

新疆盐尘颗粒的迁移及其对城市大气颗粒物的贡献

张渊钰¹, 丁翔², 阿布力克木·阿不力孜¹, 迪丽努尔·塔力甫^{1*}, 张潇潇¹, 王威¹, 王新明² (1.新疆大学, 煤炭清洁转化与化工过程自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 对2017年9月至2018年8月、12月采集的乌鲁木齐市PM_{2.5}、“沙雪”样品和克拉玛依土样的水溶性离子进行分析,并结合城市主要风向、扫描电镜联谱(SEM/EDS)和后向轨迹模型(HYSPLIT),对环境中盐尘粒子的来源及其对大气颗粒物形成的影响进行了研究.结果表明:PM_{2.5}中总水溶性离子平均浓度为(62.65±64.75) μg/m³,变化范围为0.69~328.60 μg/m³.其中SO₄²⁻、Ca²⁺、Na⁺、Cl⁻、K⁺和Mg²⁺ 6种盐尘粒子浓度分别为(22.73±26.45), (2.11±3.11), (1.85±1.43), (0.40±0.40), (0.28±0.20), (0.21±0.15) μg/m³.四季风向结合HYSPLIT模型结果可知,PM_{2.5}中盐尘粒子主要来源于艾比湖及玛纳斯盐湖的气团;受风沙影响,乌鲁木齐市雪样中Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺和Na⁺分别增加了30,19,20,5,7和5倍.

关键词: 水溶性离子; 盐尘粒子; HYSPLIT模型; SEM/EDS分析; 乌鲁木齐市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1066-08

Migration of salt dust particles and its contribution to urban atmospheric particulate matter in Xinjiang. ZHANG Yuan-yu¹, DING Xiang², ABULIKEMU·Abulizi¹, DILINUER·Talip^{1*}, ZHANG Xiao-xiao¹, WANG wei¹, WANG Xin-ming² (1.Key Laboratory of Coal Clean Conversion and Chemical Engineering Process, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi, 830046, China; 2.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1066~1073

Abstract: In this study, the PM_{2.5} (Sep. 2017 to Aug. 2018) and snow samples (Dec. 2018) were collected in Urumqi as well as the soil samples in Karamay. By comparing the compositions of these samples, we attributed the origins of salt dust particles over urban Urumqi and investigated the potential impact of salt dust particles on urban air. The results showed that the mean concentration of total water-soluble ions (WSIs) in PM_{2.5} was 62.65±64.75 μg/m³ with the range of 0.69 to 328.60 μg/m³. The concentrations of typical salt dust ions were 22.73±26.45 μg/m³, 2.11±3.11 μg/m³, 1.85±1.43 μg/m³, 0.40±0.40 μg/m³, 0.28±0.20 μg/m³ and 0.21±0.15 μg/m³ for SO₄²⁻, Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻, K⁺ and Mg²⁺, respectively. The salt dust particles over urban Urumqi were mainly originated of the Lake Ebinur and Manas Salt Lake. Due to the influence of sandstorms, the concentrations of Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, and Na⁺ in the "sand snow" samples were higher than those in the ordinary snow samples by factors of 30, 19, 20, 5, 7, and 5, respectively.

Key words: water-soluble ions; salt dust particles; HYSPLIT model; SEM/EDS analysis; Urumqi

盐尘暴^[1]是指大风将干涸湖底富盐沉积物及其邻近强盐渍化土壤刮起,将其中的盐尘粒子及污染物进行远距离输送的干旱和半干旱地区典型的大气现象^[2].盐尘暴在尘源、化学组分、粒径大小、循环过程及危害程度方面显著区别于一般沙尘暴^[1,3].盐尘暴含有密度高、粒径小的硫酸盐和氯化物等盐碱粉尘,能够导致土壤耕地盐渍化,严重危害干旱区生态环境安全与经济发展^[1,4]. Cahill 等^[5]的研究表明,欧文斯(干)湖中盐尘的产生是沙尘在盐湖上的运动以及风将沙尘表面颗粒的粉碎过程; Houser 等^[6]研究发现地壳结构特征、盐尘颗粒磨损率等是影响盐尘颗粒迁移速率的重要因素; Reynolds 等^[7]通过对干涸湖底水盐运动的分析得出,盐尘的产生还受地下水位、降雨量和蒸发量波动的影响.即区域大气

环境中盐尘离子的浓度在一定程度上受其周边地质环境的影响.

我国由东向西降水少,干旱程度增加;位于准噶尔盆地西南部的艾比湖、吐鲁番盆地的艾丁湖等^[8-9]湖泊面积逐渐缩小暴露出干涸地段,使西北地区成为我国重要的盐尘源区.据《中国1:100万土地资源图》和《中国盐湖志》^[4,10]记录,新疆盐湖面积约占全国盐湖总面积的30%.新疆地区微弱降水无法完全溶解盐渍土中积累的盐分,土壤常年积盐.因此,了解新疆地区盐尘颗粒迁移及其对城市大气环境的

收稿日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41967050);有机地球化学国家重点实验室开放基金(SKLOG-201915)

