

山西省榆次区干沉降水溶性阴离子的化学特征

王亚梅, 任孝宗, 罗进洪, 赵岩松

(太原师范学院地理科学学院, 山西 晋中 030619)

摘要: 为了解山西省榆次区大气干沉降中水溶性阴离子的化学组成及时间变化特征, 采集榆次区 2022 年 4 月至 2023 年 3 月大气干沉降样品, 利用相关性分析及 HYSPLIT 后向轨迹模式探讨干沉降中水溶性离子的化学特征及来源。结果表明, 榆次区干沉降水溶性阴离子月平均浓度为 $846.158 \mu\text{g/g}$, 通量日平均值为 $589.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 季节变化为冬季>秋季>春季>夏季; $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 和 NO_2/SO_2 佐证了扬尘和燃煤对榆次区环境污染及离子浓度的贡献率; 干沉降阴离子的浓度变化受到降水及本地气团的影响。

关键词: 干沉降; 水溶性离子; 来源解析; 气象因素

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0172-08

近年来, 随着我国工业化和城市化的快速发展, 矿山的开采和冶炼、化石燃料的燃烧、汽车尾气和垃圾焚烧排放成为大气中污染物的主要来源。大气干沉降是颗粒和气态污染物从大气进入生态地表环境的主要途径^[1], 对北方地区特别是对干旱半干旱地区来说是最主要的沉降方式, 它对维持大气成分相对稳定起到非常重要的作用^[2]。干沉降也是地表、海洋、森林等生态系统中营养物质和有机污染物的重要来源^[3], 在全球化学循环中扮演着重要的角色^[4]。干沉降中水溶性离子的存在影响颗粒物的吸湿性和吸光度^[5], 有一定催化作用和毒性增强作用^[6]。因此, 研究干沉降中的水溶性离子有助于更好地了解的大气干沉降污染特征和环境效应。

近年研究表明, 我国许多城市的环境空气污染特征已由此前的以二氧化硫、氮氧化物类污染为主转化为以尘类污染为主, 污染物的首要来源和载体就是大气降尘^[7]。目前干沉降的研究区域大多集中在北京^[8-10]、南京^[11-12]以及东部沿海地区^[1, 13-15]。近年来才有一些学者基于干沉降理论对中西部地区重金属或气溶胶粒子的化学组成进行研究^[16-20]。重金属具有较强的毒性和生物累积性, 通过食物链进入生物体内对人类健康及生态系统有潜在危害, 且北方城市地区水溶性无机离子浓度普遍高于南方城市^[16], 进一步对干沉降来源进行解析^[3, 14, 21-23]

更是势在必行。Blifford 和 Meeker^[24]提出了大气颗粒物源解析概念, 随后美国研发了以因子分析(factor analysis, FA)和化学质量平衡(chemical mass balance, CMB)为主的各类受体模型源解析技术^[25]。目前国内水溶性离子源解析的方法主要有源排放清单法、扩散模型法以及受体模型法。受体模型法主要包括化学质量平衡法、因子分析法、富集因子法等, 其中因子分析法又主要包括正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)、主成分分析(principal component analysis, PCA)方法。更有研究表明城市环境中干沉降与湿沉降的通量以及浓度有较大差异^[26]。干沉降的化学组分与排放源、天气条件、化学离子输送和气团轨迹等多种因素都密切相关^[27-28]。通过研究大气干沉降中水溶性离子的变化, 分析不同污染源对大气降水化学组分的相对贡献, 有助于了解当地大气降水的污染状况和对生态系统的潜在影响。

干沉降作为国内外大气环境监测的重点内容之一, 其中的水溶性离子对植物、水质、土壤性质等产生重大影响^[23, 26, 29-30]。榆次区是山西省重要的产煤区, 近年来面临严重的空气污染问题^[31]。因此研究榆次区大气干沉降化学组分有重要意义。近年来有一些对榆次区周边大气干湿沉降的研究, 如太原市近 5 年干沉降中的水溶性离子浓度 SO_4^{2-} 、

收稿日期: 2023-08-04

基金项目: 山西省大学生创新创业训练项目(CXCY2205)

作者简介: 王亚梅(1999—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为资源评价与开发; 通信作者任孝宗(1983—), 男, 甘肃白银人, 副教授, 研究方向为水化学、水文地球化学; 罗进洪(1999—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为资源评价与开发; 赵岩松(2002—), 男, 山西运城人, 研究方向为自然地理与资源环境。

NO_3^- 最高,且夏季由于降雨较多,干沉降最少^[17]。以上研究局限于榆次区周边,但是对于榆次区大气干沉降的研究存在空缺。为明确榆次区污染源中水溶性离子组分以及其受到何种因素的影响,通过连续 12 个月采集与监测榆次区大气干沉降,明确干沉降水溶性离子的组成及其大气沉降通量的气象因素,以期减轻大气干沉降对人体水、土壤和大气的污染,为改善区域环境质量、实施生态环境治理等提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 区域与采样点

