDL 为相应的方法检出限,见表 1.

表 1 化学组成的检出限(MDL)(μg/m^3)

Table 1 Detection limit of chemical composition (MDL)(μg/m^3)

化学组分	MDL	化学组分	MDL	化学组分	MDL	化学组分	MDL	化学组分	MDL
OC	0.4	NH_4^+	0.05	K	0.00117	Co	0.00014	Pb	0.00013
EC	0.2	Cl^-	0.01	Ca	0.0003	Ni	0.0001	Se	0.000083
K^+	0.09	NO_3^-	0.05	V	0.00012	Cu	0.000079	Sb	0.0052
Ca^{2+}	0.09/0.1	SO_4^{2-}	0.04	Cr	0.00012	Zn	0.000067	Ba	0.00039
Na^+	0.05	Al	0.1	Mn	0.00014	As	0.000063	Ti	0.00016
Mg^{2+}	0.06	Si	0.0178	Fe	0.00017	Cd	0.0025	Hg	0.00012

注:呼和浩特市Ca^{2+}的检出限为0.09μg/m^3,乌海市Ca^{2+}的检出限为0.1μg/m^3.

1.2.4 后向轨迹模型(HYSPLIT) 后向轨迹计算采用混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(HYSPLIT),该模型由美国国家海洋和大气管理局和澳大利亚气象局联合开发,用于分析计算大气污染物输送和扩散轨迹,是可以处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源的综合模式系统[6-7].

为了解析呼和浩特市和乌海市的远距离传输源,本研究利用 MeteoInfo 软件将呼和浩特市和乌海市 2022 年夏冬季的轨迹用欧拉距离聚类法分类.选取 2022 年 6、7、8、12 月和 2023 年 1、2 月进行分析,受体点为呼和浩特市城区(111.64°E,40.80°N)和乌海城区(106.83°E,39.66°N),高度为 500m,轨迹计算时长为 72h,分辨率为 1h,每条轨迹代表了气团

到达受体点前的运动轨迹,轨迹的端点代表了该时刻气团的位置和高度.每条聚类对应的百分比表示不同方向的气流比例.根据轨迹线路的长短可推断气流移动的速度,轨迹越长,移动速度越快;轨迹越短,移动速度越慢,就越容易聚集地面的污染物质[8].

后向轨迹聚类分析是采用美国海洋管理部门开发的HYSPLIT模型中的Trajstat模块,该模块根据气团移动速度和方向的不同,对不同气团轨迹进行聚类分组,从而获得不同的输送轨迹组,由此判断特定污染物的外向来源和传输路径,是研究空气污染问题较为常用的方法.

通过潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹法(CWT)来解析颗粒物 $PM_{2.5}$ 的潜在污染来源.PSCF(potential source contribution function)模型被广泛应用于识别影响受体点高浓度污染物的可能潜在来源区域[9].PSCF 网格颜色越深,表明 $PM_{2.5}$ 污染物轨迹经过的概率越大;CWT 网格颜色越深,表示网格区域对受点污染值的贡献程度也越大.研究表明,污染物轨迹经过概率大的区域且同时该区域受点的污染贡献程度也大,则该区域为两者的高值重合区,即潜在污染源区[11].具体原理见式(9):

$$\mathrm{PSCF} = m_{ij}/n_{ij} \tag{9}$$

式中:n_{ij} 为落在某一网格内的所有轨迹节点数;m_{ij} 为其中污染轨迹节点数.

PSCF 值越大表示该区域对于受体点污染贡献越大,由于 PSCF 是一种条件概率,当 n_{ij} 较小时,PSCF 计算结果的不确定性大.为降低计算的不确定性,一些学者引入了权重函数 W_{ij} 计算 WPSCF 值[12],见公式(10).

$$\mathrm{WPSCF} = W_{ij} \cdot \mathrm{PSCF} \tag{10}$$

W_{ij} 定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & 80 \leqslant n_{ij} \\ 0.7 & 20 \leqslant n_{ij} \leqslant 80 \\ 0.42 & 10 \leqslant n_{ij} \leqslant 20 \\ 0.05 & n_{ij} \leqslant 10 \end{cases} \tag{11}$$

为区分相同 PSCF 值的网格对受体点污染贡献的差异,引入 CWT 方法[14]定量计算权重浓度来表征具体的网格贡献.首先创建网格,范围和分辨率均和 PSCF 网格相同,每个网格的 CWT 计算见式(12):

$$\mathrm{CWT}_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^{M} C_l \cdot T_{ijl}}{\sum_{l=1}^{M} T_{ijl}} \tag{12}$$

式中:CWT_{ij} 为网格(i,j)的平均污染权重浓度,μg/m^3;l 为气团轨迹;M 为轨迹的总数;C_l 为轨迹 l 经过网格 ij 时对应的 $PM_{2.5}$ 质量浓度,μg/m^3;T_{ijl} 为轨迹 l 在网格 ij 停留的时间,计算时使用落在网格内的轨迹节点数来代替停留时间,同样当节点数较少时,也会增大不确定性,采用和 PSCF 方法相同的权重函数 W_{ij} 来计算 WCWT 值,见式(13).WCWT 值越大,表明该区域对受体点的污染贡献越大.

$$\mathrm{WCWT}_{ij} = W_{ij} \cdot \mathrm{CWT}_{ij} \tag{13}$$

相比 WPSCF 法,CWT 法更能直观地辨别高浓度贡献的潜在源区,因为 CWT 法在计算过程中考虑了气团在网格中的停留时间,停留时间越长表明轨迹对研究点贡献越大[15].

1.2.5　TrajStat 模型　中国科学院大气物理研究所王亚强研究团队为方便轨迹的计算和后续分析,对轨迹计算、聚类分析、PSCF 和 CWT 分析等进行了软件封装,开发了 TrajStat 模型[16].该模型可以单独使用也可以作为插件嵌入到 Meteoinfo 软件当中,并且可以结合 GIS 进行分析,使用较为方便,本文采用 TrajStat3.0 版本.

2　结果和讨论

2.1　采样期间 $PM_{2.5}$ 浓度特征

在呼和浩特市和乌海市(图1)均观察到$PM_{2.5}$的明显季节性模式,与中国许多其他地区相似,在供暖季节出现 $PM_{2.5}$ 较高水平,均为冬季>夏季.并且在夏冬两个季节乌海市 $PM_{2.5}$ 质量浓度均明显高于呼和浩特市,可见乌海市的受污染程度比呼和浩特市高.按照我国环境质量标准(GB 3095−2012)[17],呼和浩特市夏季 $PM_{2.5}$ 一级和二级浓度均达标,冬季 $PM_{2.5}$ 一级浓度超标天数占总采样天数的 26.7%,二级浓度超标天数占总采样天数的 4.44%;乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 一级浓度超标天数占总采样天数的 15.2%,二级浓度均达标,冬季 $PM_{2.5}$ 一级浓度超标天数占总采样天数的 62.2%,二级浓度超标天数占总采样天数的 16.7%.

$PM_{2.5}$ 的质量浓度与污染源排放强度和空气扩散条件的关系密不可分,图 1 和图 2 分别给出了 NO_2、SO_2、CO、风速(WS)、温度(T)、相对湿度(RH)以及大气压强的数据及其相关性变化.在通过 0.05 显著性检验的前提下,$PM_{2.5}$ 质量浓度与 NO_2、SO_2、CO 和 RH 成正相关关系,与大气压强成负相关关系.

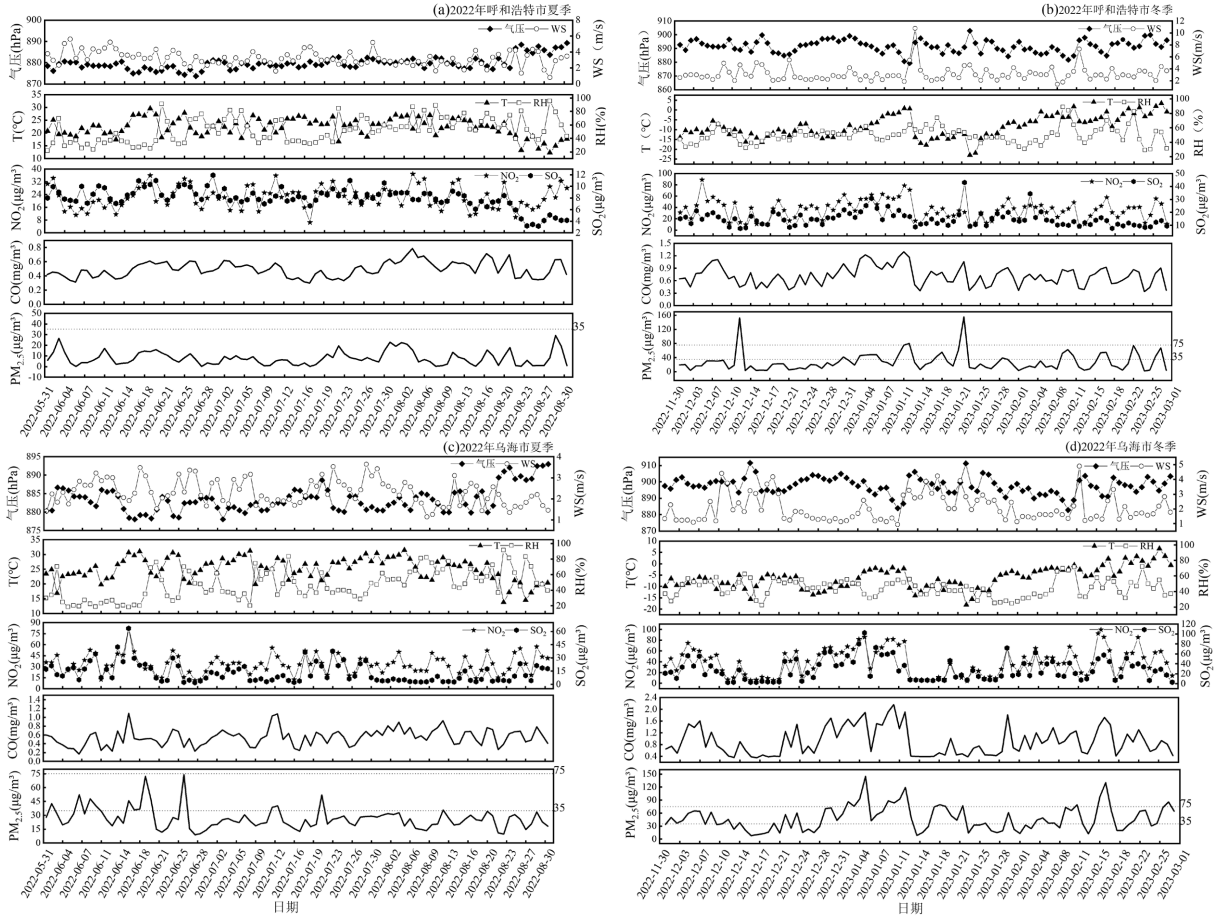


图 1 呼和浩特市和乌海市 2022 年夏冬季空气质量与主要气象参数时间变化

Fig.1 Hohhotand Wuhai Temporal variation of air quality and major meteorological parameters in summer and winter in 2022