* 责任作者, 教授, dilnurt@xju.edu.cn

影响显得尤为必要。

1 方法

1.1 采样点与方法

PM_{2.5} 采样点位于乌鲁木齐市天山区胜利路 666 号(新疆大学本部)9 号楼楼顶(43°45'43"N, 87°36'43"E),距地面高度约 20m,距城市主车道 500m,后临家属院,前 200m 范围为绿化带,周围没有工厂等污染源.可以排除汽车尾气及道路尘的干扰,能够代表典型的生活区空气质量.从 2017 年 9 月至 2018 年 8 月使用大流量采样器(TH-1000,武汉天虹,1.05m³/min)从每月初开始连续 7 天采集 PM_{2.5} 样品,每次连续采 22 个小时,并保证每季度采集一次样品空白.采样前石英纤维膜(203mm×254mm、英国 Whatman 公司)在 450℃焙烧 4h,恒温恒湿称重后铝箔纸包好,于密封袋冷冻保存.采样后样品膜同样恒温恒湿称重,在-20℃保存直到分析,具体方法见文献[11].采样同时记录气态污染物和相关气象数据(<https://www.aqistudy.cn/>).全年分析的有效样品共 80 个,其中 2017 年 9、10、11 月为秋季样品(19 个),2017 年 12 月、2018 年 1、2 月为冬季样品(21 个),2018 年 3、4 和 5 月为春季样品(20 个),6、7 及 8 月为夏季样品(20 个).

在此采样点的东南西北方向于 2018 年 12 月 1 日采集了“沙雪”前后中层、底层雪样并分别进行合并编号,中层为 12 月 1 日当天的沙雪样,底层为沙雪之前的本地雪样.采集的雪样进行自然溶化、过滤,分析清液的水溶性离子及固体颗粒的理化特性.

沙尘样品是取自克拉玛依区西南方向世纪大道 600 号录井公司附近(45°32'18" N,84°49'32" E)的表层土.

1.2 水溶性离子分析

用标准的切膜刀(面积 5.06cm²)取 PM_{2.5} 样品,置于预先用超纯水清洗并烘干的离心管称重,记 m₁,再加超纯水到 15g 左右,此时的质量记 m₂.将溶有样品的离心管置于放入冰袋的超声仪超声 20min,在这过程中超声仪中液体温度不超过 10℃.超声后放在离心机离心 10min(转速为 11000r/min).离心结束后用 5mL 的针筒(去掉针头)取上清液,经过滤头过滤,放入专用的样品管中,上述过程重复两次.使用 883Basic IC plus 对样品中的水溶性离子进行分析^[11].

1.3 颗粒相的物理特征分析

颗粒相的形貌和微观结构用场发射扫描电子显微镜(美国 Fei 公司,NovaNanoSEM230)测得.用能谱(EDX)分析样品中的元素比例、空间分布.其工作电压设置为 15kV,工作距离约为 5mm.测试前,须将样品粉体均匀分散在酒精溶液中,超声分散后用毛细管滴到干净的铜片上.

1.4 其他数据来源

研究期间气象监测数据(风速和风向等)来自 Reliable Prognosis 网站(<https://rp5.ru/>乌鲁木齐市天气)和国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/article/getLeft/id/279/keyIndex/7.html>);新疆地图来源于标准地图服务网(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html>);新疆地区盐湖的相关数据来自新疆维吾尔自治区自然资源厅(<http://zrzyt.xinjiang.gov.cn/>).

1.5 质量控制和质量保证

(1) 膜称重前天平要预热达到充分平衡,保证称重时恒温恒湿,多次称量求平均值,按国标 HJ618—2011《环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的测定重量法》^[12]中±0.05mg 的要求执行.

(2) 在测定样品的同时用相同方法测定空白膜并做实验空白;测定样品前,要对注射器针筒、过滤头、移液枪枪头及样品管进行抽检,检测其中的本底离子含量;在水溶性离子提取过程中,保证回收率在 85%~110%之间.

(3) 实验过程中所涉离子 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Na⁺、F⁻、PO₄⁻、Cl⁻、K⁺和 Mg²⁺的检测限分别为 0.018029, 0.031961, 0.013734, 0.041202, 0.013734, 0.025815, 0.136440, 0.022127, 0.045686, 0.017030mg/L.

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节分布

采样期间水溶性离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Na⁺、F⁻、PO₄⁻、Cl⁻、K⁺和 Mg²⁺)的平均总质量浓度为(62.65±64.75) μg/m³,变化范围为 0.69~328.60μg/m³.其中 1~3 月的质量浓度为(122.07±84.77) μg/m³,比赵克蕾等^[13]2013 年 1~3 月在乌鲁木齐市观测到的值(53.47±23.76μg/m³)偏高,但是总水溶性离子浓度低于 2015 年梁琼等^[14]在乌鲁木齐市观测的结果(86.91±13.85μg/m³).采样期间总水溶性离子占 PM_{2.5}

质量浓度比例分别为:冬季(76.45%)>春季(51.63%)>秋季(21.84%)>夏季(7.36%),年均占比为41%。杨浩^[15]在2009年分析乌鲁木齐市头屯河区雷达站、新市区卫星站等站点总悬浮颗粒物(TSP)样品时发现各站离子浓度有明显的季节变化特征,离子平均浓度表现为冬季>春季>秋季>夏季,对平均离子浓度贡献最大的为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 。对乌鲁木齐 $\text{PM}_{2.5}$ 单颗粒的形貌及矿物组成特征的研究表明^[14,16], $\text{PM}_{2.5}$ 主要含有硅铝酸盐、硅铝飞灰、铁氧