采样点位于山西省榆次区太原师范学院(图 1)。采样点周围大学聚集,所处位置地形平坦、无明显的局地排放源。采样设备放置在太原师范学院地理科学学院距地面大约为 1.2 m 高的顶楼上($37^\circ44'59''\text{N}$, $112^\circ42'21''\text{E}$)。山西省榆次区地处山西中部的太原盆地,当地气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,属温带大陆性干旱气候。



图 1 山西省榆次区位置

1.2 样品采集

采用替代面法收集干沉降样品,样品收集在直径 150 mm、容积 5 L 的聚乙烯桶内。采样时间自 2022 年 4 月至 2023 年 3 月,采样周期为 15 d。为保证准确反映周降尘情况,考虑到降雨对降尘清除的影响,若当天为雨天则收集的样品不做统计,去除因仪器和其他原因导致的错误样品,共得到有效样品 53 个。与此同时采样期间记录榆次区地面气象观测数据,包括温度、风速和降雨量等。

1.3 样品测定和分析

1.3.1 样品前处理

干沉降样品采样前,用去离子水将采样桶的桶底及内壁清洗干净晾干。样品送回实验室后,用不锈钢镊子将落入缸内的树叶、昆虫等异物取出,将样品用 0.22 μm 或 0.45 μm 的滤膜过滤,采样滤膜

用电子天平称重,按照干沉降样品处理并保存。滤液用 500 mL 去离子水冲洗定容,取一部分样品现场测定 pH 和电导率;过滤后的样品装在干燥清洁的聚乙烯瓶中,储藏在 4 $^\circ\text{C}$ 以下的冰箱内待测定,并于 1 个月内采用盛瀚生产的 CIC-D160 型离子色谱仪完成离子测定分析常见的几种水溶性离子 F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 。

1.3.2 水溶性离子分析

采用 CIC-D160 型离子色谱仪对所有前处理后的滤膜样品进行水溶性离子分析,进样体积为 1 μL ,流速为 1.1 mL/min,其分离原理为基于离子交换树脂上可离解的离子与流动相中具有相同电荷的溶质离子之间进行的可逆交换和分析物溶质对交换剂亲和力的差别而被分离。进行样品分析前,取已知浓度和成分的标准样品溶液经过数据处理系统分别生成阴阳离子校正曲线,阴离子标准溶液浓度梯度为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mg/L,相关系数为 0.999。将分析后的样品数据处理系统导入阴阳离子校正曲线,计算后得到样品的最终浓度。

1.3.3 pH 和电导率分析

干沉降样品的 pH 和电导率用意大利 HANNA 哈纳 HI98195 高精度便携式多参数水质综合快速测定仪,每次使用之前,分别用 pH 为 4.00、6.86、9.18 的校正缓冲液进行标定。

1.3.4 数据分析

运用 Origin Pro 2020 以及 MATLAB R2022a 对水溶性离子化学组分特征数据进行分析并作图,运用软件 SPSS 22.0 对离子进行相关性分析,利用 HYSPLIT 后向轨迹模式对离子的主要来源进行分析。

2 结果与分析

2.1 电导率、pH 及离子组成

所有干沉降样品中,干沉降样品的 pH 范围为 4.5~7.5,所有干沉降样品中有 66% 的干沉降 pH 保持在 6.0~6.5(图 2),干沉降样品 pH 平均值为 6.2,干沉降偏中性,表明榆次区大气颗粒物中含有大量的碱性物质。

电导率可判断干沉降中所含电解质的多少,能够在一定程度上反映出干沉降水溶性离子的污染程度(图 3)。研究期间在收集的 53 个有效干沉降样品中,水溶性阴离子电导率范围为 19~169 $\mu\text{S}/\text{cm}$,干沉降水溶性阴离子的日平均浓度最大为 2 606.817 $\mu\text{g}/\text{g}$,所得样品电导率与干沉降水溶性阴离子溶度的相关系数为 0.82,相关性良好,说明干沉降电导率主要是由于沉降中水溶性离子组分贡献。