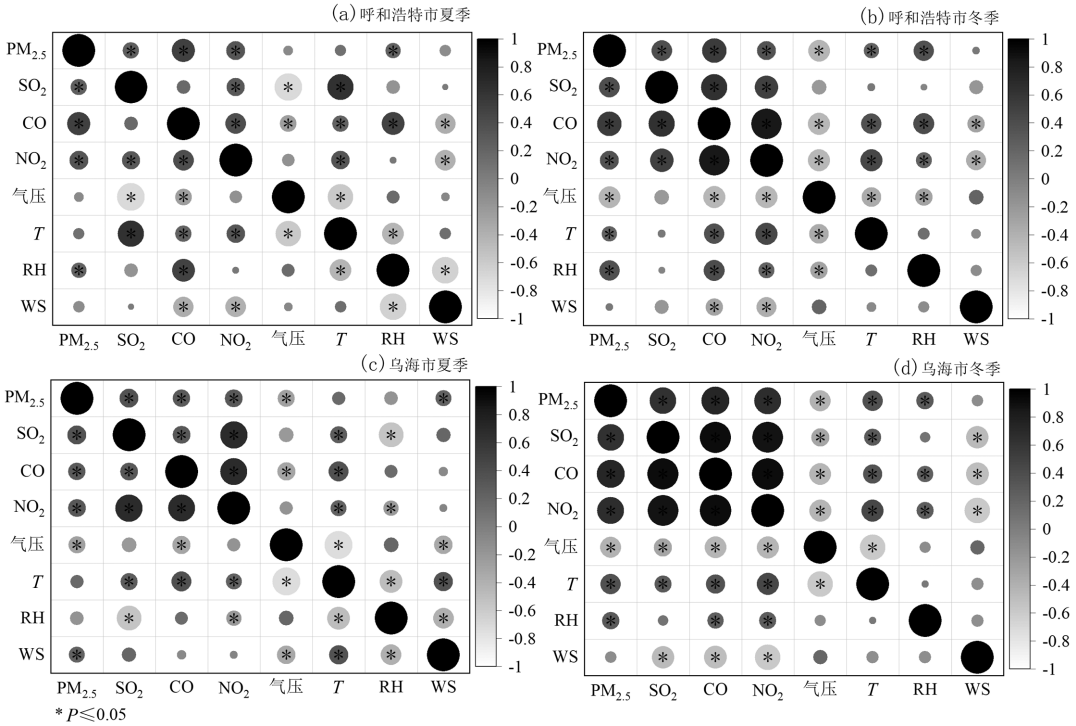


图 2 呼和浩特市和乌海市 2022 年夏冬季空气质量与主要气象参数相关性

Fig.2 Correlation between air quality and major meteorological parameters in Hohhot and Wuhai in summer and winter 2022

2.2　$PM_{2.5}$ 组分特征

2.2.1　大气颗粒中水溶性离子特征　(1)特征　本研究水溶性无机离子(SWIIs)有 NH_4^+、K^+、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、NO_3^-和 Cl^-等 8 种离子.与夏季相比,冬季两个城市的离子总浓度是夏季的 2 倍以上,其中以 NO_3^-、SO_4^{2-}和 NH_4^+占比较大(表 2). SO_4^{2-}中包含一次硫酸盐和二次硫酸盐,一次硫酸盐主要是来源于生产加工中的直接排放、生物质燃烧等,二次硫酸盐主要是化石燃料燃烧排放的 SO_2 或其他含硫物质经过均相和非均相化学反应生成[18]-.呼和浩特市和乌海市冬季采暖均主要以集中供热和部分居民散煤取暖的方式为主,因此燃煤排放的大幅增加导致气态 SO_2 的排放量明显升高(图 1),充足的前体物通过二次反应,导致了冬季 SO_4^{2-}浓度明显高于夏季. NO_3^-主要是从化石燃料燃烧和机动车尾气排放的 NO_x 气体经过液相或气相氧化而来[20],因而 NO_3^-浓度的改变既可能与煤炭的使用量有关,又与本地的气温、湿度有关. NH_4NO_3 的热稳定性较差,挥发性较强,在夏季高温条件下易分解成气态 HNO_3 和 NH_3,而在冬季低温条件和 NO_x 排放增多都有利于 NH_4NO_3 的生成和积累[21],这导致了冬季 NO_3^-浓度明显高于夏季.而 NH_4^+离子浓度变化情况也可能主要受到温度影响. 同时 K^+、Cl^-也呈现出冬季高、夏季低的变化特征,K^+、Cl^-通常被分别作为生物质燃烧和燃煤的重要示踪物,这与呼和浩特市和乌海市冬季燃煤供暖排放的特征相符.

(2)酸碱性　阴阳离子平衡分析常被用于评价大气颗粒物酸碱性[22-23].水溶性离子中的 SO_4^{2-}和 NO_3^-是大气中主要的酸性物质,能直接影响大气降水的酸度[24].

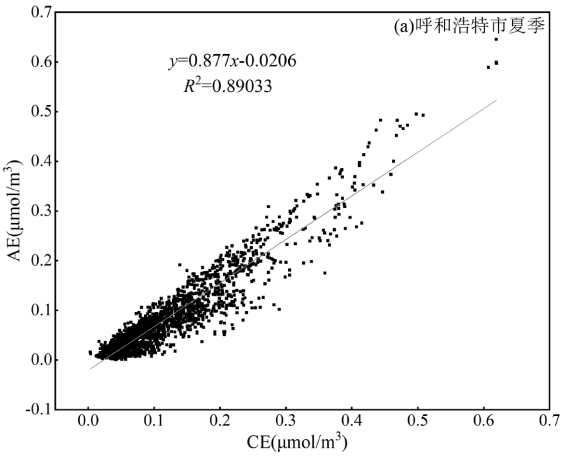
对研究期间夏冬季大气 $PM_{2.5}$ 中阴阳离子进行回归分析(图 3)得出,阴阳离子相关性较好,而且经过计算,CE/AE 比值均大于 1.从不同季节来看,$PM_{2.5}$ 的 CE/AE 值在冬季(1.13 和 1.45)和夏季(2.17 和 1.80)偏碱性.从不同采样点来看,呼和浩特市夏季颗粒物碱性强于乌海市,相反在冬季碱性弱于乌海市.

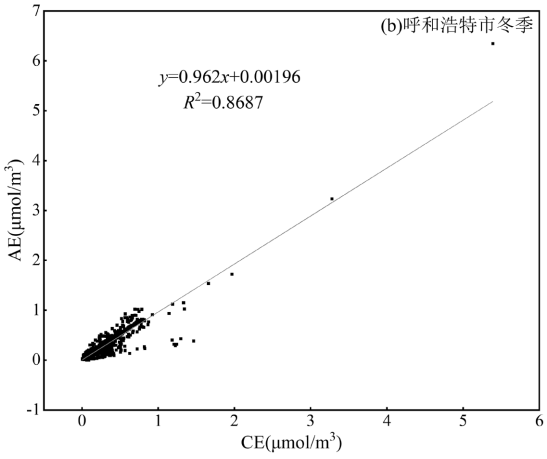
表 2　选定测量地点 $PM_{2.5}$ 及 $PM_{2.5}$ 相关成分的季节平均浓度(μg/m³)

Table 2　Seasonal average concentrations of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$–related constituents at selected measurement locations (μg/m³)

物质	呼和浩特市		乌海市	
	夏季	冬季	夏季	冬季
$PM_{2.5}$	7.89	28.1	26.6	47.9
OC	2.03	4.86	3.72	4.06
EC	0.381	0.851	0.972	1.14
NO_3^-	1.63	5.26	1.65	5.01
SO_4^{2-}	2.51	4.60	3.09	6.17
NH_4^+	1.32	2.89	1.43	3.95
Cl^-	0.0481	1.42	0.383	2.27
Na^+	–	0.129	0.262	0.458
K^+	–	0.630	0.0895	0.465
Ca^{2+}	0.723	0.690	0.861	1.19
Mg^{2+}	0.0638	0.171	0.0773	0.171
WSIIs	6.25	16.1	7.84	18.9
SOA	2.21	3.32	3.25	2.83
SNA	5.43	13.0	6.17	14.6
SOC	1.58	2.37	2.32	2.02
POC	0.448	2.52	1.42	2.11

注:“–”表明未检出;SNA,二次无机气溶胶,[SNA]=[SO_4^{2-}]+[NO_3^-]+[NH_4^+].





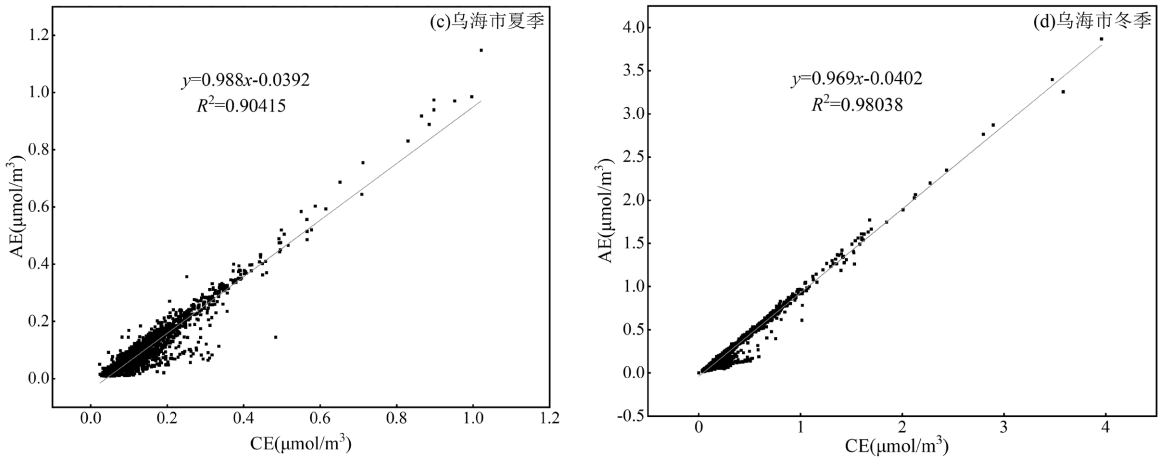


图 3 呼和浩特市和乌海市夏、冬季阴阳离子分析

Fig.3 Analysis of anions and cations in summer and winter in Hohhot and Wuhai

(3)水溶性离子的相关分析 为了确定水溶性离子的形成物质模式,利用 SPSS27.0 软件计算了不同水溶性离子的相关系数.表 3 显示了呼和浩特市和乌海市夏冬季 $PM_{2.5}$ 及其水溶性离子皮尔森相关性系数水溶性离子的相关系数.从表中可以看出二次无机离子较一次无机离子与 $PM_{2.5}$ 的相关性更高,表明二次污染过程与 $PM_{2.5}$ 形成关系更为密切,因此,对二次盐类的特性分析将大大有助于 $PM_{2.5}$ 形成机理的研究.二次盐类的存在形式等特性将在下文中进一步分析和探讨.

SO_4^{2-}、NO_3^-和 NH_4^+离子是 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的主要组成部分,因此优先进行分析.可以看出,NH_4^+与 SO_4^{2-}、NO_3^-、Cl^-的相关性由大到小的顺序为:呼和浩特市夏季和乌海冬季均为 SO_4^{2-}>NO_3^->Cl^-,而呼和浩特市冬季和乌海夏季均为 NO_3^->SO_4^{2-}>Cl^-,说明 NH_4^+主要与 SO_4^{2-}、NO_3^-结合存在.为了确定形成了什么物质,将 NH_4^+的实验结果与 NH_4^+的计算结果进行比较[25].当 NH_4^+以 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在时,按式(14)计算.当 NH_4^+以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 的形式存在时,按式(15)计算.

$$NH_4^+=0.38(SO_4^{2-})+0.29(NO_3^-) \quad (14)$$

$$NH_4^+=0.19(SO_4^{2-})+0.29(NO_3^-) \quad (15)$$

计算结果如图 4 所示.

由图 4 可知,根据公式(14),NH_4^+与 SO_4^{2-}、NH_4^+与 NO_3^-在呼和浩特市夏季和乌海冬季存在较高的相关性,且 NH_4^+以 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在.在呼和浩特市冬季和乌海夏季,NH_4^+与 SO_4^{2-}、NH_4^+与 NO_3^-之间的相关性与式(14)和式(15)的相关性较高,但式(14)的斜率更接近于 1.根据 NH_4^+与 SO_4^{2-}、NH_4^+与 NO_3^-之间的梯度和相关系数,可以得出 NH_4^+以 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4NO_3 的形式存在.