化物颗粒、硫酸/碳酸盐晶体等,并强调夏季受季风影响,扬尘增多,地壳源可能是夏季污染物的主要来源之一。本研究中各离子平均浓度的大小顺序为: SO_4^{2-} (22.73 ± 26.45) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > NO_3^- (20.39 ± 24.42) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > NH_4^+ (13.77 ± 16.25) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > Ca^{2+} (2.11 ± 3.11) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > Na^+ (1.85 ± 1.43) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > F^- (0.57 ± 0.61) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > PO_4^{3-} (0.33 ± 0.24) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > Cl^- (0.40 ± 0.40) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > K^+ (0.28 ± 0.20) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > Mg^{2+} (0.21 ± 0.15) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而研究表明部分 SO_4^{2-} 及 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 和 Mg^{2+} 来源于盐尘^[1-3,17]。

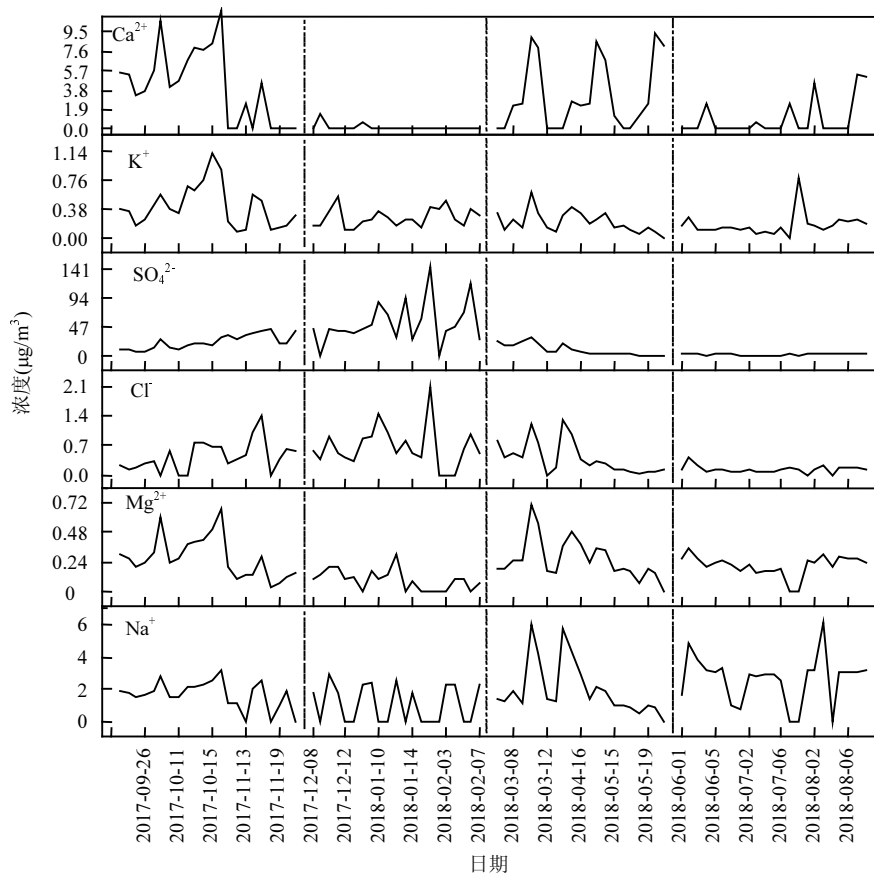


图1 乌鲁木齐大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中盐尘离子浓度变化趋势

Fig.1 Concentration variations of salt dust ions in $\text{PM}_{2.5}$ over Urumqi

由图1可见, Cl^- 与 SO_4^{2-} 在冬季及春季浓度呈增加趋势。据分析 Cl^- 主要来源于海洋气溶胶的远距离输送^[13,18]及化石燃料的燃烧和工业生产^[19],但乌鲁木齐市属于内陆城市,不受海盐粒子的影响,而盐湖离子迁移过程中主要以氯化物盐尘为主^[3];之前的研究表明, SO_4^{2-} 主要来源于煤和石油等的燃烧^[13,20],但Jilili等^[21]认为,在盐湖离子迁移过程硫酸盐的迁移能力高于氯化物,并影响距离较远的城市。所以盐湖中硫酸盐成分可能随气团运行迁移到乌鲁木齐市上空。结合离子相关性分析(表1), SO_4^{2-} 与 Cl^- ($R^2=$

$0.71, P<0.01$)显著相关,可能来自同源; Mg^{2+} 与 Na^+ ($R^2=0.66, P<0.01$)和 Ca^{2+} ($R^2=0.66, P<0.01$)呈较强的正相关性,又因 Mg^{2+} 和 Na^+ 来自土壤扬尘及海洋源^[18],而 Ca^{2+} 来自土壤风沙尘^[22],所以认为 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 大部分来源于土壤扬尘;而 K^+ 与 Mg^{2+} ($R^2=0.50, P<0.01$)、 Ca^{2+} ($R^2=0.49, P<0.01$)及 Cl^- ($R^2=0.38, P<0.01$)均呈正相关关系,说明具有相似的来源; K^+ 在冬季的变化趋势与春季相似,秋季有升高的趋势。有研究表明, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 及 Mg^{2+} 可能来自于城市易散性粉尘或者远源输入的粉尘^[23-24]。可以认

为,这些水溶性离子是春、秋两季盐(沙)尘对 $PM_{2.5}$ 的贡献。

表 1 盐尘离子相关性分析

Table 1 Correlation analysis among salt dust ions

离子	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
Na^+	1					
K^+	0.19	1				
Mg^{2+}	0.66**	0.50**	1			
Ca^{2+}	0.22*	0.49**	0.66**	1		
Cl^-	0.06	0.38**	0.08	0.01	1	
SO_4^{2-}	-0.31**	0.25*	-0.29**	-0.18	0.71**	1