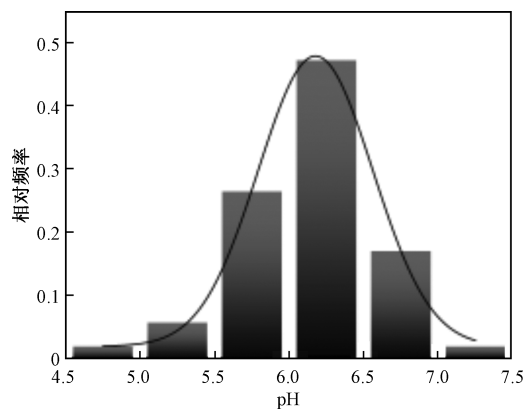


图2 干沉降 pH 频次分布

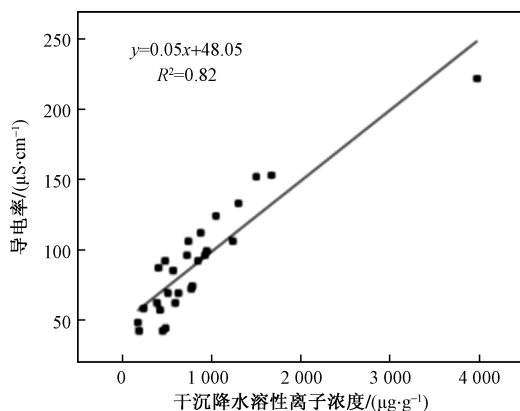


图3 干沉降总浓度与电导率的相关性

2.2 干沉降水溶性离子浓度的时间变化特征

研究期间榆次区干沉降水溶性阴离子总浓度为 22 902.31 $\mu\text{g/g}$ (表 1), 干沉降总阴离子浓度月平均值为 846.158 $\mu\text{g/g}$, 其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是最主要的两种离子, 日平均浓度分别为 553.918 $\mu\text{g/g}$ 和 175.493 $\mu\text{g/g}$, 分别占总阴离子浓度的 65% 和 20% (图 4); 其次是 Cl^- 和 F^- , 日平均浓度分别为 65.467 $\mu\text{g/g}$ 和 25.367 $\mu\text{g/g}$, 分别占总阴离子浓度的 7% 和 2%; 含量最少的是 Br^- 、 PO_4^{3-} , 由于当地这两种干沉降水溶性离子中含量很少甚至几乎没有所以不做统计。研究期间榆次区夏秋季节阴离子总浓度由高到低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^- > \text{Br}^- > \text{PO}_4^{3-}$ 。榆次区干沉降主要阴离子中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 所占的比例较高, 这一结论与榆次区湿沉降和 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子的组成研究结果相似^[31]。由于榆次区是以煤为主的能源结构和产业组成, 大量的能源消耗导致大气中 SO_2 和 NO_2 浓度较高, 从而导致空气颗粒物中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等二次离子比例很高。

采样期间主要阴离子浓度随着时间变化的趋势如图 5^[32] 所示, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的浓度最高值均发生在

表1 干沉降中阴离子浓度

离子组成	浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	最大值	最小值	平均值	中位数
F^-	288.295	0	25.367	8.874
Cl^-	271.791	7.661	65.467	4 729.000
NO_2^-	315.467	0	27.988	16.954
NO_3^-	631.250	0	175.493	150.623
SO_4^{2-}	3 050.833	34.474	553.918	394.504

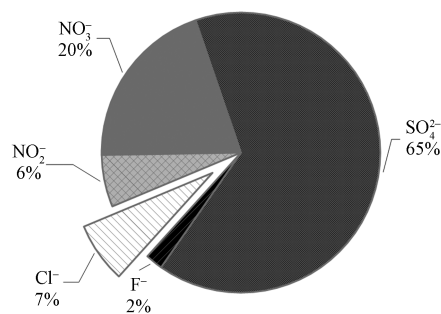


图4 榆次区干沉降水溶性离子占比

冬季和秋季, Cl^- 和 F^- 的浓度最高值出现在夏季。造成多种离子和总离子沉降浓度最高值均发生在秋冬的一个原因可能与污染物排放和秋季的低风速(2.31 m/s)有关, 低风速降低了二次起尘对样品的影响, 采样期间秋季的平均风速远低于春季平均风速。低风速不利于污染物的扩散, 使更多水溶性离子组分在颗粒物中富集并随着干沉降到达地面, 另一个原因可能与采样时间和气态前体物 SO_2 和 NO_2 的浓度有关。另外夏季的 SO_2 和 NO_2 的浓度明显低于秋季, 秋季较高浓度的 SO_2 和 NO_2 为干沉降水溶性离子中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 生成提供了重要的前提条件, 10 月是榆次区温度逐渐下降的时间, 煤炭的消耗量较之前有明显的增大, 空气中的 SO_2 浓度也呈逐步上升的趋势。而 Cl^- 和 F^- 的浓度季节规律与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 正好相反, 呈现夏季 > 秋季的趋势, 但是 Cl^- 和 F^- 这两种离子在夏秋季节的浓度变化不大而且浓度很低, 仅占榆次区夏秋季节干沉降水溶性阴离子总浓度的 7% 和 2%。这说明工业源并不是榆次区干沉降水溶性离子浓度的主要来源, 这也和采样地附近是大学城, 政府关停附近重污染企业的社会现状相符合。

