

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0061

LIU Xin, NIU Zhiying, LI Yangzi, et al. Spatial distribution characteristics and possible sources of dissolved arsenic and mercury in the snow pack of northern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1009-1017. [刘鑫, 牛志莹, 李杨子, 等. 北疆积雪中溶解性砷和汞的空间分布特征及来源分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4):1009-1017.]

## 北疆积雪中溶解性砷和汞的空间分布特征及来源分析

刘鑫<sup>1,2</sup>, 牛志莹<sup>1</sup>, 李杨子<sup>1</sup>, 贺茂勇<sup>3</sup>, 黄华宇<sup>1,2</sup>, 王宁练<sup>1</sup>

(1. 西北大学 城市与环境学院 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了解北疆积雪中砷(As)和汞(Hg)的空间分布特征及来源, 基于2018年1月在北疆地区58个采样点采集的积雪样品, 采用原子荧光光谱法测定积雪中溶解性砷和汞的含量, 用反距离加权插值法分析空间分布特征, 并利用后向轨迹模型探讨了其来源。结果表明: 积雪中溶解性砷和汞的浓度分别在 $0.21\sim2.69\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.32\sim64.09\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均低于地表水Ⅰ类水质标准限值, 说明积雪中砷和汞元素污染较轻。反距离加权插值法分析表明, 积雪中砷和汞污染物的空间分布存在差异性, 其中准噶尔盆地和天山北坡地区的浓度分布较高。结合后向轨迹聚类分析结果, 推断积雪中砷和汞污染物主要来自局地活动, 周边国家气团远距离传输所产生的影响较小。研究结果可为评估北疆生态环境质量及区域污染防治提供科学支持。

**关键词:** 积雪; 砷; 汞; 空间分布; 北疆

**中图分类号:** X51; P426.63\*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1009-09

### 0 引言

积雪能够有效保存大气干、湿沉降的信息<sup>[1-3]</sup>, 对所含物质进行研究可以揭示污染物质的特征和来源<sup>[4-6]</sup>。大气环境中的重金属, 随大气沉降, 并在积雪中累积, 是大气沉降污染物的重要成分之一<sup>[7]</sup>。重金属主要来源于人类活动释放(如能源燃烧、交通运输等)和自然释放(如火山活动、风沙携带等), 有害重金属元素经生物地球化学循环和食物链富集后, 极易对生态环境和人体健康产生危害, 其中砷(As)和汞(Hg)的毒性作用更为明显<sup>[8-10]</sup>。对积雪中砷和汞开展研究能够更直观地反映和评估环境污染的情况<sup>[11-13]</sup>, 如Gao等<sup>[14]</sup>对中国中东部地区雪中砷元素分布及来源进行了分析, 发现中东部城市中砷主要来源于矿物燃料燃烧以及道路交通排放。关于积雪中汞的研究, Fortner等<sup>[15]</sup>发现泰勒山谷冰

川表层雪中部分汞来源于风沙。Gustaytis等<sup>[16]</sup>对高硫化物尾矿地区积雪和融雪水中汞元素的含量特征及形态进行了研究, 发现积雪释放汞会对水生生态系统带来潜在风险。Wu等<sup>[17]</sup>发现我国天津市采暖季节雪样中砷和汞元素浓度的升高, 主要受北方采暖期间煤炭燃烧的影响。已有学者对新疆地区积雪中砷和汞元素开展过相关研究<sup>[18-19]</sup>, 但关注对象主要为部分城市区域, 在北疆地区类似的研究仍较为少见。新疆远离海洋, 深居内陆, 四周被高山环绕, 北疆地区作为新疆生产力的高度集中区域, 是我国三大积雪分布中心之一<sup>[20]</sup>。而积雪是该地区人类日常生活及绿洲牧业的重要水资源, 积雪所含砷和汞污染物可能会对当地人类和生态环境带来潜在危害。因此, 针对北疆地区积雪中砷和汞污染物分布特征及来源进行研究十分必要。

本研究依托2018年1月在中国北疆地区布点

收稿日期: 2020-09-03; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项(2017FY100501); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB40000000)资助

作者简介: 刘鑫, 硕士研究生, 主要从事雪冰化学研究. E-mail: liuxinx@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 黄华宇, 副教授, 主要从事环境变化研究. E-mail: huanghy@nwu.edu.cn