表 3 $PM_{2.5}$ 及其水溶性离子皮尔森相关性系数

Table 3 $PM_{2.5}$ and its water-soluble ion Pearson correlation coefficient

季节	物质	$PM_{2.5}$	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
呼和浩特市夏季	$PM_{2.5}$	1				−	−			
	Cl^-	−0.001	1			−	−			
	NO_3^-	0.101**	0.248**	1		−	−			
	SO_4^{2-}	0.140**	0.158**	0.620**	1	−	−			
	NH_4^+	0.130**	0.220**	0.850**	0.890**	−	−	1		
	Mg^{2+}	0.095**	0.140**	0.181**	0.348**	−	−	0.252**	1	
	Ca^{2+}	0.065**	0.023	−0.050*	0.100**	−	−	−0.024	0.712**	1
呼和浩特市冬季	$PM_{2.5}$	1								
	Cl^-	0.394**	1							
	NO_3^-	0.217**	0.108**	1						
	SO_4^{2-}	0.416**	0.747**	0.534**	1					
	Na^+	0.424**	0.311**	0.064**	0.318**	1				

续表 3

季节		$PM_{2.5}$	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
呼和浩特市冬季	K^+	0.357**	0.971**	0.016	0.719**	0.267**	1			
	NH_4^+	0.225**	0.159**	0.942**	0.606**	0.099**	0.057*	1		
	Mg^{2+}	0.397**	0.785**	−0.002	0.652**	0.501**	0.836**	0.038	1	
	Ca^{2+}	0.355**	0.087**	−0.057*	0.103**	0.844**	0.052*	−0.055*	0.327**	1
乌海市夏季	$PM_{2.5}$	1								
	Cl^-	0.396**	1							
	NO_3^-	0.287**	0.516**	1						
	SO_4^{2-}	0.414**	0.616**	0.733**	1					
	Na^+	0.426**	0.809**	0.431**	0.569**	1				
	K^+	0.202**	0.431**	0.325**	0.384**	0.563**	1			
	NH_4^+	0.215**	0.507**	0.888**	0.852**	0.375**	0.277**	1		
	Mg^{2+}	0.511**	0.341**	0.056**	0.154**	0.397**	0.292**	−0.09**	1	
	Ca^{2+}	0.579**	0.319**	0.067**	0.150**	0.377**	0.258**	−0.14**	0.740**	1
乌海市冬季	$PM_{2.5}$	1								
	Cl^-	0.773**	1							
	NO_3^-	0.660**	0.436**	1						
	SO_4^{2-}	0.806**	0.664**	0.662**	1					
	Na^+	0.527**	0.443**	0.269**	0.422**	1				
	K^+	0.367**	0.548**	0.012	0.196**	0.122**	1			
	NH_4^+	0.762**	0.629**	0.859**	0.918**	0.335**	0.006	1		
	Mg^{2+}	0.376**	0.399**	−0.039	0.153**	0.249**	0.716**	−0.043	1	
	Ca^{2+}	0.448**	0.211**	−0.038	0.092**	0.437**	0.126**	−0.035	0.449**	1

注:**表示在0.01级别相关性显著,*表示在0.05级别相关性显著.

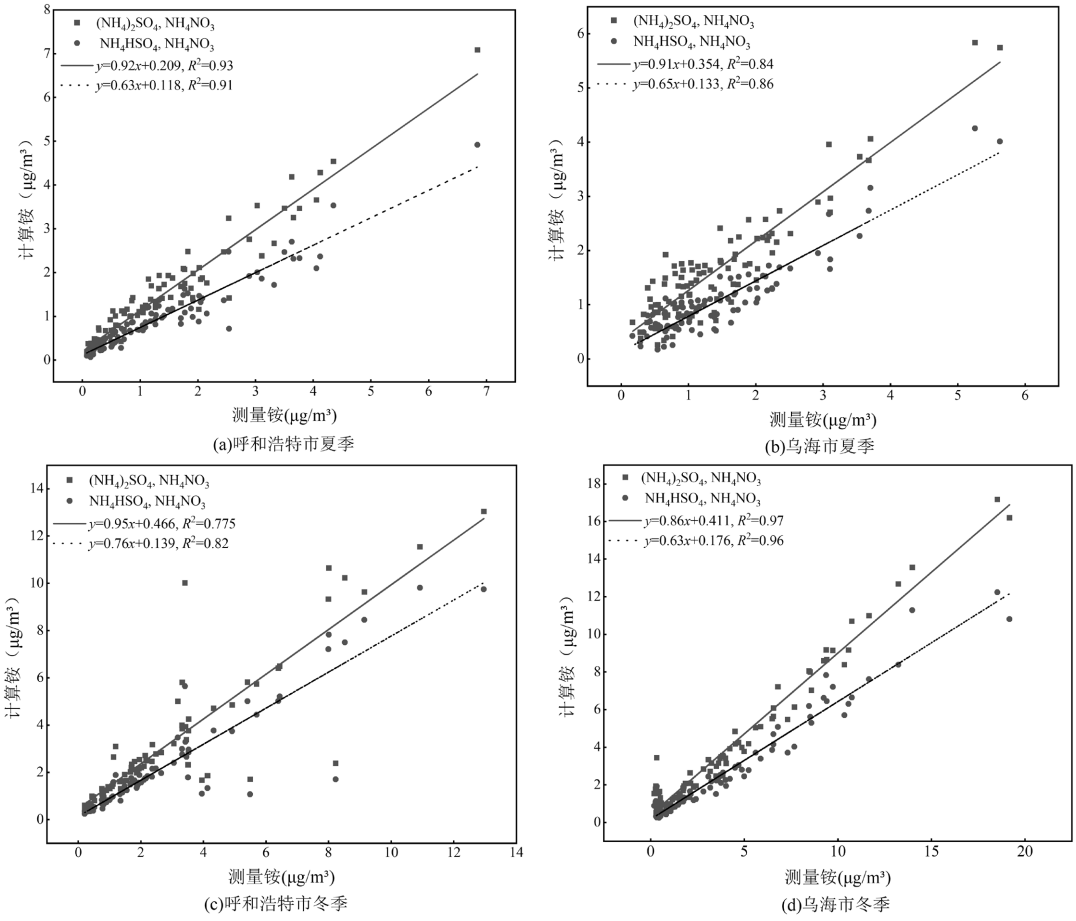


图 4　铵的计算值和测量值之间的相关性

Fig.4　Correlation between calculated and measured values of ammonia

2.2.2 碳质组分分析 气溶胶中还含有有机组分,一般占 $PM_{2.5}$ 质量的 20%~50%[26].按照测量方式的不同可以将其分为有机碳(OC)和元素碳(EC),有机碳和元素碳统称为碳质气溶胶.碳质气溶胶(CA)也是局地和区域性灰霾时段的重要污染物[27].有机碳是指颗粒物中以有机物形式存在的碳元素含量.元素碳是以单质形式存在的碳(石墨碳),同时也含有少量难溶高分子有机物中的碳.元素碳中以单质形式存在的部分主要来自化石燃料、生物质等的不完全燃烧[28].

OC/EC 是判断是否产生二次有机污染的重要指标.OC 不仅包含了直接排放的 POC,还包含了通过光化学氧化作用形成的 SOC.EC 作为一次 OC 排放的示踪物,主要由生物质燃烧排放产生,在大气中稳性较强.当 OC/EC 高于 2.0 时,大气中存在二次污染[29,36].

经计算,呼和浩特市夏、冬季 OC/EC 的质量浓度比值范围分别为: 1.18~39.5(平均值为 6.57)和 2.96~54.8(平均值为 8.51);乌海市夏、冬季 OC/EC 的质量浓度比值范围分别为 1.50~19.5(平均值为 5.14)和 1.83~39.05(平均值为 5.05),OC/EC 季均值均>2,表明存在 SOC 的形成,即大气中存在二次污染.而该比值越高,二次有机气溶胶的污染越严重,因此 OC/EC 的比值在一定程度上能指示 $PM_{2.5}$ 中含碳组分的来源[30].根据以往的研究经验,OC/EC 比值为 1.0~4.2[31],表明有柴油和汽油车的尾气排放[32], OC/EC 在 2.5~10.5 时,指示污染来源以燃煤排放为主;在 16.8~40 时,指示污染来源以生物质燃烧为主;OC/EC 为 13 左右时,指示污染来源以道路扬尘为主[33].根据 OC/EC 比值特征判断,呼和浩特市和乌海市夏冬季 $PM_{2.5}$ 中碳质组分指示污染源以燃煤为主.

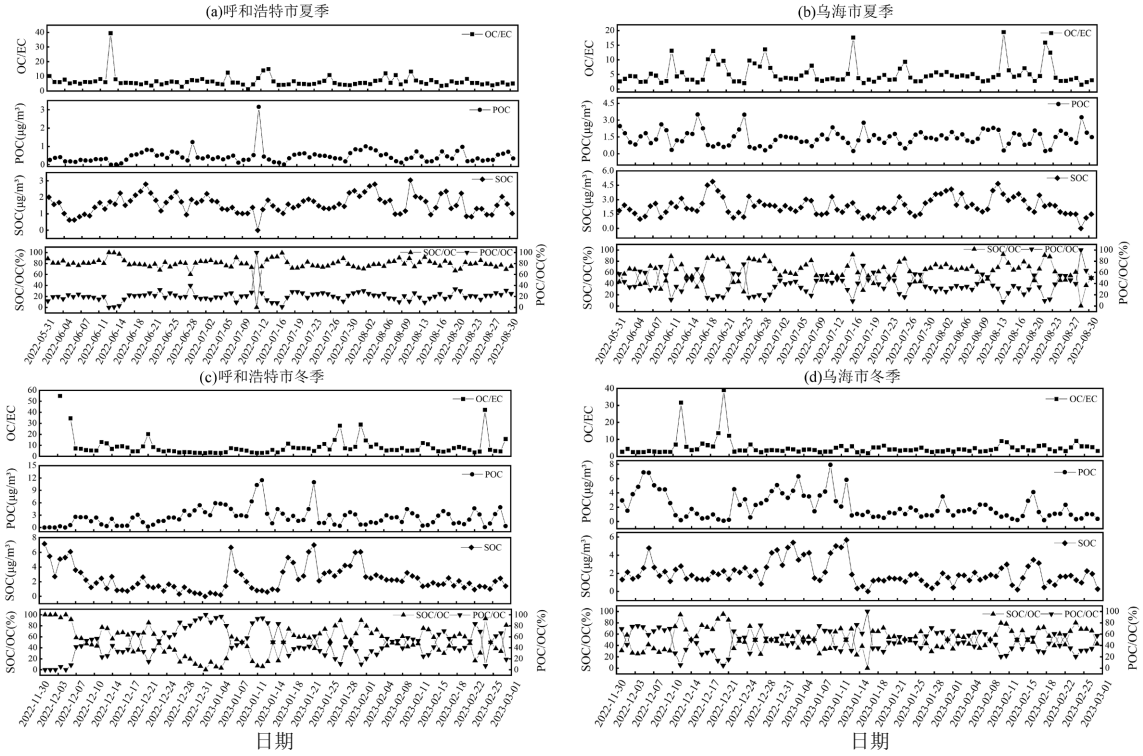


图 5 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC,POC/OC,SOC/OC 的值和 POC,SOC 的质量浓度

Fig.5 Values of OC/EC, POC/OC, SOC/OC and mass concentrations of POC and SOC in $PM_{2.5}$

由图 5 得出,呼和浩特市冬季 SOC 质量浓度为 2.37μg/m³,SOC/OC 为 51.7%;呼和浩特市夏季 SOC 质量浓度为 1.58μg/m³,SOC/OC 为 79.2%,呼和浩特市冬季 SOC 质量浓度高于夏季,但其在总有机碳中占比低于夏季.而乌海市冬季 SOC 质量浓度为 2.02μg/m³,SOC/OC 为 52.4%;夏季 SOC 质量浓度为 2.32μg/m³,SOC/OC 为 61.7%,其 SOC 的浓度及其在 OC 中的占比均为夏季>冬季.另外,利用 OC 和 EC 之间的相关性可以判断 OC 和 EC 的同源性[34],本研究计算了 OC 和 EC 的相关性,如图

6 所示,呼和浩特市夏冬季 OC 和 EC 表现为中度相关(0.405 和 0.600)、乌海市夏季 OC 和 EC 表现为低度相关(0.154)、乌海市冬季 OC 和 EC 表现为高度相关(0.870),表明呼和浩特市和乌海市夏季 OC 和 EC 之间的同源性较差,冬季 OC 和 EC 之间的同源性较好.冬季碳质气溶胶来源相对一致,可能来自燃煤以及北方城市的气流输送,同时结合 SOC 在 OC 中的占比来看,夏季 SOC 有很高的贡献,而 EC 较为稳定,来自一次排放,所以夏季 OC 和 EC 较差的同源性,一方面由于 OC 受到 SOC 的影响较大,另一方面可能 OC 和 EC 受到的一次排放源的影响也存在差异性[35].