2.3 干沉降水溶性离子通量

研究期间干沉降水溶性离子通量变化趋势如图 6 所示。可知, 干沉降水溶性离子通量的变化范围是 343.66~1 707.33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均值为 589.7 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。采样期间最大值出现在 2022 年 7 月和 2023 年 4 月, 分别为 1 707.33 $\mu\text{mol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)和 $1\,031.67\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,最小值出现在 2023 年 2 月,水溶性离子通量只有 $343.656\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。从季节变化来看,表现为夏季 $[831.81\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]>$ 春季 $[628.28\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]>$ 秋季 $[492.26\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]>$ 冬季 $[366.42\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 。榆次区的干沉降中 SO_4^{2-} 通量远远大于 NO_3^- ,说明榆次区的干沉降类型主要为硫酸型沉降为主。榆次区周围其他城市太原市干沉降中的硫氮沉降通量较高^[33],榆次区的沉降也受到周围城市的影响。沉降在全球物质循环和迁移中扮演着重要的角色,干沉降中污染物水平会随着人类活动的增强和大气污染的严重情况而变化,所以控制周围城市对榆次区大气环境的污染具有重要的意义。

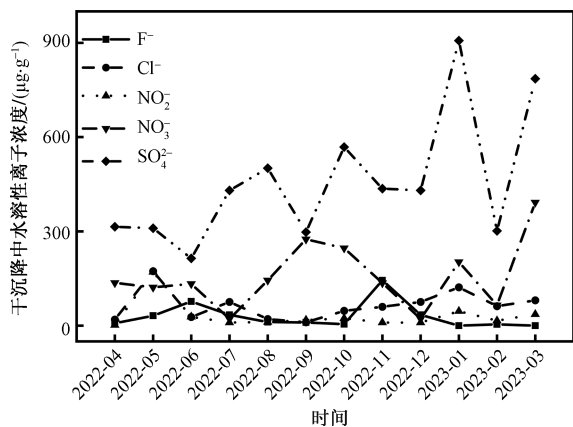


图 5 榆次区干降水溶性离子的浓度

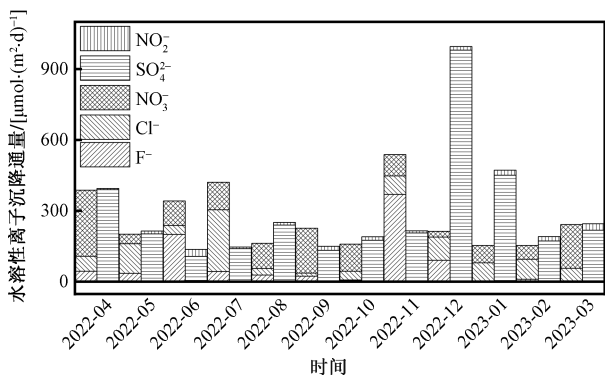


图 6 榆次区干降水溶性离子通量的月变化

3 讨论

3.1 干降水溶性离子相关性分析和来源分析

为研究榆次区干沉降中水溶性离子的来源与存在形式,采用 SPSS 软件对水溶性离子进行相关性分析,各离子的相关系数矩阵见表 2,各阴离子浓度之间的关系可以用两两相关分析的方法来探讨。 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度表现出显著的相关性,相关系数分

别为 0.628,二次离子主要来源于机动车尾气、燃烧过程产生的 NO_x 或 SO_x 等前体物与颗粒物在大气中的反应,二者的来源分别是气态前体物 SO_2 和 NO_2 ,这是因为二者排放方式和在大气中的传播途径相似;同时 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的相关系数为 0.769,表明干沉降中水溶性离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 有相同的排放源, SO_4^{2-} 多来源于煤炭燃烧和工矿企业的排放,说明干沉降中的 Cl^- 一部分也是来源于煤炭燃烧和工矿企业的排放,说明了干降水溶性离子中 Cl^- 来源的多样性。

表 2 干沉降中主要阴离子浓度间的相关系数矩阵

离子	Cl^-	F^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Cl^-	1			
F^-	0.456**	1		
NO_3^-	0.271**	0.112	1	
SO_4^{2-}	0.769**	0.235**	0.628**	1

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

$\text{PM}_{2.5}$ 以二次组分为主,如硫酸盐、硝酸盐、铵盐、二次有机气溶胶, PM_{10} 中含有丰富的地壳成分,因此通过 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比可以对二次组分在颗粒物中的贡献进行梳理(表 3), $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比越低,扬尘也就是大颗粒物对大气污染的贡献就越大。采样期间 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 各个月份比值分别为 0.837、0.734、0.496、0.559、0.822、0.639、0.678、0.629、0.232、0.308、0.392、0.361,榆次区夏季 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比明显大于秋季,二次生成对颗粒物的贡献在秋季更高。

$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 可以解释燃煤对环境污染的贡献率,因此常用大气颗粒物中这两种离子的浓度比是否大于 1 来判断某一区域是以移动排放源(如汽车尾气)污染还是以固定排放源(燃煤)污染为主, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 大于 1 以移动源为主, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 小于 1 则主要贡献来自固定源^[34-35]。榆次区夏秋季节 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 质量浓度比值范围为 0.014~1.403,年均值为 0.249,表明榆次区固定源(燃煤)对大气干降水溶性离子的贡献大于移动排放源(机动车)。研究期间夏秋季 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值明显较低(图 7),原因一方面可能是夏季高温容易使颗粒相中的硝酸盐分解挥发至气相中,从而使颗粒相中的浓度急剧降低(表 3),另一方面,夏秋季高温、高湿和强辐射条件有利于 SO_4^{2-} 生成。因此,榆次区当地在冬春季节应加强 SO_2 排放的管理,以作为大气治理强化措施。