获取的样品,定量分析积雪中溶解性砷和汞含量并探讨其空间分布特征,以期初步评估当地环境污染的状况。同时利用后向轨迹聚类分析法追溯北疆地区积雪中砷和汞污染物的来源,这对于了解砷和汞污染物的地球化学循环具有重要意义,并为中国北疆区域污染物评价和环境管理提供参考。

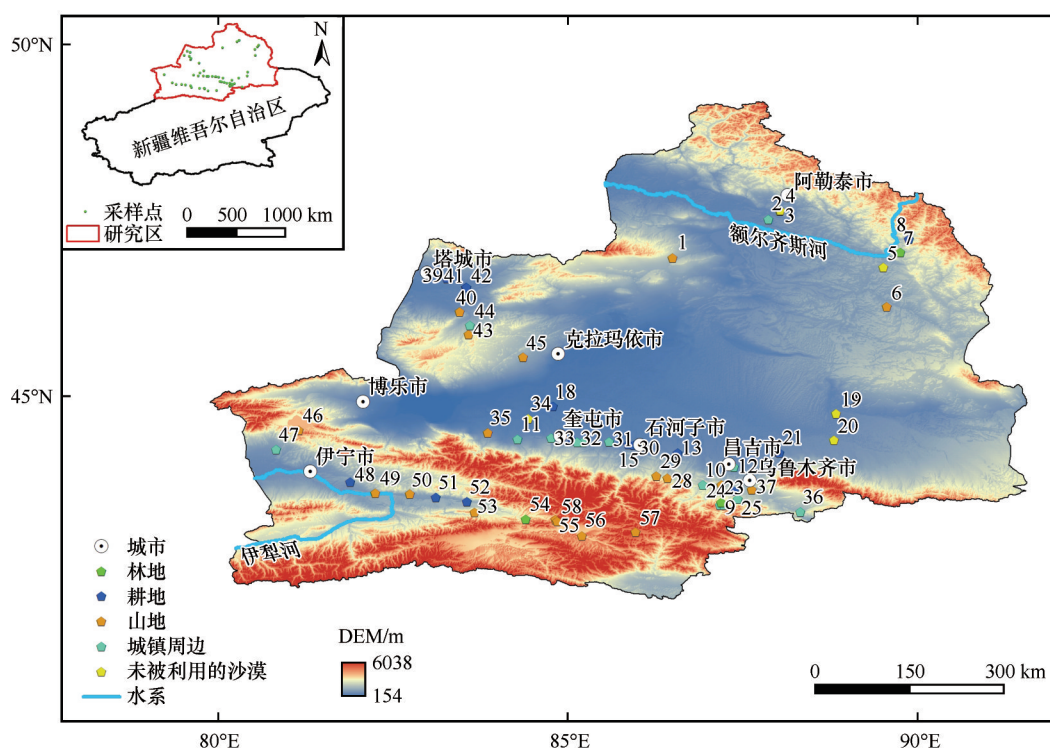
## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

新疆地域辽阔且地形复杂,山脉与盆地相间排列,天山山脉横亘中部,将新疆分为南北两半。本研究区域是天山以北的北疆地区(总面积 39 万  $\text{km}^2$ ),它由南向天山和北向阿尔泰山两大山脉组成,中间是准噶尔盆地。北疆地区属于温带大陆性干旱半干旱气候(年均气温 $-4\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),全年降水量在 150~200 mm。由于冬季环流受到西伯利亚高原和南部山区的阻挡,使该地区具有较为丰富的季节性融雪水源,超过一半的降水在寒冷季节以降雪的形式发生,积雪期长达 120 天左右。北疆是我国重要的牧业资源区,积雪是该地区春季和初夏主要的水源,积雪融水对当地的生态环境影响较大。