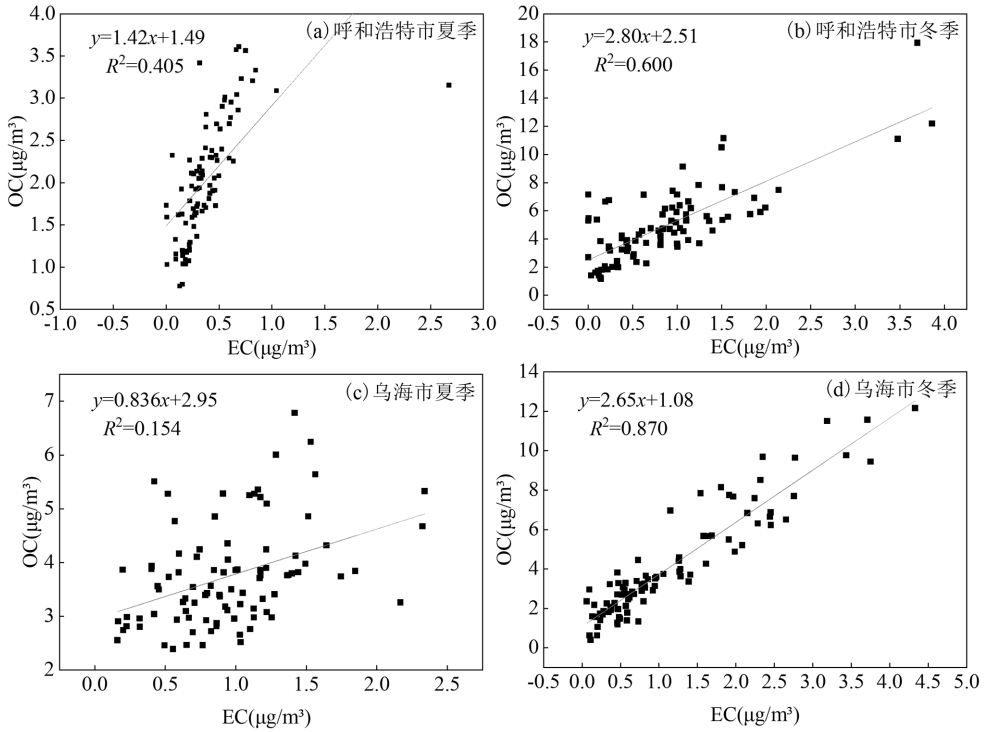


图 6　$PM_{2.5}$ 中 OC、EC 之间线性关系

Fig.6　Linear relationship between OC and EC in $PM_{2.5}$

2.2.3　金属元素　如表 4 所示,两市夏冬季均表现出 Al、K、Ca、Fe、Si 等地壳元素的平均质量占所测定元素总量的 80%以上,这与报道的地壳元素在大气颗粒物金属元素中占比最大的结论相一致[37].而呼和浩特市和乌海市 $PM_{2.5}$ 中 K、Mn、Cu、Ba、Ti 等元素含量在冬季大于夏季,在一定程度上可以说明两个城市冬季受生物质燃烧、燃煤排放和机动车尾气排放影响较大.

表 4　$PM_{2.5}$ 中金属元素浓度

Table 4　Concentration of metal elements in $PM_{2.5}$

元素	呼和浩特市				乌海市			
	夏季		冬季		夏季		冬季	
	浓度(ng/m³)	占比(%)	浓度(ng/m³)	占比(%)	浓度(ng/m³)	占比(%)	浓度(ng/m³)	占比(%)
Al	339±444	17.2	335±2542	10.7	952±1983	16.7	1439±2007	16.7
Si	776±1093	39.4	1022±4470	32.5	2682±4677	46.9	3765±4707	43.8
K	90.5±93.1	4.60	878±5610	27.9	297±513	5.19	730±1997	8.50
Ca	230±342	11.7	396±1110	12.6	1088±1534	19.0	1552±1560	18.1
V	0.63±1.57	0.032	0.5±3.13	0.0159	0.45±1.37	0.0079	1.09±1.98	0.0127
Cr	4.19±13.1	0.213	1.95±12.7	0.062	1±2.24	0.0174	1.61±3.89	0.0188
Mn	9.83±13.2	0.500	11.6±29.8	0.369	21.6±33.4	0.377	37.3±41.4	0.434
Fe	212±246	10.8	346±1158	11.0	621±993	10.9	856±962	9.97
Co	2.63±3.35	0.134	–	–	–	–	–	–

续表 4

元素	呼和浩特市				乌海市			
	夏季		冬季		夏季		冬季	
	浓度(ng/m^3)	占比(%)	浓度(ng/m^3)	占比(%)	浓度(ng/m^3)	占比(%)	浓度(ng/m^3)	占比(%)
Ni	14.9±16.9	0.758	0.78±2.84	0.0249	0.59±1.62	0.0103	0.83±0.89	0.00965
Cu	9.55±13.0	0.486	17.0±195	0.540	1.86±22.6	0.0325	9.89±58.2	0.115
Zn	188±1753	9.57	26.9±41.1	0.855	22.2±32.1	0.388	48.0±57.2	0.559
As	3.24±7.56	0.165	3.23±2.92	0.103	1.84±1.31	0.0321	4.84±7.56	0.0563
Se	3.11±2.91	0.158	0.6±0.92	0.0191	1.06±1.15	0.0186	1.49±2.02	0.0173
Ag	5.2±8.82	0.264	0.83±1.24	0.0265	0.7±4.46	0.0122	0.66±1.37	0.00769
Cd	5.7±11.3	0.290	1.88±1.78	0.0598	2.21±2.01	0.0386	1.61±3.89	0.0188
Sb	12.4±37.5	0.630	3.61±32.9	0.115	3.91±3.91	0.0684	4.2±6.72	0.0489
Ba	11.9±17.2	0.605	57.0±717	1.81	10.3±19.4	0.180	36.4±245	0.424
Hg	1.88±1.99	0.095	–	–	–	–	–	–
Pb	32.1±34.7	1.63	9.39±29.0	0.299	10.9±15.6	0.191	26.6±32.1	0.310
Ti	14.3±20.6	0.729	32.0±108	1.02	–	–	72.0±84.5	0.838

注:“–”表明未检出.

在夏季,呼和浩特市作为呼包鄂榆城市群的中心城市,较为发达的交通系统致使其 $PM_{2.5}$ 中 Cu 元素的含量(9.55ng/m^3)较高,是乌海市 $PM_{2.5}$ 中 Cu 元素含量(1.86ng/m^3)的 5.13 倍;在冬季,乌海市作为中国西北干旱区主要的煤炭工业城市之一,致使其 $PM_{2.5}$ 中 Pb(26.6ng/m^3)、As(4.84ng/m^3)、Se(1.49ng/m^3)等燃煤示踪物的含量较高,是呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 中 Pb(9.36ng/m^3)、As(3.23ng/m^3)、Se(0.6ng/m^3)含量总和的 2.50 倍.综上所述,城市功能和发展的差异性导致了两个城市 $PM_{2.5}$ 中各金属元素的含量分布的差异性.

2.3 大气 $PM_{2.5}$ 源解析

使用 EPA PMF5.0 软件对 2022 年乌海市和呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 成分进行来源解析.将各成分浓度数据和不确定性数据导入 PMF 模型进行 200 次运行,通过改变因子数(3~7 个因子),反复进行多次,选择 Q 值最小的运行.最后,根据每个因子的成分图谱,参照排放源指纹谱或标志物,结合研究区实际情况确定最优解.结果显示如下:

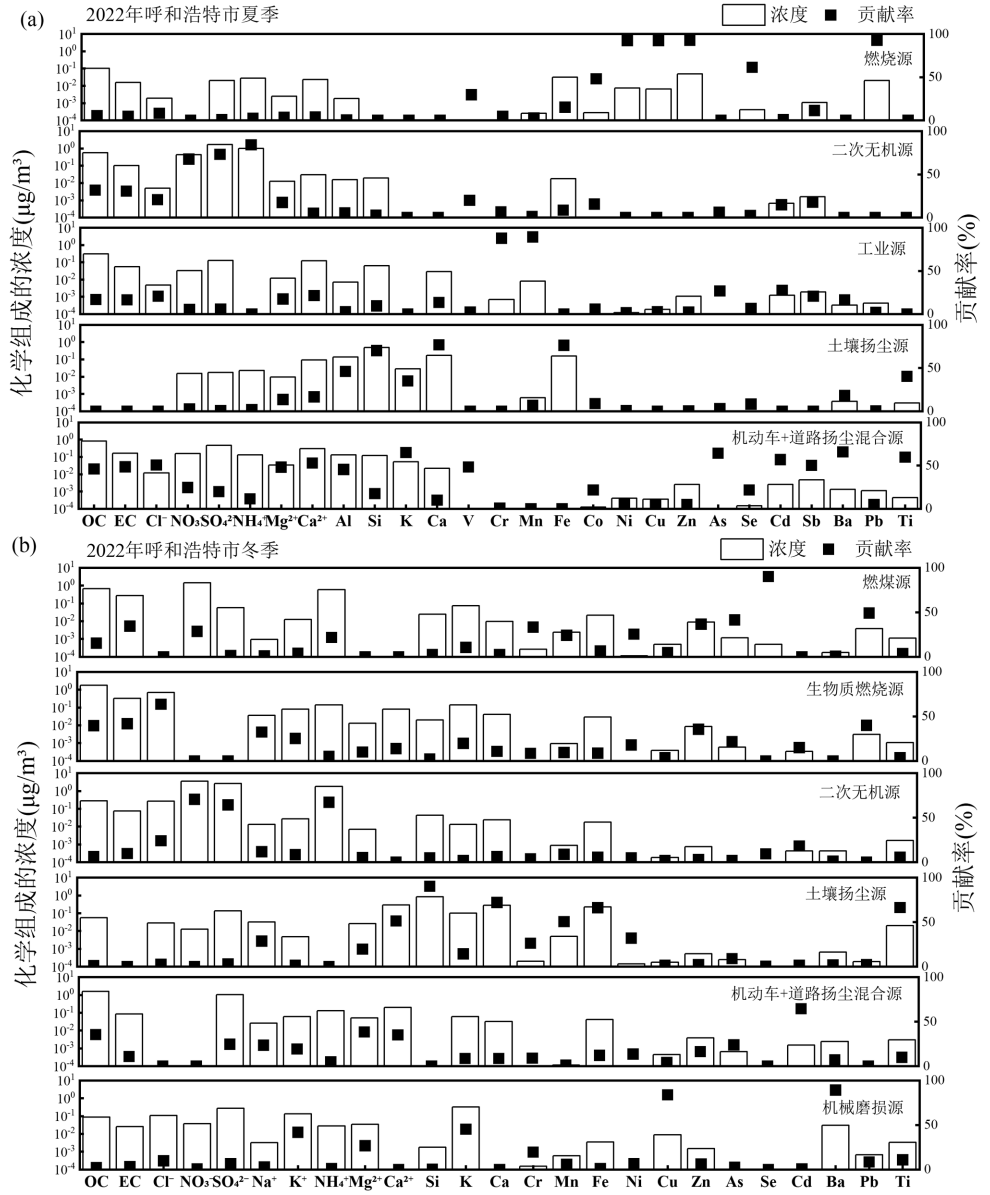
PMF 源解析结果表明,呼和浩特市夏季共解析出 5 个因子,其分别为:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源,冬季共解析出 6 个因子,其分别为:燃煤源、生物质燃烧源、二次无机源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源和机械磨损源.