注:**:在0.01水平(双侧)上显著相关。*:在0.05水平(双侧)上显著相关。

2.2 盐(沙)尘离子对 $PM_{2.5}$ 贡献的分析

研究表明,一般风力条件下,10 μm 以下的颗粒在大气中能被输送几千公里^[25]。新疆地区干涸盐湖众多,是重要的盐尘源区。由图 2 可以看出,乌鲁木齐市四季主要以西北风与东南风为主。而新疆的艾比湖(79°53'~85°02'E,43°38'~45°52'N,石盐矿)和玛纳斯盐湖(84°58'~86°24'E,43°26'~45°20'N,石盐矿)就位于乌鲁木齐市的西北方向,达坂城盐湖(88°03'53"~88°12'15"E,43°21'00"~43°25'25"N,石盐矿)和艾丁湖(42°28' N,89°12'E,石盐矿)即位于市区的东南方。

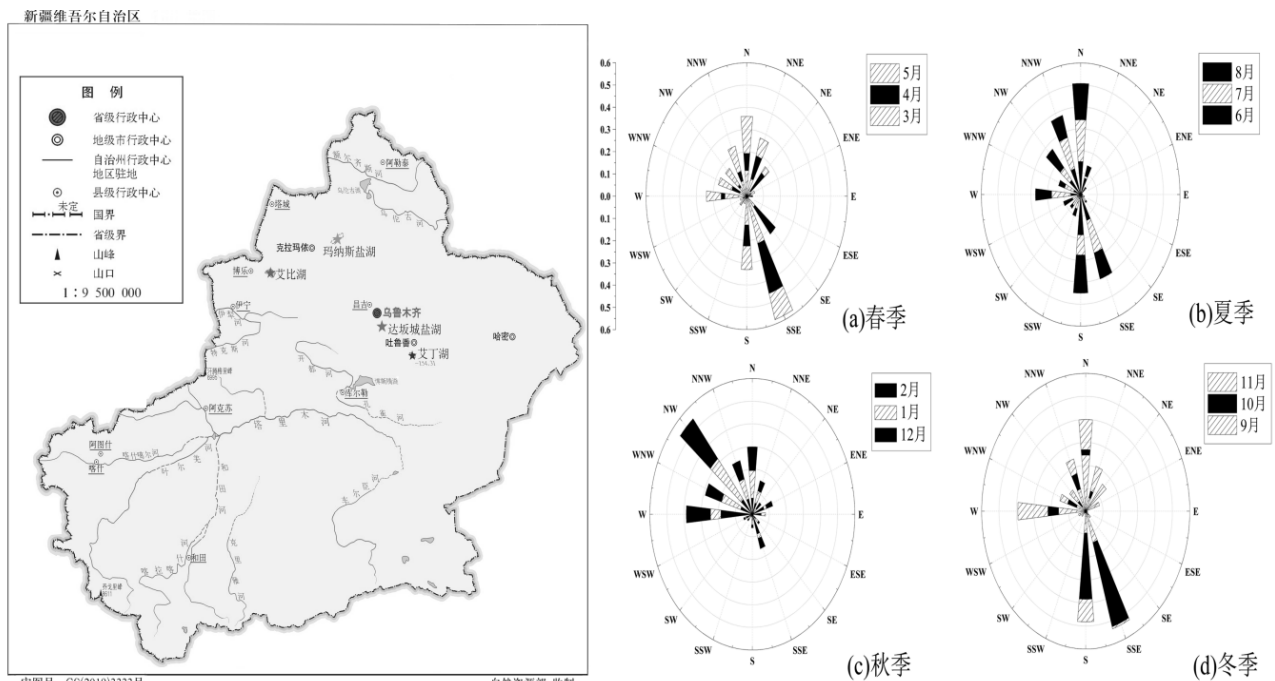


图 2 乌鲁木齐周边盐湖分布

Fig.2 Distribution of salt lakes around Urumqi

近年来随盐湖水位的不下降,湖泊湿地面积逐渐减少,湖底逐渐干涸裸露,加剧了土壤盐渍化^[26]。尤其在冬季,植被枯萎,阻风能力减弱,土壤含盐量上升;春季土质疏松,但树木枝叶细小,强风带动盐碱粉尘大范围扩散;秋季气候干燥,大风频繁且持续时间较长,盐湖萎缩变燥,加剧了盐尘粒子迁移^[2]。

为更清楚了解大气盐尘离子的传输及移动路径,利用 HYSPLIT 后向轨迹模型,选取近地面 500m、1000m 和 1500m 三个高度层按月随机对采样点(43°45'43"N,87°36'43"E)的气团进行 72h 模拟(图 3)。结果显示,3 月开始 Na^+ 浓度占比逐渐增加,

到夏季(6 和 7 月)超过 SO_4^{2-} 占比,到 8 月 Na^+ 浓度占比减少。9 月样品的轨迹显示,气团从俄罗斯出发经过哈萨克斯坦、中国阿勒泰及塔城等地区途径玛纳斯盐湖最终到达乌鲁木齐;10 月气团在较低高度经过吐鲁番和达坂城等地区,且 9 月 25 日和 10 月 15 日样品又以 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 为主要成分;11 月 10 日气团主要来自乌鲁木齐西北方向;而 12 月 8 日及 1 月 10 日 3 个不同高度轨迹所经路径基本相同,均来自沙漠地区,且在 500m 以下的空中运行,颗粒的成分也是以 SO_4^{2-} 为主;2 月 2 日的气团由沙漠出发经吐鲁番、达坂城等地到达乌鲁木齐,其成分以 K^+ 和