### 1.2 样品采集及处理

根据中国气象数据网实况观测数据显示,2018 年 1 月 2—4 日和 11—16 日在中国北疆地区发生两次大范围降雪,本研究遵循远离大污染点源的基本原则,在 1 月 22—31 日共选取 58 个采样点进行积雪样品采集(图 1)。整个采样区涵盖了山地、盆地和丘陵等地形地貌,土地利用类型多样,包括耕地、牧草地、居民用地等,以及未被利用的沙漠地区。雪样采集根据各采样点积雪深度不同,由底层自下而上每隔 5 cm 采集一个积雪样品,并对采样点表层 2 cm 雪样进行采集。采样时戴 PVC 手套,并用积雪清洗,去除表面污雪,使用洁净的采雪工具将积雪样品置于无菌采样袋(B00994WA, NASCO Whirl-Pak)内,压实、封口并标记。样品一直保持冷冻状态运回实验室,于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下避光保存。



注:部分采样点在图中重叠,其编号未予显示

图 1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Map showing the study area and spatial distribution of sampling sites

待积雪样品在常温下融化后,加入 0.5% 盐酸溶液迅速固定,将各采样点不同积雪深度样品按等体积取样,混合均匀,并标记编号 1~58 号。用洁净

的聚乙烯针筒和 0.22  $\mu\text{m}$  针筒式过滤器过滤去除不溶性杂质和颗粒物。利用原子荧光光谱法(AFS),以 2% 硼氢化钾-0.5% 氢氧化钠溶液和 0.5% 硼氢

化钾-0.2% 氢氧化钠溶液作为还原剂分别与积雪样品中砷和汞元素发生氢化反应,将处理后的积雪样品置于原子荧光光度计(北京科创海光 AFS 9700A)上,以5% 盐酸溶液作为载流溶液,测定积雪中溶解性砷和汞含量。以超纯水为空白,每个样品经仪器自动检测三次并获得测定值。该方法中砷和汞检测限分别为 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验所用过滤器和样品瓶均为灭菌低温保存,样品测定所用试剂均为优级纯,本次研究采集的样品均在2个月内检测完毕。

### 1.3 数据和分析方法

#### 1.3.1 MODIS 积雪数据和反距离插值法

MODIS 积雪数据是利用积雪在可见光波段具有较高反射率的特点,采用归一化差分积雪指数(NDSI)分离积雪和其他物质,准确地提取积雪信息,从而得到积雪产品。本研究利用美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)网站下载中分辨率成像光谱仪(MODIS)的积雪产品(MOD10A2)数据,其空间分辨率为500 m。

基于所得积雪数据和积雪中砷和汞的浓度数据,应用 ArcGIS 10.4 软件的反距离加权法(IDW),对积雪中砷和汞污染物的空间分布进行评估。IDW 是精确性插值法的一种,可在一定程度上确保采样值的准确性,其加权平均是通过插值点与样本点间的距离作为权重来计算的,所以离插值点越近的采样点被赋予的权重越大。其公式为

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x) z_i}{\sum_{j=1}^n w_j(x)} \quad (1)$$

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2)$$

式中: $Z(x)$ 为插值点 $x$ 的估计值; $z_i$ 为已知采样点的浓度值; $n$ 为在插值过程中使用到已知点的数目; $w_i$ 为权重值; $d$ 为已知点 $x_i$ 与插值点 $x$ 的距离; $p$ 为距离的幂(本研究取值为2),显著影响插值结果的准确性<sup>[21]</sup>。本研究利用该方法可以根据已知采样点砷和汞的含量值推断出未采样地区的像元。

#### 1.3.2 HYSPLIT 后向轨迹聚类分析

混合单粒子拉格朗日积分轨迹(HYSPLIT)模型具备较完整的输送、扩散和沉降模式,被广泛应用于多种污染物的大气传输和扩散的研究中<sup>[22-23]</sup>。本研究利用该模型,综合温度、气压、相对湿度、水平和垂直风速等气象条件,每天分为4个时次(UTC

00:00、06:00、12:00、18:00)向后计算72 h,起始高度为离地面500 m,模拟了中国北疆地区采样点连续30天的后向轨迹,利用总空间方程(TSV)确定采样点轨迹最佳分类数<sup>[24]</sup>,再基于气团移动的方向和速度,按照轨迹路径最相近原则<sup>[15]</sup>,将这些轨迹进行聚类分析,进而得到各采样点在30天内气团经过的主要途径及所占比例。模型使用的气象数据下载自美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR),数据的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 积雪中砷和汞元素含量的总体特征