呼和浩特市夏季 PMF 解析结果如图 7(a)所示,在因子 1 的谱图中,Zn、Se、Pb、Ni 占比较高,分别是 92.8%、61.5%、92.6%、92.4%.Zn 来自垃圾焚烧[38],Se、Pb 是燃煤中发现的典型微量元素[41],Ni 是残油燃烧的标志元素[42],因此推断因子 1 为燃烧源,该因子贡献率为 3.6%.在因子 2 的谱图中,NO_3^-、SO_4^{2-} 和 NH_4^+等离子占比较高,分别是 67.7%、73.2%、84.3%.它们主要来自 NO_x 和 SO_2 等气态前体物的二次转化[43],故因子 2 可识别为二次无机源,该因子贡献率为 45.7%.在因子 3 的谱图中,Cr、Mn 占比较高,分别是 87.9%、89.3%.其中 Cr、Mn 是钢铁冶炼工业排放的特征因素[44],故因子 3 定义为工业源,该因子贡献率为 9.03%.在因子 4 的谱图中,Al、Si、K、Ca、Fe、Ti 占比较高,分别是 46.1%、70.2%、35.0%、76.8%、76.2%、40.3%.Al、Ca 均是扬尘污染的重要特征元素[46],且 K、Fe、Si、Ti 均是地壳元素的指示剂[49],故因子 4 定义为土壤扬尘源,该因子贡献率为 13.1%.在因子 5 的谱图中,OC、EC、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Al、K、V、As、Cd、Sb、Ba、Ti 等占比较高,分别为 46.0%、48.5%、48.1%、52.8%、45.4%、65.0%、48.2%、64.3%、56.8%、50.1%、65.7%、59.7%.其中 V 主要来自汽车尾气及油类的燃烧[50],Sb 是汽车刹车片的成分且机动车尾气也会排放 Sb[50],Ba 可通过机动车的刹车片和轮胎磨损而排放到大气中[48],OC、EC 是机动车排放的标志[52],而 Al、K 是典型的地壳元素[53],Ca^{2+}是建筑扬尘的标志元素[54],Cd 多由于道路上机动车刹车磨损、轮胎磨损或者燃油中少量存在而存在于道路尘中[39],故因子 5 定义为机动车与道路扬尘混合源,该因子贡献率为 28.5%.

呼和浩特市冬季 PMF 解析结果如图 7(b)所示,在因子 1 的谱图中,EC、Zn、As、Se、Pb 占比较高,

分别为 34.4%、36.6%、41.4%、90.1%、49.1%.其中 As 和 Zn 主要源于煤炭燃烧[55],Se、Pb 是在煤燃烧中发现的典型微量元素[56],故因子 1 定义为燃煤源,该因子贡献率为 14.5%.在因子 2 的谱图中,OC、EC、Cl^-、K^+、Zn、Pb 占比较高,分别是 39.5%、41.7%、63.6%、25.2%、35.5%、39.6%.其中 Cl^-、K^+是生物质燃烧的标志元素,同时会排放出 OC[59],Zn 也是垃圾焚烧的标志组分[61],Pb 也来源于生物质燃烧[62],故因子 2 定义为生物质燃烧源,该因子贡献率为 15.4%.在因子 3 的谱图中,NO_3^-、SO_4^{2-}和 NH_4^+等离子占比较高,分别是 70.6%、64.4%、67.3%,故因子 3 定义为二次无机源,该因子贡献率为 40.5%.在因子 4 的谱图中,Ca^{2+}、Si、Ca、Mn、Fe、Ti 占比较高,分别 51.2%、90.3%、72.1%、50.6%、66.1%、66.4%.其中 Si、Ca、Mn、Fe、Ti 均为典型的地壳元素[54],故因子 4 定义为土壤扬尘源,该因子贡献率为 9.40%.在因子 5 的谱图中,OC、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cd 占比较高,分别为 35.6%、38.3%、35.0%、64.5%,故因子 5 定义为机动车与道路扬尘混合源,该因子贡献率为 15.1%.在因子 6 的谱图中,Cu、Ba 占比较高,分别为 83.8%、89.2%.其中 $PM_{2.5}$ 中的 Ba、Cu 可与制动器的机械磨损和轮胎磨损相关联[40],故因子 6 定义为机械磨损源,该因子贡献率为 5.06%.

乌海市夏季共解析出 6 个因子,其分别为: 燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车源、道路扬尘源,冬季共解析出 6 个因子,其分别为: 燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源和机械磨损源.



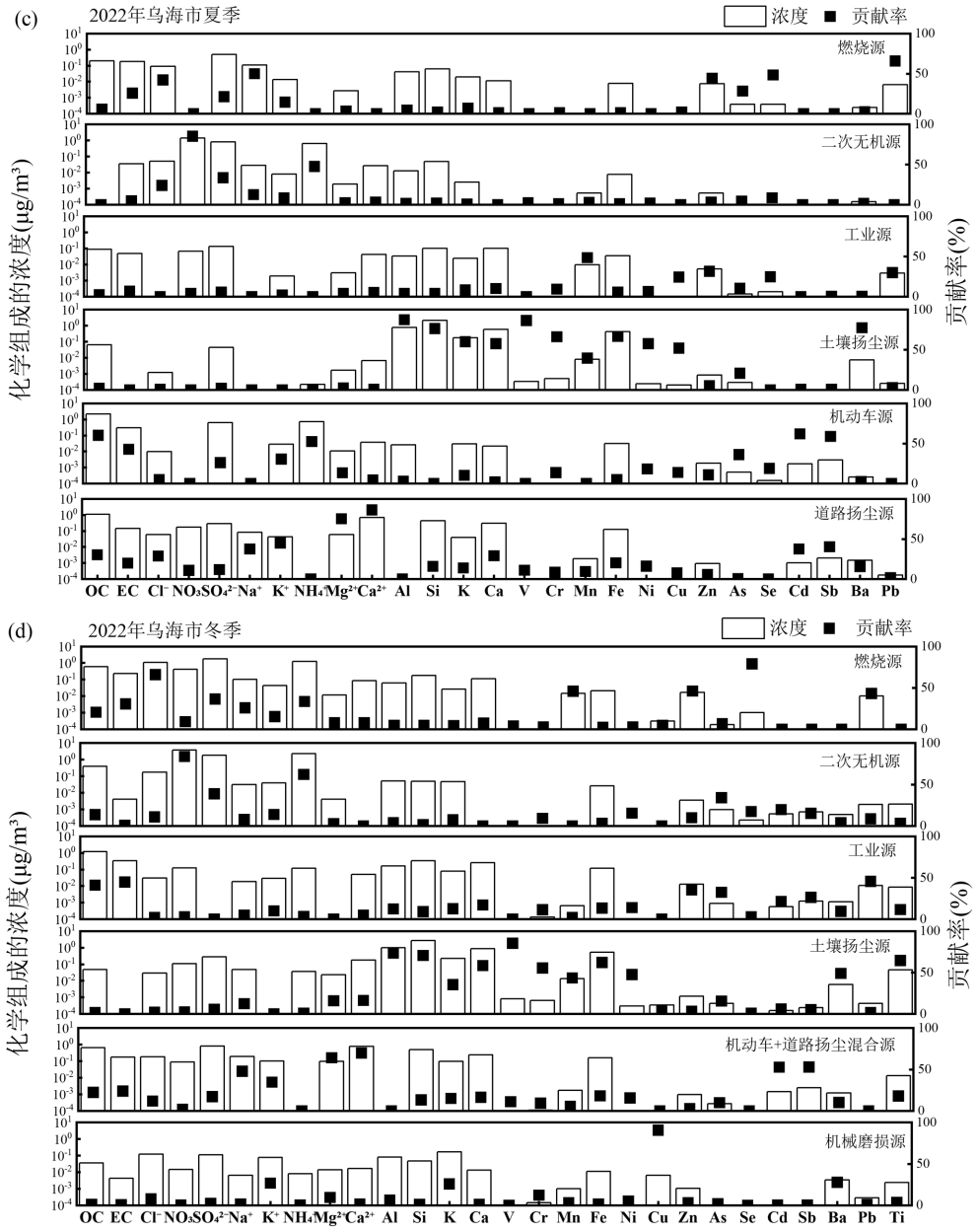
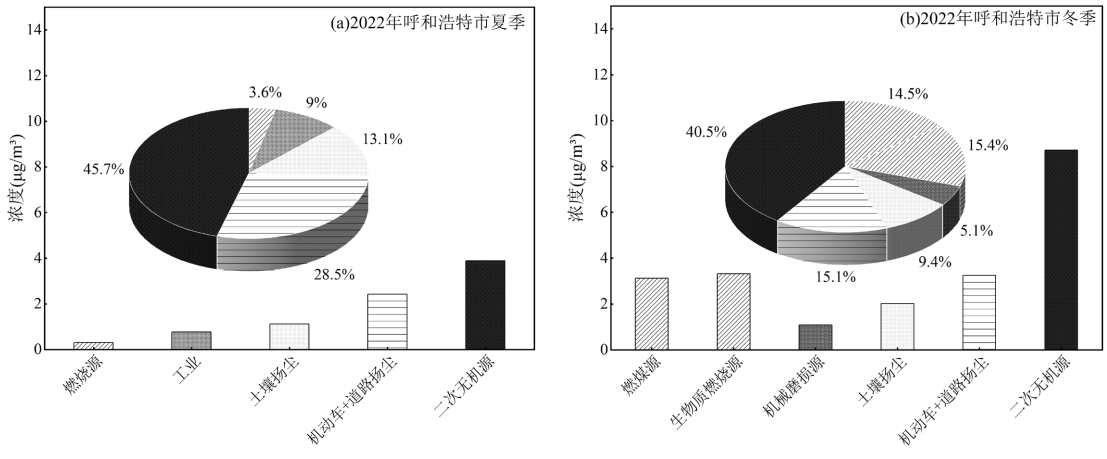