Ca²⁺为主;3月5日、4月14日和5月16日的气团同样途径艾比湖,6月3日气团3个高度基本重合,经过玛纳斯盐湖,7月2日、8月6日气团经艾比湖到达乌鲁木齐。

气团轨迹按照季节分布显示,春季与秋季乌鲁木齐市PM_{2.5}中盐尘离子主要来自艾比湖方向,少量来源于吐鲁番、达坂城等地的盐湖;而夏季则集中来

源于艾比湖、玛纳斯盐湖等;冬季主要来自周边的沙漠地带.结合乌鲁木齐四季风向(东南风、西北风)及离子浓度占比的变化可以看出,除2月外PM_{2.5}中水溶性离子都以SO₄²⁻为主,Ca²⁺和Na⁺次之,符合气团运行轨迹.由此得出除沙漠地区之外,盐湖干涸湖底及周边土壤的盐尘离子对乌鲁木齐盐尘暴的形成有一定的影响.这与之前的研究^[2,21,26-28]结果一致.

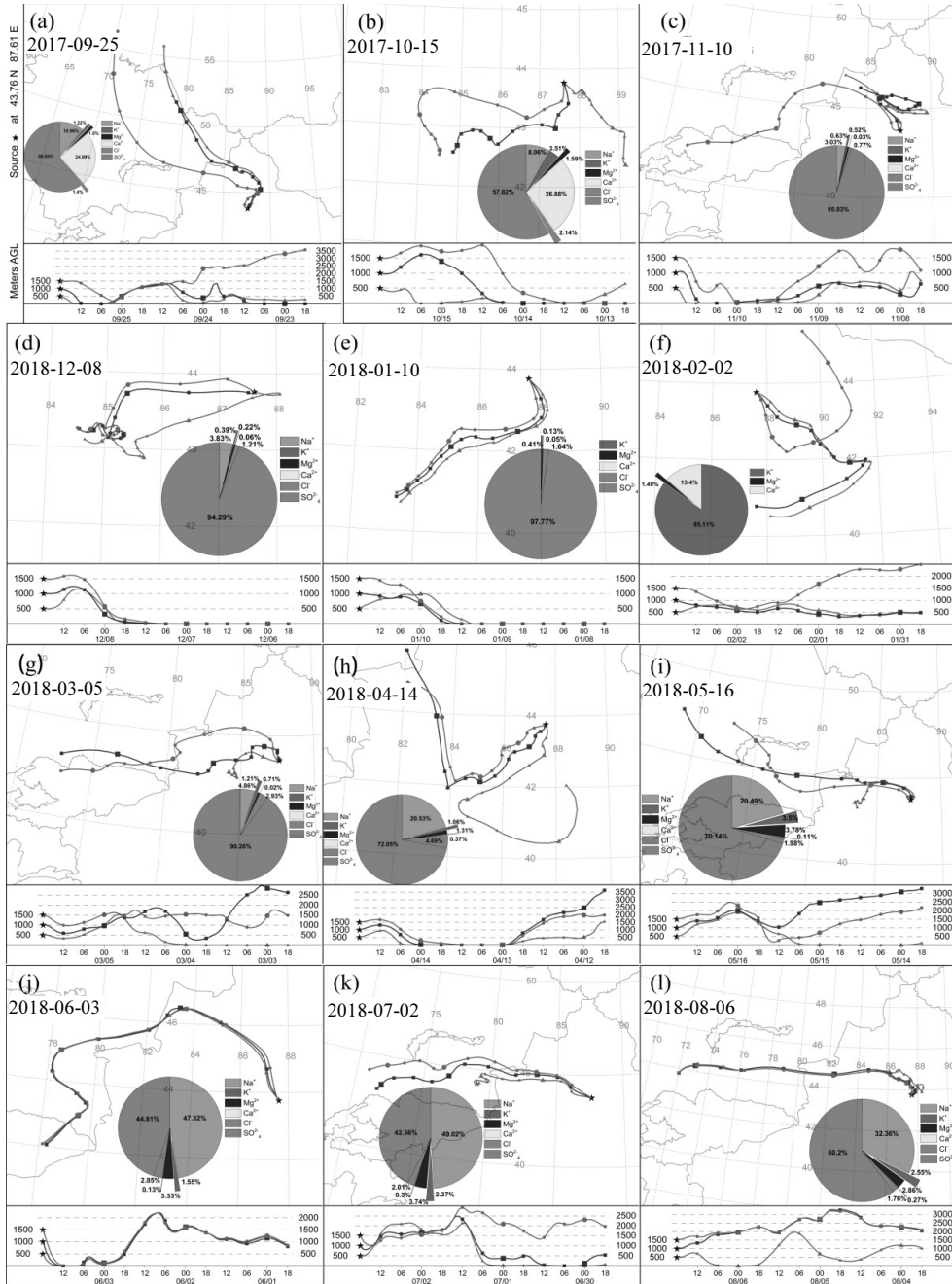


图3 不同气团轨迹影响下盐尘离子的组成变化

Fig.3 Composition variations of salt dust ions in different air mass origins

2.3 盐(沙)尘离子远距离输送对城市大气颗粒物形成的影响

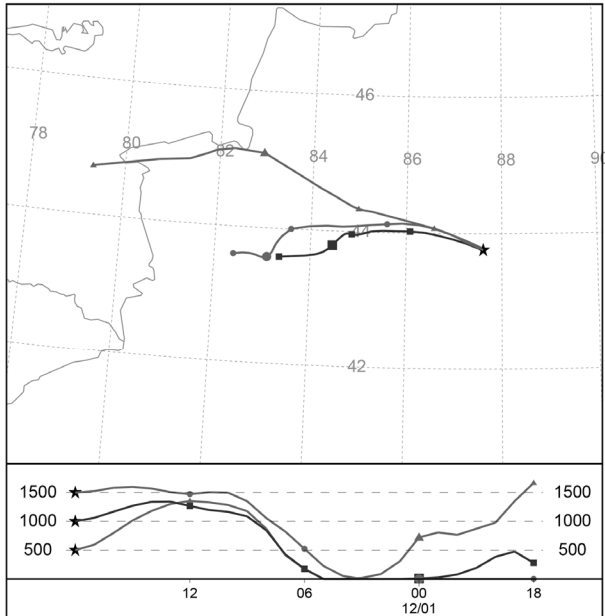


图 4 沙雪天气团后向轨迹

Fig.4 Back trajectory of air masses during a “sand snow” event