中国北疆地区溶解性砷和汞浓度分别在 $0.21 \sim 2.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.32 \sim 64.09 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,均值(平均 $\pm$ 标准差)分别为 $(0.70 \pm 0.46) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(15.94 \pm 10.49) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。对比《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)可以发现,北疆地区溶解性砷和汞的浓度均值均低于I类水体标准限值,表明北疆地区积雪中溶解性砷和汞含量均处于安全限值之内。此外,变异系数可以反映人类活动对环境的干扰程度,由式(3)计算得,北疆地区积雪中砷和汞变异系数分别为66.27%和65.79%,说明两种元素在研究区内的含量差异较大。积雪中砷和汞浓度的上限值接近我国大城市浓度水平(表1),表明人类活动对砷和汞来源可能存在一定的影响。

$$C_v = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $C_v$ 为变异系数; $\delta$ 为标准偏差; $\mu$ 为研究区积雪中元素平均浓度值。一般来说离散程度越大,变异系数就越大,人为因素对砷和汞元素的影响可能性就越大。

将本研究结果与其他地区积雪中砷和汞含量对比(表1),发现中国北疆地区积雪中砷和汞的含量显著高于格陵兰雪坑的砷含量 $(0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ <sup>[25]</sup>、青藏高原冰川表层雪中汞含量 $(0.40 \sim 1.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1})$ <sup>[26]</sup>及美国瓦萨奇山脉积雪中砷和汞含量 $(0.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.70 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1})$ <sup>[27]</sup>,这是由于北疆地区是新疆产业高度集中区域,且冬季采暖期有煤炭燃烧,人类活动对该地区砷和汞含量存在较大程度的影响。本研究砷和汞含量显著低于天津<sup>[17]</sup>和北京<sup>[28]</sup>地区,这一结果可能是由于研究区内工业活动和人类活动所产生的影响相对较弱。由此可知,中国北疆地区积雪中砷和汞含量较低,世界各地由于地形、气候、工业分布和人类活动等因素所产生影响不同,使得不



表1 不同地区雪样中砷和汞的浓度

| Table 1 Comparisons of trace element (As and Hg) concentrations in snow samples from different locations |      |                 |  |                                      |      |
|--|------|-----------------|--|--------------------------------------|------|
| 位置   | 样品类型 | 采样时间(年-月)       | As/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Hg/( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 文献来源 |
| 格陵兰  | 雪坑   | 2013-05/2014-04 | 0.02                                   | n. v.                                | [25] |
| 中国天津   | 积雪   | 2012-11/2015-03 | 1.37~1.95                              | 60~230                               | [17] |
| 青藏高原南部扎当冰川   | 表层雪  | 2011-08         | n. v.                                  | 0.4~1.2                              | [26] |
| 美国瓦萨奇山脉  | 积雪   | 2009-12/2010-03 | 0.25                                   | 1.7                                  | [27] |
| 中国北京   | 降雪   | 2003-01/2003-03 | n. v.                                  | 106~162                              | [28] |
| 波兰波兹南  | 积雪   | 2013-01/2013-03 | 0.71                                   | n. v.                                | [29] |
| 中国北疆   | 积雪   | 2017-12/2018-01 | 0.21~2.69                              | 5.32~64.09                           | 本研究  |