图 7 PMF 源解析结果

Fig.7 PMF source analysis results



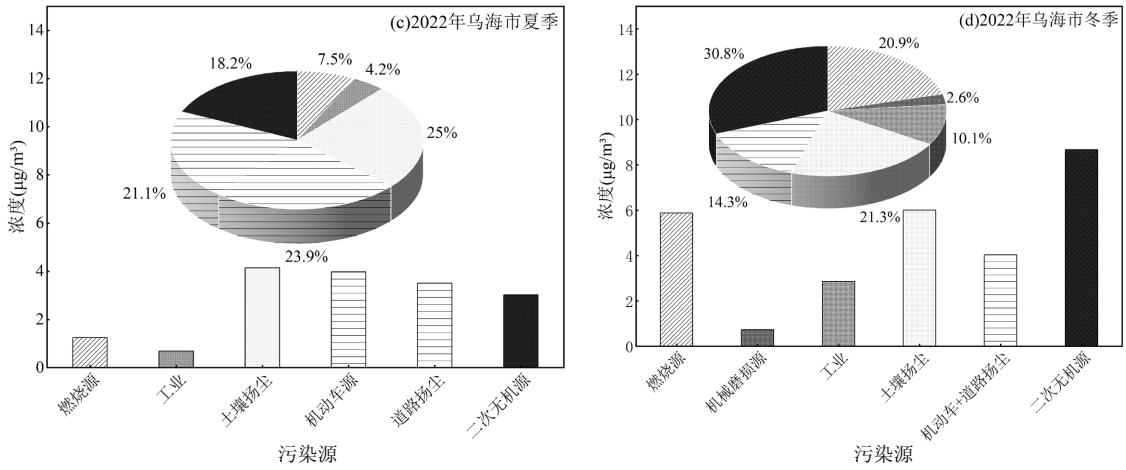


图 8　$PM_{2.5}$ 各污染源占比

Fig.8　Percentage of $PM_{2.5}$ by source

乌海市夏季 PMF 解析结果如图 7(c)所示,在因子 1 的谱图中,Cl^-、Zn、As、Se、Pb 占比较高,分别为 42.0%、44.1%、28.2%、48.2%、65.8%,故因子 1 定义为燃烧源,该因子贡献率为 7.53%.在因子 2 的谱图中,NO_3^-、SO_4^{2-}和 NH_4^+等二次无机离子占比较高,分别是 85.1%、33.5%、47.6%,故因子 2 定义为二次无机源,该因子贡献率为 18.2%.在因子 3 的谱图中,Mn、Cu、Zn、Se、Pb 占比较高,分别为 48.5%、24.3%、31.6%、24.6%、29.8%,故因子 3 定义为工业源,该因子贡献率为 4.16%.在因子 4 的谱图中,Al、Si、K、Ca、V、Cr、Fe、Ni、Cu、Ba 占比较高,分别为 87.4%、76.3%、59.9%、57.6%、86.4%、66.1%、66.6%、57.7%、51.9%、77.4%,占比均大于 50%,故因子 4 定义为土壤扬尘源,该因子贡献率为 25.0%.在因子 5 的谱图中,OC、EC、Cd、Sb 占比较高,分别为 60.1%、42.7%、62.0%、58.8%,故因子 5 定义为机动车源,该因子贡献率为 23.9%.在因子 6 的谱图中,Mg^{2+}、Ca^{2+}占比较高,分别为 75.1%、86.2%,故因子 6 定义为道路扬尘源,该因子贡献率为 21.1%.其判别依据同前文所述.

乌海市冬季 PMF 解析结果如图 7(d)所示,在因子 1 的谱图中,Cl^-、SO_4^{2-}、Mn、Zn、Se、Pb 占比较高,分别为 65.9%、36.3%、45.9%、46.0%、78.8%、42.9%,故因子 1 定义为燃烧源,该因子贡献率为 20.9%.在因子 2 的谱图中,NO_3^-、SO_4^{2-}和 NH_4^+等二次无机离子占比较高,分别是 83.6%、38.7%、62.1%,故因子 2 定义为二次无机源,该因子贡献率为 30.8%.在因子 3 的谱图中,Zn、As、Sb、Pb 占比较高,分别为 35.2%、32.4%、26.4%、45.6%,故因子 3 定义为工业源,该因子贡献率为 10.1%.在因子 4 的谱图中,Al、Si、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni 占比较高,分别为 73.2%、70.5%、35.3%、58.3%、85.2%、55.4%、43.5%、62.0%、47.6%,故因子 4 定义为土壤扬尘源,该因子贡献率为 21.3%.在因子 5 的谱图中,Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cd、Sb 占比较高,分别为 47.7%、64.0%、69.8%、52.7%、52.9%,故因子 5 定义为机动车与土壤扬尘混合源,该因子贡献率为 14.3%.在因子 6 的谱图中 Cu、Ba 占比较高,分别为 90.6%、27.7%,故因子 6 定义为机械磨损源,该因子贡献率为 2.60%.其判别依据同前文所述.

两个城市夏冬季各污染源占比情况如图 8 所示,各污染源占比发生明显差异.受城市功能和发展的影响,呼和浩特市夏冬季 $PM_{2.5}$ 以二次无机源污染为主,乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 以机动车与道路扬尘混合源为主,冬季以二次无机源为主,两市表现出明显的城市差异性.

2.4　区域传输分析

2.4.1　后向轨迹的聚类分析　呼和浩特市夏季有 4 条主要传输路径:轨迹 T1(38.22%)、T3(17.93%)均来自于西北方向,轨迹 T1 来源于蒙古国中部,途经包头市,轨迹占比最高;轨迹 T3 来源于哈萨克斯坦东北部,途经蒙古国西南部和包头市,气团轨迹最长,移动速度最快;轨迹 T2(10.91%)来源于内蒙古东北部,途经锡林郭勒盟和乌兰察布市,气团轨迹短,移动速度慢;轨迹 T4(32.93%)来源于山西省南部,途经陕西省北部和鄂尔多斯市,气团轨迹最短,移动速度最慢.与呼

和浩特市夏季相比,乌海市夏季整体上与呼和浩特市夏季气流轨迹相似,有 5 条主要传输路径:轨迹 T2、T4 来自西北方向,轨迹 T4(26.81%)占比最高,来源于新疆东部,途经阿拉善盟,轨迹 T3(25.54%)来源于陕西省南部,途经甘肃省东部和宁夏,轨迹 T2(19.34%)来源于哈萨克斯坦东部,经过远距离传输,到达新疆东部,与轨迹 T4 的传输路径相似,最后同时到达乌海市,但轨迹 T2 相对于轨迹 T4 而言,传输距离更长,速度更快,轨迹 T5(18.43%)来源于巴彦淖尔市、途经包头市和鄂尔多斯市,轨迹最短,移动速度最慢,轨迹 T1(9.87%)来源于俄罗斯南部,途经蒙古国中部和巴彦淖尔市.

与夏季不同的是,呼和浩特市和乌海市冬季气流均来自西北方向.其中呼和浩特市冬季轨迹 T1(40.42%)占比最高,来源于阿拉善盟,途经鄂尔多斯市,气团轨迹最短,移动速度最慢,轨迹 T2(38.70%)来源于哈萨克斯坦与俄罗斯交界处,途经蒙古国西南部、巴彦淖尔市和包头市,气团轨迹最长,移动速度最快,轨迹 T3(20.88%)来源于俄罗斯南部,途经蒙古国和包头市;乌海市冬季轨迹 T2(31.53%)来源于阿拉善盟,轨迹 T5(5.65%)、T4(38.84%)、T1(16.44%)分别从哈萨克斯坦西部、新疆北部、新疆西部,经过远距离传输,到达阿拉善盟时,与轨迹 T2 的传输路径相似,最后同时到达乌海市,轨迹 T2 长度最短,移动速度最慢,轨迹 T3(7.55%)来源于俄罗斯南部,途经蒙古国西南部,气流轨迹较长,移动速度较快.

综上所述,呼和浩特市夏季 $PM_{2.5}$ 输送主要受到来自山西省南部、陕西省北部以及蒙古国南部地区的气流影响,乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 输送主要受到来自新疆东部、阿拉善盟、陕西省南部以及巴彦淖尔市等地区的气流影响;呼和浩特市和乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输均受到来自阿拉善盟和境外蒙古国南部地区的气流影响,不同的是乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输还受到来自新疆北部地区的气流影响.冬季气流的输送距离明显较夏季要远,夏冬季气流均以短距离输送为主.

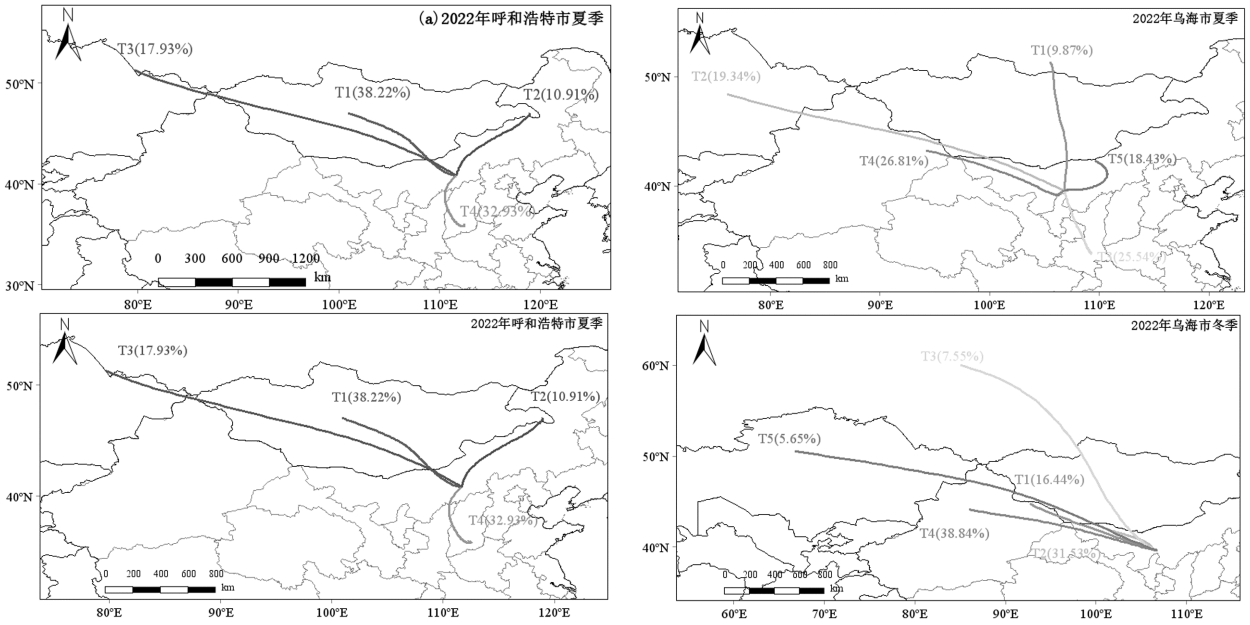


图 9 气团轨迹聚类分析

Fig.9 Cluster analysis of air mass trajectories

2.4.2 PSCF 和 CWT 对区域传输的贡献 对于大气中的颗粒物,除了本地排放外,区域运输是另一个主要贡献者.从图 10 中可以看出,PSCF 和 CWT 结果总体上一致,潜在金属污染源的区域与具有较高污染浓度的区域具有较高的均匀性.

从图 10 可以看出,呼和浩特市夏季 WPSCF 高值区(>0.5)主要分布在山西省太原市东南部、河北省石家庄市南部以及河南省郑州市北部地区,相对应的 WCWT 较高值区(>14μg/m^3)出现的区域与 WPSCF 高值出现的区域较为一致,但 WCWT 高值区更广;呼和浩特市冬季 WPSCF 高值区(>0.9)主要分布在陕西省北部、宁夏北部、甘肃省东部、新疆

哈密市、鄂尔多斯市、乌海市以及蒙古国西南部,相对应的 WCWT 较高值区(50μg/m^3<WCWT<70μg/m^3)主要分布在陕西省北部、甘肃省东部、新疆乌鲁木齐市、乌海市、包头市.