2018 年 12 月 1 日乌鲁木齐市出现了极端的“沙雪”天气,经HYSPLIT后向轨迹模型模拟(图4),此次沙尘主要来自克拉玛依方向.克拉玛依市^[29]位于 84°44'~86°01'E, 44°07'~46°18'N之间(<http://www.klmy.gov.cn:443/>),地处准噶尔盆地西部,玛纳斯河流经克拉玛依市注入玛纳斯湖^[30],而艾比湖位于准噶尔盆地西南隅.为进一步分析盐(沙)尘对乌鲁木齐大气环境产生的影响,将沙雪天气前后雪样和克拉玛依市表层土样进行了分析(图5).

由图可见(图5左侧),不论是底部还是中部雪样的颗粒物中均可以观察到球形的飞灰和不规则的矿物质颗粒,而克拉玛依土样则以不规则的矿物颗粒为主.元素映射图(EDS Mapping 图5右侧)显示,中层和底层雪样的颗粒相中Na的分布密度相同,但克拉玛依土样中并未观察到.可以认为代表盐层粒子的Na没有受到沙尘的影响,但沙尘对雪样颗粒相Ca、K和Mg有一定的贡献,X射线能谱分析(表2)也进一步说明这一点.

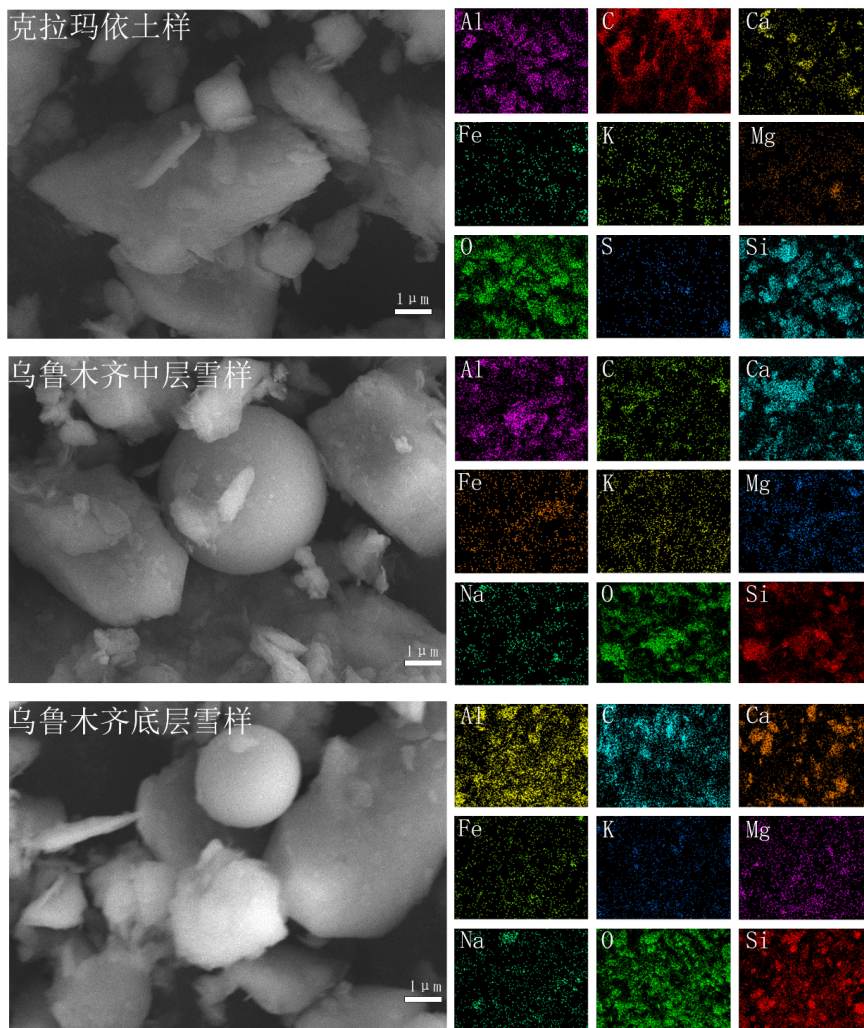


图 5 土壤和雪样中颗粒物微观形貌与元素组成(×10000)

Fig.5 Microscopic morphology and element compositions of particles in soil and snow samples (×10000)