表 3 采样期间各月污染物浓度平均值

时间	浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)						PM _{2.5} /PM ₁₀
	空气质量指数(AQI)	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	
2022-04	74.983	61.283	73.200	3.808	18.858	8.817	0.837
2022-05	74.829	43.034	58.642	3.006	9.727	3.769	0.734
2022-06	141.242	36.258	73.067	3.292	17.117	4.392	0.496
2022-07	96.835	38.101	68.058	3.549	10.374	5.079	0.559
2022-08	71.755	56.412	68.612	3.686	18.546	7.327	0.822
2022-09	76.308	38.717	60.550	5.492	17.750	2.603	0.639
2022-10	62.171	37.304	55.008	9.775	29.297	1.332	0.678
2022-11	86.467	59.075	93.958	11.242	38.808	0.783	0.629
2022-12	80.121	23.893	102.645	11.252	36.609	0.487	0.232
2023-01	88.264	37.354	121.302	18.030	43.268	0.717	0.308
2023-02	85.155	35.902	91.668	16.458	37.786	0.662	0.392
2023-03	101.069	49.040	135.978	13.816	31.428	0.567	0.361

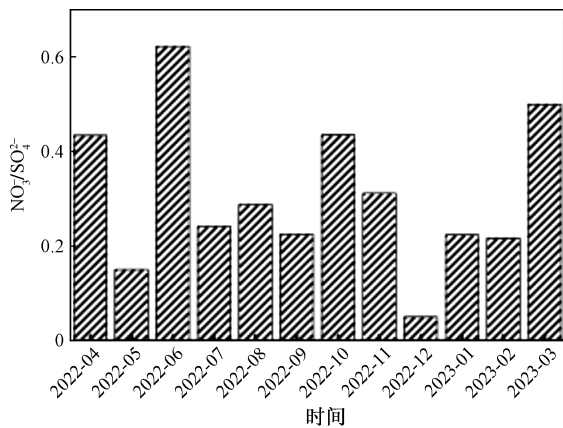


图 7 榆次区 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的月平均变化特征

3.2 后向轨迹聚类分析

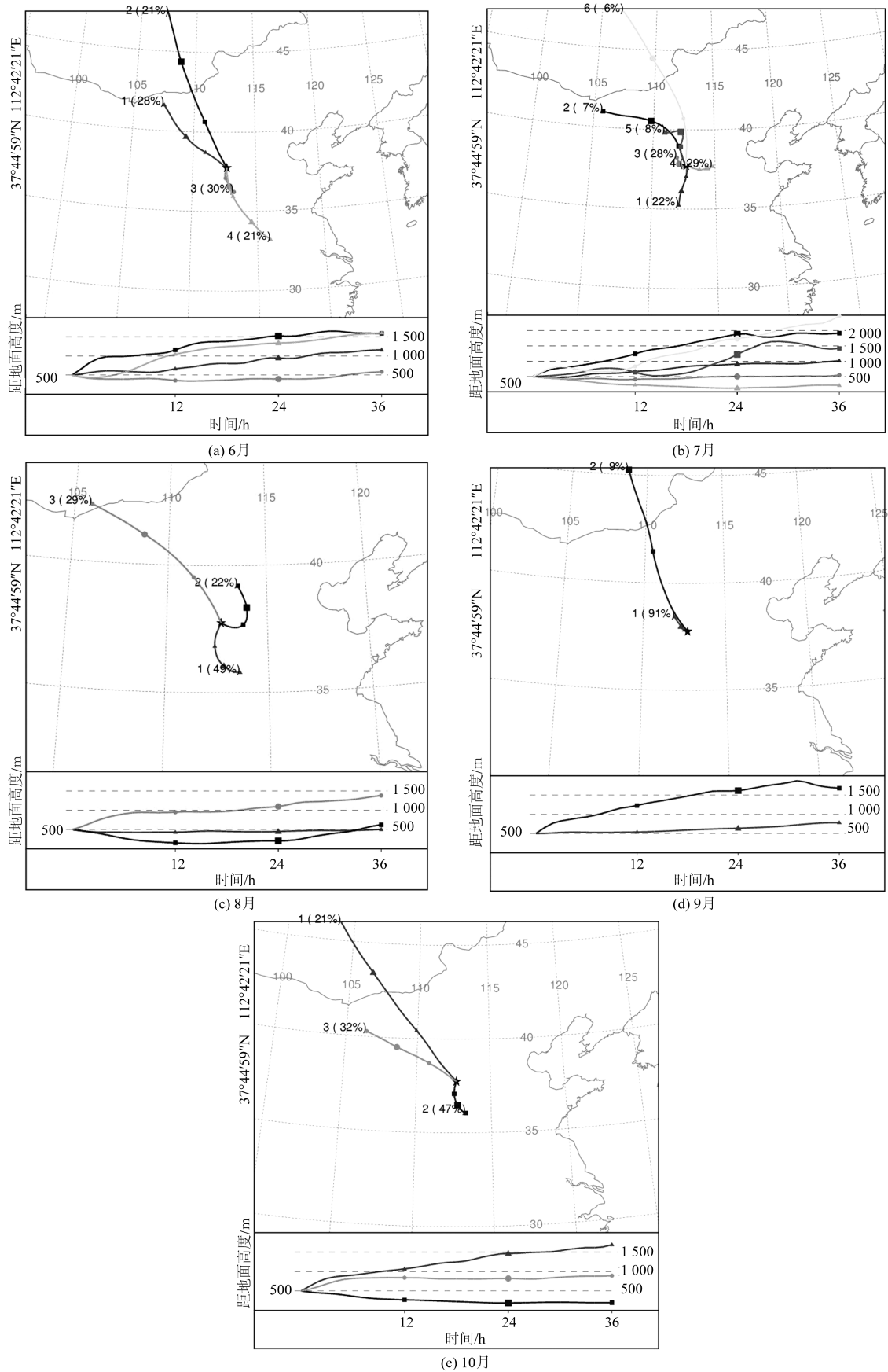