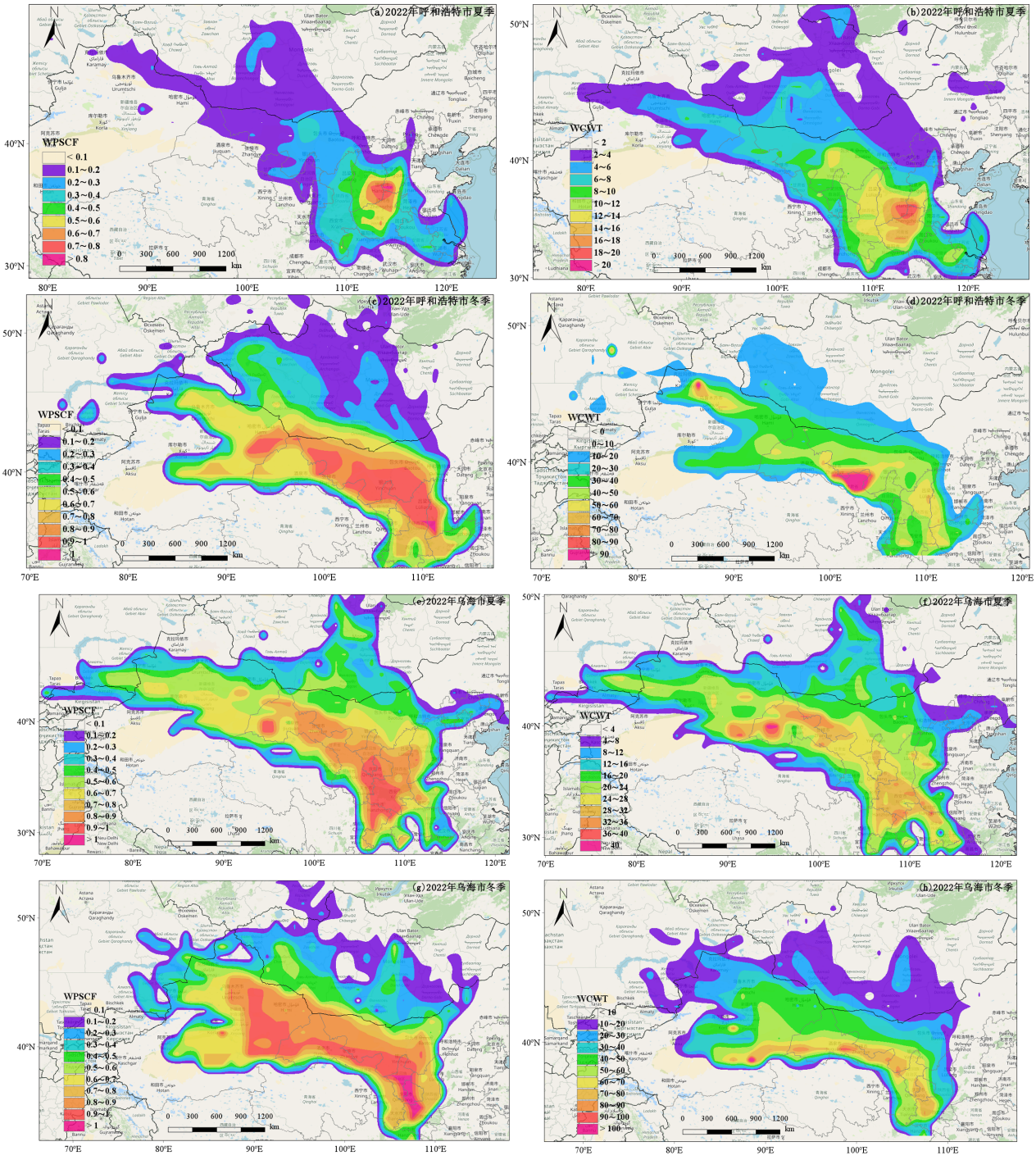


图 10　$PM_{2.5}$ 潜在污染源区分布

Fig.10　Distribution of potential $PM_{2.5}$ source areas

乌海市夏季 WPSCF 高值区(>0.7)主要分布在乌海本地、鄂尔多斯市、宁夏回族自治区中南部、陕西省南部、甘肃河西走廊地区以及新疆南部,相对应的 WCWT 高值区(>24μg/m^3)主要分布与 WPSCF 高值区一致;乌海市冬季 WPSCF 高值区(>0.8)主要分布在新疆东部、河西走廊地区、阿拉善盟、鄂尔多斯市、包头市、陕西省西安市、宁夏回族自治区以及乌海市本地,相对应的 WCWT 高值区(>60μg/

m^3)主要分布在河西走廊地区、陕西省西安市、宁夏回族自治区银川市、新疆东南部.

综上所述,夏季呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到山西省南部、河北省南部、河南省北部等地影响,而冬季呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到本地及包头、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、阿拉善盟东北部、蒙古国偏南区域影响.同时,呼和浩特市冬季的主要潜在源区较夏季相比,整体区域北移,更加受到本地源的影响;乌海市夏冬季 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到新疆东部、河西走廊地区、阿拉善盟、鄂尔多斯市、乌兰察布市、乌海市本地等地影响,冬季的 $PM_{2.5}$ 潜在源区较夏季相比,主要贡献源区范围变大.

3 结论

3.1 两个城市 $PM_{2.5}$ 浓度冬季>夏季,在夏冬两个季节乌海市 $PM_{2.5}$ 的浓度也明显高于呼和浩特市的浓度,可见乌海市受污染程度比呼和浩特市高.

3.2 从不同季节来看,$PM_{2.5}$ 在冬季和夏季偏碱性.从不同采样点来看,呼和浩特市夏季颗粒物碱性强于乌海市,相反在冬季碱性弱于乌海市.

3.3 两个城市夏冬季 $PM_{2.5}$ 中 NH_4^+以$(NH_4)_2SO_4$和NH_4NO_3的形式存在.呼和浩特市和乌海市 $PM_{2.5}$ 中 K^+、Cl^-、K、Mn、Cu、Ba、Ti 等含量在冬季大于夏季,说明两个城市冬季受生物质燃烧、燃煤排放和机动车尾气排放影响较大.在夏季,呼和浩特市较为发达的交通系统致使其 $PM_{2.5}$ 中 Cu 元素的含量(9.55ng/m^3)是乌海市 $PM_{2.5}$ 中 Cu 元素含量(1.86ng/m^3)的 5.13 倍;在冬季,乌海市作为典型的煤炭工业城市其 $PM_{2.5}$ 中 Pb、As、Se 等燃煤示踪物的含量总和(32.93ng/m^3)是呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 中 Pb、As、Se 含量总和(13.19ng/m^3)的 2.50 倍,表明城市功能和发展的差异性导致两个城市 $PM_{2.5}$ 中各金属元素的含量分布的差异性.

3.4 PMF 源解析结果显示,呼和浩特市夏季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源;呼和浩特市冬季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃煤源、生物质燃烧源、二次无机源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源和机械磨损源;乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车源、道路扬尘源;乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 主要来源有:燃烧源、二次无机源、工业源、土壤扬尘源、机动车与道路扬尘混合源和机械磨损源.呼和浩特市夏季和冬季均以二次源为主;乌海市夏季以机动车与道路扬尘混合源为主,冬季以二次源为主.

3.5 聚类分析结果表明,呼和浩特市夏季 $PM_{2.5}$ 输送主要受到来自山西省南部、陕西省北部以及蒙古国南部地区的气流影响,乌海市夏季 $PM_{2.5}$ 输送主要受到来自新疆东部、阿拉善盟、陕西省南部以及巴彦淖尔市等地区的气流影响;呼和浩特市和乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输均受到来自阿拉善盟和境外蒙古国南部地区的气流影响,不同的是乌海市冬季 $PM_{2.5}$ 传输还受到来自新疆北部地区的气流影响.冬季气流的输送距离明显较夏季要远,夏冬季气流均以短距离输送为主.

3.6 基于 PSCF 的 $PM_{2.5}$ 潜在源区以及基于 CWT 的 $PM_{2.5}$ 浓度权重分析结果基本一致.结果表明:夏季呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到山西省南部、河北省南部、河南省北部等地影响,而冬季呼和浩特市 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到本地及包头、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、阿拉善盟东北部、蒙古国偏南区域影响,呼和浩特市冬季的主要潜在源区较夏季相比,整体区域北移,更加受到本地源的影响;乌海市夏冬季 $PM_{2.5}$ 浓度主要受到新疆东部、河西走廊地区、阿拉善盟、鄂尔多斯市、乌兰察布市、乌海市本地等地影响,冬季的 $PM_{2.5}$ 潜在源区较夏季相比,主要贡献源区范围变大.

参考文献:

[1] Zhou H J, Lu C W, He J, et al. Stoichiometry of water-soluble ions in $PM_{2.5}$: Application in source apportionment for a typical industrial city in semi-arid region, Northwest China [J]. Atmospheric Research, 2018.

[2] 马英歌,杨 露,狄睿苗,等.周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2023,44(11):5986-5996.
Ma Y G, Yang L, Di R M, et al. Characteristics and causes of fine particulate matter pollution during heavy pollution episodes in winter 2022 in Zhoukou City [J]. Environmental Science, 2023,44(11): 5986-5996.

[3] 程宇飞,林 昊,米 敬,等.内蒙古黄河流域盟市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征 [J]. 环境与发展, 2022,34(5):55-59.
Cheng Y F, Lin H, Mi J, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ and O_3 pollution in leagues and cities within the Yellow River Basin of Inner Mongolia [J]. *Environment and Development*, 2022,34(5):55-59.

[4] 呼和浩特市第四次全国经济普查公报(第三号) [R].
Communiqué of Hohhot City on the fourth national economic census (No.3) [R].

[5] 周 闯.乌海及周边地区大气污染治理科技对策研究 [J]. 科学管理研究, 2017,35(2):70-72,99.

Zhou C. Research on scientific and technological countermeasures for air pollution control in Wuhai and surrounding areas [J]. Scientific Management Research, 2017,35(2):70−72,99.

[6] 李颜君,安兴琴,范广洲.北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析 [J]. 中国环境科学, 2019,39(3):915−927.
Li Y J, An X Q, Fan G Z. Transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019,39(3):915−927.

[7] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4modelling system for trajectories,dispersion,and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998,47(4):295−308.

[8] 胡　燕.武汉典型地区 $PM_{2.5}$ 的组成特征及来源研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
Hu Y. Composition characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in typical areas of Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[9] Uygur N, Karaca F, Alagha O. Prediction of sources of metal pollution in rainwater in Istanbul, Turkey using factor analysis and long−range transport models [J]. Atmospheric Research, 2010,95(1):55−64.

[10] Fleming Z L, Monks P S, Manning A J. Review: Untangling the influence of air−mass history in interpreting observed atmospheric composition [J]. Atmospheric Research, 2012,104−105(1):1−39.

[11] 郭　倩,汪嘉杨,周子航,等.成都市一次典型空气重污染过程特征及成因分析 [J]. 环境科学学报, 2018,38(2):629−639.
Guo Q, Wang J Y, Zhou Z H, et al. Characteristics and formation mechanism of a typical heavy air pollution episode in Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(2):629−639.

[12] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. Atmospheric Environment (1967), 1989,23(7): 1499−1509.

[13] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. Environmental Science & Technology, 2001,35(21):4214−4226.

[14] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(4):545−562.

[15] 余　创,陈　伟,张玉秀.西北干旱区乌海市 $PM_{2.5}$ 的输送路径及潜在源解析 [J]. 中国科学院大学学报, 2022,39(1):43−54.
Yu C, Chen W, Zhang Y X. Transport pathways and potential source contribution of $PM_{2.5}$ in Wuhai City, Northwest Arid Region of China [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(1):43−54.

[16] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS−based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long−term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009,24(8):938−939.