表2 土壤和雪样中元素含量(%)

Table 2 Element contents in soil and snow samples (%)

样品	O	C	Si	Ca	Al	Fe	Mg	K	Na	S
克拉玛依土样	37.90	52.90	4.20	1.10	1.90	1.00	0.40	0.40	—	0.10
乌鲁木齐中层雪样	50.10	16.60	12.90	10.00	3.90	3.30	1.30	1.30	0.50	—
乌鲁木齐底层雪样	46.80	31.20	8.50	5.30	3.60	1.90	1.10	1.10	0.50	—

注：“—”为未检出,下同。

表3 不同雪层水溶性离子浓度(mg/L)

Table 3 Concentrations of water-soluble ions in different layers of snow(mg/L)

样品	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
中层雪样	172.30	218.62	99.59	2.08	8.15	87.58	—	149.31
底层雪样	5.64	11.31	4.95	0.37	1.13	17.57	—	62.44

雪样液相中水溶性离子分析结果(表 3)表明,与底层雪样相比中层雪样中 Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻分别增加了 30、19、20、5、7、5、2 倍,其中 Cl⁻、Ca²⁺、SO₄²⁻增加最为显著.图 4 显示沙雪天气团产生于哈萨克斯坦,经新疆的温泉,博乐,艾比湖,阿拉尔山口岸,乌苏,石河子到达乌鲁木齐,进一步表明输入型的盐(沙)尘对乌鲁木齐大气颗粒的形成有一定贡献.

3 结论

3.1 采样期间乌鲁木齐市 PM_{2.5} 中水溶性离子的平均质量浓度为 62.65±64.75μg/m³,四季占比分别为:冬季(76.45%)>春季(51.63%)>秋季(21.84%)>夏季(7.36%).

3.2 乌鲁木齐市春季和冬季以东南风(南东南 SSE)为主,夏季则主要是北风(N),秋季则以西北风(NW)为主;春、夏、秋三季部分气团经东南方及西北方盐湖到达城市上空,作用于乌鲁木齐市大气;冬季气团主要来源于周边沙漠地区.

3.3 “沙雪”前后水相和颗粒相的理化分析进一步说明,除去工业源及生物质燃烧源外,SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Ca²⁺与 Mg²⁺等盐尘离子受城市附近的盐渍土迁移的影响.

参考文献:

- [1] 刘东伟,雷加强,武广洋,等.盐尘暴及其生态效应 [J]. 中国沙漠, 2011,31(1):168-173.
Liu D W, Lei Z Q, Wu G Y, et al. Saline dust storm and its ecological effects [J]. Journal of Desert Research, 2011,31(1):168-173.
- [2] 葛拥晓,马 龙,刘东伟.西北干旱区柴窝堡湖干涸湖底粉尘潜在扩

散特征 [J]. 中国环境科学, 2015,35(6):1620-1629.

Ge Y X, Ma L, Liu D W. A preliminary study on the transport pathways of dust originating from playa of Chaiwopu Lake, arid northwest China [J]. China Environmental Science, 2015,35(6):1620-1629.

- [3] 刘东伟,穆桂金,徐俊荣.艾比湖干涸湖底化学组成及盐尘的风运堆积 [J]. 中国环境科学, 2009,29(2):47-52.
Liu D W, Mu G J, Xu J R. Chemical components and transport mechanics of wind-erodible playa sediments, Lake Ebinur, Xinjiang [J]. China Environmental Science, 2009,29(2):47-52.
- [4] 樊自立,马英杰,马映军.中国西部地区的盐渍土及其改良利用 [J]. 干旱区研究, 2001,(3):1-6.
Fan Z L, Ma Y J, Ma Y J. Salinized soils and their improvement and utilization in west China [J]. Arid Zone Research, 2001,(3):1-6.
- [5] Cahill T A, Gill T E, Reid J S, et al. Saltating particles, playa crusts and dust aerosols at Owens (dry) lake, California [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1996,21(7):621-639.
- [6] Houser C A, Nickling W G. The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay-crusting playa [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(5):491-505.
- [7] Reynolds R L, Yount J C, Reheis M, et al. Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2007,32(12):1811-1827.
- [8] 沙依然,李 聪,陈爱京,等.艾比湖近期出现大面积干涸 [J]. 干旱区地理, 2006,29(4):616-616.
Sha Y R, Li C, Chen A J, et al. Recently-dried-up lake bed of the Lake Ebinur in Large Area [J]. Arid Land Geography, 2006,29(4):616-616.
- [9] 王亚俊,吴素芬.新疆吐鲁番盆地艾丁湖的环境变化 [J]. 冰川冻土, 2003,25(2):229-231.
Wang Y J, Wu S F. Environment change over the Aydingkol Lake Region in Turpan Basin, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(2):229-231.
- [10] 郑喜玉,张明刚,徐 昶,等.中国盐湖志 [M]. 北京:科学出版社, 2002.
Zheng X Y, Zhang M G, Xu C, et al. China salt lake annals [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [11] Turap Y, Rekefu S, Wang G, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during winter in the southern part of Urumqi,