由于大气结构的不稳定性,大气污染不仅与城市的本地排放有关,还与周边地区存在着相互影响和输送关系。为探究气团输送对大气干沉降的影响,应用后向轨迹模型 HYSPLIT^[5,36-37] 进行分析。气象条件(如风向、风速和降雨等)随季节的变化对干沉降化学组成的时间变化特征具有重要影响。后向轨迹主要输入参数:轨迹的起点设为观测点所在地太原师范学院地理科学学院顶楼,考虑到大气干沉降主要对大气边界层的近地层及下垫面的影响较大,因此起始模拟高度选取 500 m。分别对榆次 6 月到 10 月每月降尘日进行 36 h 后向轨迹计算,并将计算结果进行聚类分析,各月后向轨迹分布如图 8 所示。可根据气团轨迹的长短判断气团移动的速度,长的轨迹说明对应气团移动速度快,短的轨迹表明对应气团移动速度较慢。榆次区 6 月气团源自西伯利亚大陆性北方气团和榆次区当地的气团,7 月气团来自榆次当地东部(29%)和南部气团(22%),8 月气团主要为山西南部气团(45%)和

西伯利亚大陆性北方气团(29%),9 月气团只有西伯利亚大陆性北方气团(91%),10 月气团来自为内蒙古地区的北方气团和西伯利亚大陆性北方气团。可以看出本地气团、北方气团是影响榆次区夏秋季节的干沉降的主要气团。

用后向轨迹图结合前文干沉降离子的时间变化特征,分析气团对干沉降的影响。6 月气团大部分为 500 m 以上的气团,离子浓度受近地面气团污染影响较小,离子浓度较低;7 月受山西南部本地气团的影响,但 7 月降水较多,干沉降的收集受到限制,故离子浓度较低;8 月主要受山西南部气团的影响,但是所收集沉降的地区大学聚集且大学生为假期时间,当地生产生活停滞,离子浓度达到最低值;9 月受来自西北大陆性气团的影响 SO₄²⁻、NO₃⁻ 等离子元素明显增加,且气团经过太原并将太原市工业生产的污染物带到榆次,使得离子浓度急剧上升;10 月的本地气团(47%)移动缓慢且利于污染物的累积,此时大学生开学,交通及人流量快速增多,故离子浓度达到了夏秋季的最高值。因此可以看出,榆次地区夏秋季节的干沉降水溶性离子量主要受本地气团输送的影响,本地气团是造成离子浓度升高的主要气团,说明干沉降受本地污染的影响较大,具有局地性。

3.3 干沉降水溶性离子影响因素分析

已有研究结果表明,大气干沉降与风向、风速、风沙扬尘天气日数、降水量、日照时数、气温、相对湿度等气象要素有关。将干沉降水溶性阴离子浓度按月变化与中国环境监测总站发布的对应月的降雨以及大气污染物指标相结合^[38]如图 9 所示,图中降雨频率较高月份的离子浓度明显低于降雨频率较低的月份,降雨之后离子浓度较降雨之前有减少趋势,可以看到降雨当月的大气污染物 SO₂、NO₂