注：n. v. 表示未进行检测。

同地区积雪中砷和汞含量存在显著差异。

2.2 积雪中砷和汞元素的空间分布特征

将MOD10A2数据进行处理得到北疆地区积雪覆盖情况(图2),发现研究区积雪覆盖占比较大。基于采样点积雪中砷、汞浓度和MODIS积雪数据,

采用IDW地质统计学方法分析了砷、汞元素在我国北疆地区的空间分布特征。由图3可知,北疆地区砷、汞污染物分布从西南至东北大致呈低—高—低的分布情况。

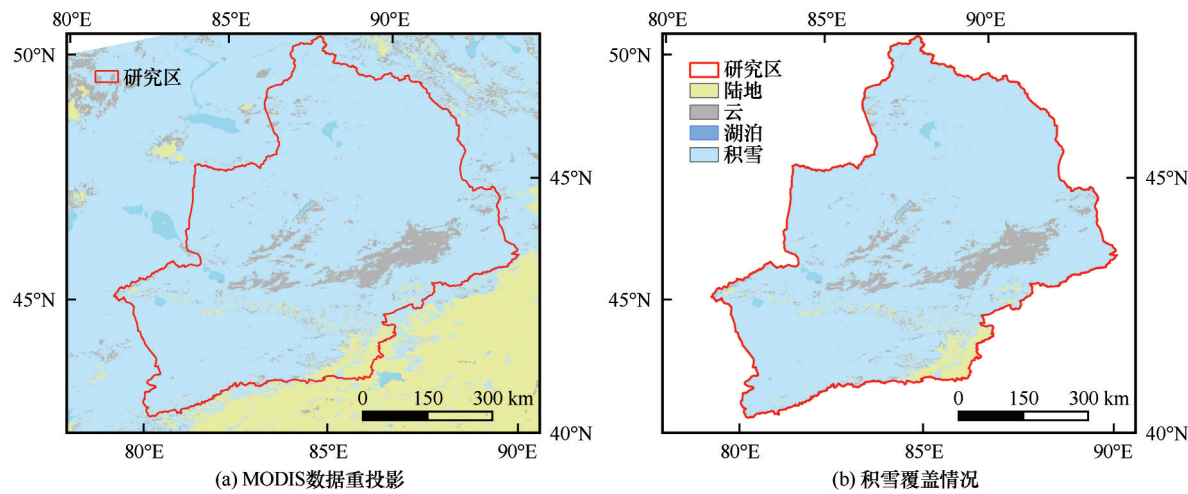


图2 MODIS数据重投影和北疆积雪覆盖情况

Fig. 2 MODIS data reprojection (a) and the area of snow coverage in northern Xinjiang (b)

高浓度的砷和汞分布地区主要为图3中部的天山北坡和准噶尔盆地。砷和汞浓度受工业活动影响较大,这是由于天山北坡是新疆重要的经济带,产业结构以重工业为主,天山经济带中的工业产值约占新疆总工业产值的70%以上<sup>[30]</sup>。而且,该地区城镇较多<sup>[31]</sup>,取暖季产生砷和汞的污染物极易随大气湿沉降在积雪中累积。此外,准噶尔盆地是封闭式内陆盆地,盆地中矿藏丰富,西部设有炼油厂,能源开采、运输、冶炼等过程会排放砷和汞污染物至大气、地表灰尘等环境介质中,以上三个因素可能是积雪中砷和汞浓度较高的主要原因。研究区南

北部积雪中砷和汞浓度的低值可能与以下两个方面因素有关。首先,阿勒泰地区位于北疆北部,以草地为主,是典型的水源涵养型山地草原生态功能区,由图3(a)可知,砷污染物的分布在该地区由北到南浓度逐渐增大,这一现象可能与阿勒泰地区的地形特征有关,北部主要为山脉,人类活动所产生的影响小。其次,图3表明北疆的西南部是新疆最湿润的地区之一,海拔较高,人类活动对当地影响较小,因此砷和汞浓度较低。