- China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019,19:1325-1337.
- [12] 中华人民共和国环境保护部.环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的测定重量法:HJ618—2011 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.
Ministry of Environmental Protection, PRC. Determination of atmospheric articles PM_{10} and $PM_{2.5}$ in ambient air by gravimetric method: HJ618—2011 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [13] 赵克蕾,刘新春,陆 辉,等.乌鲁木齐冬季大气细颗粒物水溶性离子特征及来源 [J]. *中国沙漠*, 2015,35(3):707-714.
Zhao K L, Liu X C, Lu H, et al. Characteristics and sources of water-soluble ions in fine atmospheric particles in Winter in Urumqi [J]. *Journal of Desert Research*, 2015,35(3):707-714.
- [14] 梁 琼,尹 辉,牟书勇,等.乌鲁木齐市采暖期大气 $PM_{2.5}$ 特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2015,(3):543-550.
Liang Q, Yin H, Mou S Y, et al. Analysis on the characteristics of $PM_{2.5}$ in Urumqi during heating period [J]. *Arid Zone Research*, 2015,(3):543-550.
- [15] 杨 浩.乌鲁木齐市 TSP 浓度、形貌及水溶性离子特性分析 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2011.
Yang H. The Characteristics, morphology and water-solubility ions of Total Suspended Particles in Urumqi City [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011.
- [16] 邓文叶,贾尔恒·阿哈提,杨 静,等.乌鲁木齐 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的形貌特征与来源解析 [J]. *环境工程*, 2017,35(8):96-101.
Deng W Y, Jiaerheng A, Yang J, et al. morphology characteristics and source analysis of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in urumqi [J]. *Environmental Engineering*, 2017,35(8):96-101.
- [17] 黄雪莉.新疆罗布泊硝酸盐矿开发利用研究及技术进展 [J]. *现代化工*, 2006,26(7):10-12,14.
Huang Y L. Development and utilization of nitrate mine in Lop Nur, Xinjiang and its technical progress [J]. *Modern Chemical Industry*, 2006,26(7):10-12,14.
- [18] 魏明娜,谢海燕,邓文叶,等.乌鲁木齐市采暖期与非采暖期大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性离子特征分析 [J]. *安全与环境学报*, 2017,17(5):1986-1991.
Wei M N, Xie H Y, Deng W Y, et al. Characteristics analysis of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Urumqi during heating period and non-heating period [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017,17(5):1986-1991.
- [19] 薛国强,朱 彬,王红磊.南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 [J]. *环境科学*, 2014,(5):1633-1643.
Xue G Q, Zhu B, Wang H L. Size distributions and source apportionment of soluble ions in aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2014,(5):1633-1643.
- [20] 袁小燕,朱羽蒙,廖瑞雪,等.成都市重污染期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征分析 [J]. *四川环境*, 2017,(S1):28-31.
Yuan X Y, Zhu Y M, Liao R X, et al. Water-soluble ions characteristics of fine particulate matter during heavy pollution period in Chengdu [J]. *Sichuan Environment*, 2017,(S1):28-31.
- [21] Jilili A, Gabchenko M V, Junrong X. Eolian transport of salts—A case study in the area of Lake Ebinur (Xinjiang, Northwest China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008,72(10):0-1852.
- [22] 徐宏辉,王跃思,温天雪,等.北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布 [J]. *环境科学*, 2007,28(1):14-19.
Xu H H, Wang Y S, Wen T X, et al. Size distributions and vertical distributions of water soluble ions of atmospheric aerosol in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2007,28(1):14-19.
- [23] 刘新春,钟玉婷,何 清,等.乌鲁木齐大气总悬浮颗粒物(TSP)离子化学组分及影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2012,29(4):713-720.
Liu X C, Zhong Y T, He Q, et al. The features of ionic components of TSP and their affecting factors over Urumqi [J]. *Arid Zone Research*, 2012,29(4):713-720.
- [24] 姜 伟,董海燕,陈 魁,等.天津市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子组分特征 [J]. *中国环境监测*, 2013,29(3):39-43.
Jiang W, Dong H Y, Chen K, et al. Pollution character of $PM_{2.5}$ water-soluble ions in Tianjin City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013,29(3):39-43.
- [25] Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation [J]. *Sedimentology*, 1987,34(1):139-153.
- [26] 鄢雪英,丁建丽,李 鑫,等.艾比湖湿地退化对盐尘暴发生及运移路径的影响 [J]. *生态学报*, 2015,(17):289-298.
Yan X Y, Ding J I, Li X, et al. Effect of salt dust storm migration pathways on degradation of Ebinur Lake Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,(17):289-298.
- [27] Jilili A, Liu D W, Guangyang W U. Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions [J]. *Journal of Arid Land*, 2010,2(2):144-150.
- [28] 吉力力·阿不都外力,徐俊荣,穆桂金,等.艾比湖盐尘对周边地区土壤盐分及景观变化的影响 [J]. *冰川冻土*, 2007,29(6):928-939.
Jilili A, Xu J R, Mu G J, et al. Effects of salt dust on soil salinity and landscape change in Lake Ebinur [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007,29(6):928-939.
- [29] 潘 峰,田长彦,邵 峰,等.新疆克拉玛依市生态敏感性研究 [J]. *地理学报*, 2011,66(11):1497-1507.
Pan F, Tian C Y, Shao F, et al. Evaluation of ecological sensitivity in Karamay, Xinjiang, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(11):1497-1507.
- [30] 钱 麟,史兴民,南 峰.新疆克拉玛依市兴农湖剖面古沉积环境分析 [J]. *水土保持研究*, 2005,12(4):96-99.
Qian M, Shi X M, Nan F, et al. Analysis on the sedimentary environment of Xingnong Lake section near Karamai City, Xinjiang [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005,12(4):96-99.

作者简介: 张渊钰(1994-),女,山西晋中人,新疆大学硕士研究生,主要从事大气环境检测及健康风险评估等相关研究。