数字表示气团数目;括号内为气团占比

图8 夏秋季节各月气团后向轨迹

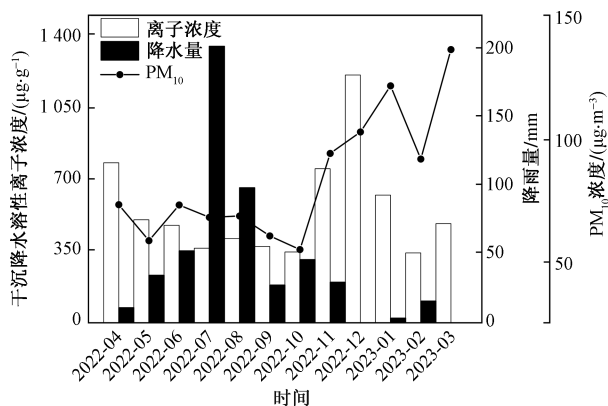


图9 各月干沉降离子浓度与气象要素的关系

的浓度比未下雨月低,说明降雨对大气颗粒污染物有明显清除作用,有利于空气质量的改善。9月、10月干沉降水溶性离子浓度随着 $PM_{2.5}$ 浓度的增加而升高,可能跟这段时间降雨少风速低为静稳天气有关,静稳天气条件下大气中颗粒物主要是通过干沉降去除,因此随着大气颗粒物的增加干沉降离子浓度增加。

4 结论

采集了榆次区2022年4月至2023年3月53个有效大气干沉降样品,并分析其中的水溶性无机阴离子组成及变化特征,探究了干沉降中水溶性阴离子的来源及影响因素,得到以下结论。

(1)榆次区研究期间干沉降样品平均pH为6.2,偏中性;水溶性阴离子月平均浓度为 $846.158 \mu\text{g/g}$;阴离子平均浓度由高到低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^- > \text{NO}_2^- > \text{Br}^- > \text{PO}_4^{3-}$; SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是榆次区干沉降主导的水溶性阴离子,月平均浓度分别为 553.918 、 $172.493 \mu\text{g/g}$,所呈现的水平季节变化的趋势为冬季>秋季>春季>夏季。

(2)榆次区 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的浓度最高值均发生在秋季,而 Cl^- 和 F^- 的浓度最高值出现在夏季。造成多种离子和总离子浓度在不同方法下最高值均发生在秋季的重要原因可能与污染物排放和秋季的低风速以及燃煤有关。

(3)榆次区干沉降浓度变化受温度湿度等气象条件和各类污染物共同作用的影响,降雨对大气颗粒污染物有明显清除作用,静态天气条件下大气中颗粒物主要是通过干沉降去除。通过对 $PM_{2.5}$ / PM_{10} 以及 NO_2 / SO_2 的统计,干沉降中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 主要受到燃煤排放的影响,当然扬尘也有巨大贡献。

(4)利用HYSPLIT后向轨迹进行聚类分析后发现,6月气团源自西伯利亚大陆性北方气团和榆

次区当地的气团,7月气团来自榆次当地东部(29%)和南部气团(22%),8月气团主要是为山西南部气团(45%)和西伯利亚大陆性北方气团(29%),9月气团只有西伯利亚大陆性北方气团(91%)。本地气团、北方气团是影响榆次区夏秋季节的干沉降的主要气团,说明干沉降阴离子受本地污染的影响较大,具有局地性。

参考文献

- [1] 胡冠钊, 乔少博, 王驹, 等. 广州市南沙区高新沙水库大气干湿沉降重金属含量、沉降通量特征分析及其对水库水质的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(10): 120-128.
- [2] 邢建伟, 宋金明, 袁华茂, 等. 胶州湾生源要素的大气沉降及其生态效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 353-366.
- [3] 丛岭, 周士钧, 刘莹, 等. 林水复合生态系统干湿沉降离子组成及来源分析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 231-239.
- [4] 王开扬, 郭文帝, 闫雨龙, 等. 太原市干沉降中水溶性离子特征[J]. 环境化学, 2016, 35(7): 1354-1360.
- [5] 任娇, 尹诗杰, 郭淑芬. 太原市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3120-3130.
- [6] WANG G, WANG H, YU Y, et al. Chemical characterization of water-soluble components of PM_{10} and $PM_{2.5}$ atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(21): 2893-2902.
- [7] 姜文倩, 朱潇, 沈健林, 等. 大气沉降向华中丘陵区稻田输入硫通量的观测[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4848-4856.
- [8] 周健楠. 北京市不同粒径颗粒物水溶性组分污染现状及成因研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- [9] 施云云, 杨欧, 杨巧文, 等. 北京典型城区冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子特征[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(2): 219-231.
- [10] 郭忻跃. 北京大气干沉降及 $PM_{2.5}$ 中重金属和有机物污染及来源研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [11] 张毓秀. 南京北郊大气活性氮干沉降特征[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [12] 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 等. 南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2025-2033.
- [13] 杨一超, 薛金林, 任景玲, 等. 夏季南海气溶胶微量元素浓度、溶解度及干沉降通量[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2365-2374.
- [14] 沈傲, 周慧娟, 樊琦, 等. 珠江三角洲地区冬季硫、氮干沉降的来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5142-5151.
- [15] 靳浩, 张佳颖, 张传红, 等. 江苏省大气颗粒物及其重金属干沉降通量研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(4): 100-108.
- [16] 郑利荣. 吕梁市大气颗粒物中水溶性无机离子的分布特