[17] GB 3095−2012　环境空气质量标准 [S].
GB 3095−2012　Ambient Air Quality Standards [S].

[18] 程　渊,刘保双,吴建会,等.菏泽市夏季 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子组分污染特征 [J]. 环境化学, 2019,38(4):729−737.
Cheng Y, Liu B S, Wu J H, et al. Pollution characteristics of water−soluble ionic components in PM_{10} and $PM_{2.5}$ during summer in Heze City [J]. Environmental Chemistry, 2019,38(4):729−737.

[19] 黄含含,王羽琴,李升苹,等.西安市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化特征 [J]. 环境科学, 2020,41(6):2528−2535.
Huang H H, Wang Y Q, Li S P, et al. Seasonal variation characteristics of water−soluble ions in $PM_{2.5}$ in Xi'an [J]. Environmental Science, 2020,41(6):2528−2535.

[20] 赵梦雪,吴　琳,方小珍,等.天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 [J]. 环境科学, 2016,37(11):4133−4141.
Zhao M X, Wu L, Fang X Z, et al. Analysis of water−soluble inorganic ions in atmospheric particulates from roadside environment in Tianjin [J]. Environmental Science, 2016,37(11): 4133−4141.

[21] 郭文帝,王开扬,郭晓方,等.太原市气溶胶中硫、氮转化特征 [J]. 环境化学, 2016,35(1):11−17.
Guo W D, Wang K Y, Guo X F, et al. Transformation characteristics of sulfur and nitrogen in aerosols of Taiyuan City [J]. Environmental Chemistry, 2016,35(1):11−17.

[22] 彭　超,张　丹,方维凯,等.重庆市不同粒径颗粒物中水溶性离子污染特征 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4529−4540.
Peng C, Zhang D, Fang W K, et al. Pollution characteristics of water−soluble ions in different particle size fractions in Chongqing [J]. China Environmental Science, 2021,41(10):4529−4540.

[23] 李欣悦,张凯山,武文琪,等.成都市城区大气细颗粒物水溶性离子污染特征 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):91−101.
Li X Y, Zhang K S, Wu W Q, et al. Pollution characteristics of water−soluble ions in atmospheric fine particulate matter in urban Chengdu [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):91−101.

[24] Kerminen V M, Hillamo R, Teinilä K, et al. Ion balances of size−resolved tropospheric aerosol samples: implications for the acidity and atmospheric processing of aerosols [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(31):5255−5265.

[25] Kang C M., Lee H S, Kang B W, et al. Chemical characteristics of acidic gas pollutants and $PM_{2.5}$ species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. Atmospheric Environment, 2004,38(28):4749–4760.

[26] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, et al. Organic aerosol and global climate modelling: A review [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2004,4(5):1053−1123.

[27] Li Y C, Yu J Z, Ho S S H, et al. Chemical characteristics of $PM_{2.5}$ and organic aerosol source analysis during cold front episodes in Hong Kong, China [J]. Atmospheric Research, 2012,118:41−51.

[28] Koelmans A A, Jonker M T O, Cornelissen G, et al. Black carbon: The reverse of its dark side [J]. Chemosphere, 2006,63(3):365−377.

[29] Chow J C, Watson J G, Lu Z, et al. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmospheric Environment, 1996,30(12):2079−2112.

[30] 卢登峰.福州地区大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 特征及来源解析 [J]. 福建分析测试, 2022,31(6):22−26.
Lu D F. Characteristics and source apportionment of OC and EC in atmospheric $PM_{2.5}$ in Fuzhou Region [J]. Fujian Analysis and Testing, 2022,31(6):22−26.

[31] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, et al. Measurement of emissions from air pollution sources. 4.C1−C27 organic compounds from cooking with seed oils [J]. Environmental Science and Technology, 2002,36(4):567−575.

[32] Chen Y, Zhi G, Feng Y, et al. Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw−coal combustion in China [J]. Geophysical Research Letters, 2006,33(20):382−385.

[33] Sandradewi J, Prévôt A S H, Weingartner E, et al. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi−wavelength Aethalometer [J]. Atmospheric Environment, 2007,42(1).

[34] 董　喆,袁明浩,苏方成,等.郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 [J]. 环境科学, 2021,42(5):2179−2189.
Dong Z, Yuan M H, Su F C, et al. Spatiotemporal variation of fine particulate matter and impacts of control measures in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2021,42(5):2179−2189.

[35] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(23):3527−3544.

[36] Schauer J J, Kleeman Michael J, Cass G r, et al. Measurement of emissions fromair pollution sources.4C1−C27 organic compounds from cooking with seed oils [J]. Environmental science & Technology, 2002,36(4):567.

[37] 张凯欢.喀什市沙尘天近地面 $PM_{2.5}$和 PM_{10}污染特征研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022.
Zhang K H. Ground−level $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution characteristics during dust events in Kashgar City [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.

[38] 陈 江,费 勇,马鑫雨,等.燃煤与垃圾焚烧飞灰中细颗粒物 $PM_{2.5}$的重金属元素风险评价 [J]. 中国粉体技术, 2016,22(2):104−107.
Chen J, Fei Y, Ma X Y, et al. Risk Assessment of heavy metal elements in $PM_{2.5}$ fine particulate matter from coal combustion and waste incineration fly ash [J]. China Powder Science and Technology, 2016,22(2):104−107.

[39] Chen Y, Schleicher N, Cen K, et al. Evaluation of impact factors on $PM_{2.5}$ based on long−term chemical components analyses in the megacity Beijing, China [J]. Chemosphere, 2016,155:234−242.

[40] Mckenzie E R, Money J E, Green P G, et al. Metals associated with stormwater−relevant brake and tire samples [J]. Science of the Total Environment, 2009,407(22):5855−5860.

[41] Liu S, Wu T, Wang Q, et al. High time−resolution source apportionment and health risk assessment for $PM_{2.5}$−bound elements at an industrial city in northwest China [J]. The Science of the total environment, 870:161907[2025−03−27].

[42] Begum B A, Kim E, Biswas S K, et al. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and semi−urban areas in Bangladesh [J]. Atmospheric Environment, 2004,38(19):3025−3038.

[43] 潘 超,张海鸥,刘婉萍,等.南京近郊农田区域大气颗粒物水溶性离子污染特征 [J]. 环境科学, 2025,46(2):727−735.
Pan C, Zhang H O, Liu W P, et al. Pollution characteristics of water−soluble ions in atmospheric particulate matter in Nanjing suburban farmland areas [J]. Environmental Science, 2025,46(2):727−735.

[44] 林炳丞,吴广龙,郑明辉,等.再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 [J]. 环境科学, 2023,44(3):1678−1685.
Lin B C, Wu G L, Zheng M H, et al. Emission characteristics and control of heavy metals during secondary copper smelting processes [J]. Environmental Science, 2023,44(3):1678−1685.

[45] Li X, Yan C, Wang C, et al. $PM_{2.5}$−bound elements in Hebei Province, China: Pollution levels, source apportionment and health risks [J]. Science of The Total Environment, 2022,806:150440.

[46] Viana M, Kuhlbusch T A J, Querol X, et al. Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results [J]. Journal of Aerosol Science, 2008,39(10):827−849.

[47] 陈培林,郭 蓉,王勤耕.“大气十条”实施期间南京市 $PM_{2.5}$化学组成与来源的演变特征 [J]. 环境科学, 2023,44(1):1−10.
Chen P L, Guo R, Wang Q G. Evolution characteristics of $PM_{2.5}$ chemical composition and sources in Nanjing during the implementation of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" [J]. Environmental Science, 2023,44(1):1−10.

[48] 古添发,闫润华,姚沛廷,等.深圳市大气中 $PM_{2.5}$载带金属污染特征及健康风险 [J]. 中国环境科学, 2023,43(1):88−95.
Gu T F, Yan R H, Yao P T, et al. Pollution characteristics and health risks of metal−bearing $PM_{2.5}$ in urban Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2023,43(1):88−95.

[49] 沈 劲,黄国锋,陈多宏,等.广东省 2020~2023 年细颗粒物化学组分特征及来源分析研究 [J]. 环境科学与技术, 2024,47(10):189−203.
Shen J, Huang G F, Chen D H, et al. Characteristics and source apportionment of fine particulate matter chemical composition in Guangdong Province (2020~2023) [J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(10):189−203.

[50] 梁春丽,龚山陵.郑州市金水区冬季大气 $PM_{2.5}$污染特征及来源解析 [J]. 环境保护科学, 2023,49(1):102−109,144.
Liang C L, Gong S L. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric $PM_{2.5}$ during winter in Jinshui District, Zhengzhou [J]. Environmental Protection Science, 2023,49(1):102−109,144.

[51] 程 凯,常运华,旷雅琼,等.上海市 $PM_{2.5}$中重金属元素对 COVID−19 控制的高频响应 [J]. 环境科学, 2021,42(8):3644−3651.
Cheng K, Chang Y H, Kuang Y Q, et al. High−frequency response of heavy metal elements in $PM_{2.5}$ to COVID−19 Control Measures in Shanghai [J]. Environmental Science, 2021,42(8):3644−3651.

[52] Mcculloch A, Aucott M L, Benkovitz C M, et al. Global emissions of hydrogen chloride and chloromethane from coal combustion, incineration and industrial activities: Reactive Chlorine Emissions Inventory [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1999, 104(D7):8391−8403.

[53] Morawska L, Zhang J J. Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures [J]. Chemosphere, 2002,49(9):1045−1058.

[54] Mazzei F, D'Alessandro A, Lucarelli F, et al. Characterization of particulate matter sources in an urban environment [J]. Science of the Total Environment, 2008,401(1−3):81−89.

[55] 杨 婧,郭晓爽,滕 曼,等.我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展 [J]. 环境化学, 2014,33(9):1514−1521.
Yang J, Guo X S, Teng M, et al. Research progress on pollution characteristics and source apportionment of metals in atmospheric Fine Particulate Matter in China [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(9):1514−1521.

[56] Li X, Wu J, Elser M, et al. Contributions of residential coal combustion to the air quality in Beijing– Tianjin–Hebei (BTH), China: A case study. [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018:10675–10691.

[57] Morawska L, Zhang J. Combustion sources of particles. 1.Health relevance and source signatures [J]. Chemosphere, 2002,49:1045–1058.

[58] Rai P, Furger M, Slowik J G, et al. Characteristics and sources ofhourly elements in PM_{10} and $PM_{2.5}$ during wintertime in Beijing [J]. Environmental Pollution, 2021,278,116865.

[59] Tian H, Wang Y, Xue Z, et al. Atmospheric emissions estimation of Hg, As, and Se from coal−fired power plants in China, 2007 [J]. Science of the Total Environment, 2011,409(16):3078–3081.

[60] Jöller M, Brunner T, Obernberger I. Modeling of aerosol formation during biomass combustion for various furnace and boiler types [J]. Fuel Processing Technology, 2007,88(11/12):1136−1147.

[61] 杨铁金,于海洋,何友江,等.2017~2018 年秋冬季唐山市 $PM_{2.5}$中元素组成特征及来源解析 [J]. 环境科学研究, 2020,33(9):2030−2039.
Yang T J, Yu H Y, He Y J, et al. Elemental composition characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Tangshan during autumn and winter of 2017~2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(9):2030−2039.

[62] Dall'Osto M X, Querol F, Amato A, et al. Hourly elemental concentrations in $PM_{2.5}$ aerosols sampled simultaneously at urban background and road site during SAPUSS–diurnal variations and PMF receptor modeling [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(8):4375−4392.

作者简介：王嘉敏(2000−),女,内蒙古鄂尔多斯人,内蒙古师范大学硕士研究生,主要从事大气颗粒物污染现状和源解析.发表文章 1 篇. 15894980346@163.com.