- 征及来源解析[D]. 太原:太原理工大学, 2020.
- [17] 宋志辉, 刘平, 梁亚宇, 等. 太原市五年降尘及降水中主要离子特征[J]. 地球与环境, 2021, 49(4): 381-388.
- [18] 王恬爽, 牛笑应, 文惠, 等. 兰州地区大气污染的化学组成及来源解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(11): 351-360.
- [19] 李新琪, 徐涛, 谷超, 等. 伊犁河谷春季颗粒物中水溶性离子污染特征分析[J]. 中国测试, 2022, 48(10): 135-144.
- [20] 马艳, 肖红伟, 黄莉磊, 等. 2021年春季中国西北沙尘暴期间PM_{2.5}水溶性离子特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, 41(10): 3299-3309.
- [21] 张国忠, 黄威, 潘月鹏, 等. 河北典型农田大气重金属干沉降通量及来源解析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1245-1254.
- [22] 李逗, 王艳, 刘汝海, 等. 青岛TSP中水溶性离子的时间变化、来源解析和环境效应[J/OL]. 环境工程, 1-11 [2023-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20230712.2041.006.html>.
- [23] 王小剑, 张海霞, 蔡昂祖, 等. 邯郸市大气氮干湿沉降特征研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 104-111.
- [24] BLIFFORD I H, MEEKER G O. A factor analysis model of large scale pollution[J]. Atmospheric Environment, 1967, 1(2): 147-157.
- [25] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM_{2.5}源解析方法的比较与评述[J]. 科学通报, 2015, 60(2): 109-121.
- [26] OMRANI M, RUBAN V, RUBAN G, et al. Assessment of atmospheric trace metal deposition in urban environments using direct and indirect measurement methodology and contributions from wet and dry depositions[J]. Atmospheric Environment, 2017, 168: 101-111.
- [27] 夏冬冬. 气象要素对彰武县大气降尘变化的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 127-132.
- [28] ZHANG Z, CUI Y, HE Q, et al. Predominant effects of emission reduction by recording 8-year water-soluble ions in precipitation in Taiyuan, North China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(11): 1922-1932.
- [29] 周东, 黄智浦, 李思敏, 等. 西安市大气降水的主要化学组分及其来源[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3142-3151.
- [30] 宋泽峰, 张君伍, 陆智平, 等. 大气干湿沉降对河北平原农田面源污染的贡献[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 93-98.
- [31] 李雪梅, 牟玲, 田妹, 等. 山西大学城PM_{2.5}中元素特征、来源及健康风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4825-4831.
- [32] 刘永强, 于泓. 离子色谱法在离子液体阴阳离子分析中的应用[J]. 分析测试学报, 2015, 34(6): 734-743.
- [33] 王开扬. 太原市干湿沉降中水溶性离子特征研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
- [34] 蔡敏, 严明良, 包云轩. 苏州市大气PM_{2.5}中水溶性无机离子的源解析及其气象因子分析[J]. 气象科学, 2018, 38(5): 648-658.
- [35] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4044-4053.
- [36] DARIA B P, MALGORZATA W, MACIEJ K, et al. Application of the HYSPLIT model for birch pollen modelling in Poland[J]. Aerobiologia, 2022, 38(6): 103-121.
- [37] 马红璐, 赵欣, 陆建刚, 等. 宿迁市PM_{2.5}中水溶性无机离子的季节特征和来源分析[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 3899-3907.
- [38] 任孝宗. 水化学图形表达方法、MATLAB实现及在天然水体中的应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2021.

The Chemical Characteristics of Dry Deposition Water-soluble Ions in Yuci District, Shanxi Province

WANG Yamei, REN Xiaozong, LUO Jinhong, ZHAO Yansong

(School of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: In order to understand the chemical composition and temporal variation characteristics of water-soluble anions in atmospheric dry deposition in Yuci District, Shanxi Province, atmospheric dry deposition samples from April 2022 to March 2023 in Yuci District were collected. The chemical characteristics and sources of water-soluble ions in dry deposition were discussed by correlation analysis and HYSPLIT backward trajectory model. The results show that the monthly average concentration of water-soluble anions in dry deposition in Yuci District is 846.158 $\mu\text{g/g}$, the daily average flux is 589.7 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and the seasonal variation is winter > autumn > spring > summer. PM_{2.5}/PM₁₀ and NO₂/SO₂ support the contribution rate of fugitive dust and coal combustion to environmental pollution and ion concentration in Yuci District, and the concentration change of dry deposition anion is affected by precipitation and local air mass.

Keywords: dry deposition; water soluble ions; source analysis; meteorological factors