对比图3(a)和(b)可以发现,砷和汞的分布存在一定差异性,这可能与当地污染物排放源不同有

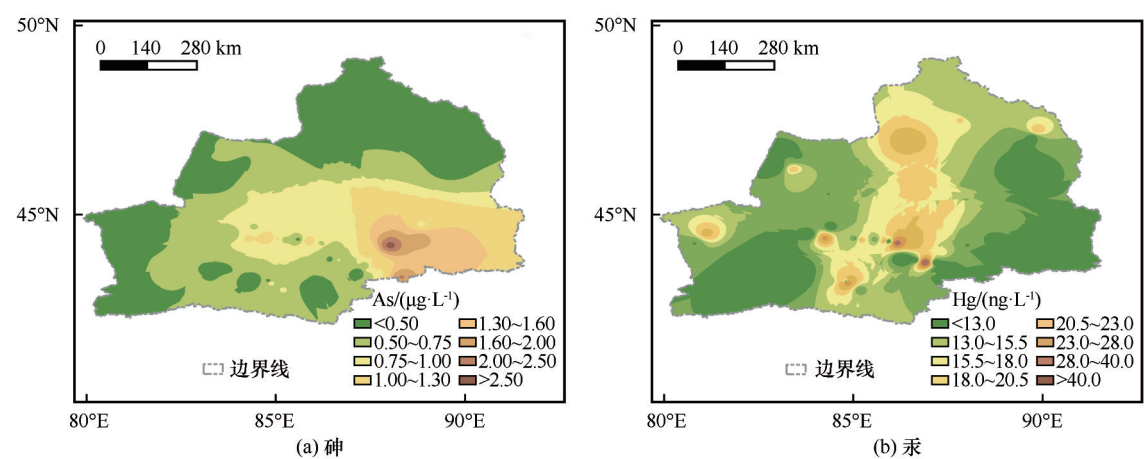


图3 北疆积雪中砷和汞的空间分布

Fig. 3 Spatial variability of As (a) and Hg (b) concentrations in northern Xinjiang snow pack

关。研究区的东南部砷浓度值较高,这可能是由于乌鲁木齐市东部设有大量化工企业<sup>[32]</sup>,且东、西、南三面被天山包围,污染不易扩散,使得砷污染物在乌鲁木齐东部的分布高于西部。汞浓度在石河子市、昌吉州和乌鲁木齐市的积雪中分布较高,可能与煤炭消耗有关,结合《新疆统计年鉴》可知,新疆煤炭用于发电和供热的消耗量逐年上涨。曾有文献报道中国大气汞污染的排放源,占主导地位的是煤炭燃烧(47.2%),其他工业来源占比较少<sup>[33]</sup>。此外,积雪中汞浓度会受到太阳辐射的影响<sup>[13]</sup>,砷污染物在大气运输过程中可以通过化学过程转变为更稳定的无机和有机形态<sup>[34]</sup>。因此,砷和汞化学性质的不同,可能也是导致其空间分布存在差异的重要原因。

2.3 积雪中砷和汞元素的来源分析

本研究对北疆地区 58 个采样点分别进行后向轨迹聚类分析,因采样点偏离不远,后向轨迹相似,图 4 仅选取研究区内典型采样点以追溯来源。其中,1 号和 7 号采样点均位于阿勒泰地区。由图 4(a)和(b)可知,两采样点均会受到来自西北方向由俄罗斯经过哈萨克斯坦的远距离气团影响,轨迹所占比例较小,但哈萨克斯坦经济以石油、采矿和煤炭为主,可能对采样点积雪中污染物产生一定影响。1 号采样点的轨迹 4 是从蒙古国绕过阿尔泰山由东南侧到达采样点,所占比例 11%。轨迹 1 路径最短,占比达 66%,气团由塔城地区传输至采样点,途中经过大量城镇,当地人类活动可能会对采样点积雪中砷和汞的含量产生影响。7 号采样点的砷和汞浓度较低,其轨迹大致分为西北和东北两个方向,来自东北方向的气团由蒙古国传输至采样点,占比

63%,西北方向的气团主要由哈萨克斯坦传输至采样点,两个方向均未发现明显污染源。

14 号和 21 号采样点均位于天山北坡,两采样点砷和汞含量较高。由图 4(c)和(d)可以看出,两采样点均有由土库曼斯坦—乌兹别克斯坦—哈萨克斯坦最终到达采样点的气团轨迹。14 号采样点的气团主要来自西侧,由俄罗斯向东南方向传输而来的轨迹 4 所占比例最小,轨迹 2 由采样点西南侧附近传输而来,路径最短,占比 74%。21 号采样点同样有来自西南方向的气团传输,该轨迹路径最短,所占比例 65%。因天山北坡总面积仅占新疆 5.7%,人口占全疆总人口 23.3%,是新疆城市最密集的地方,因此当地人类活动和工业活动可能对采样点积雪中砷和汞浓度产生较大影响。较 14 号采样点不同的是,21 号采样点会受到来自蒙古国气团传输的影响。

38 号采样点位于塔城地区,52 号采样点处于伊犁河谷地区,两采样点均位于砷和汞浓度分布较低区域。由图 4(e)可以看出,38 号采样点气团轨迹主要来自四个方向,轨迹 3 起始于俄罗斯经过哈萨克斯坦到达采样点,占比 12%,轨迹 2 由哈萨克斯坦传输而来,占比 37%,轨迹 4 由内蒙古经蒙古国绕过阿勒泰山到达采样点,占比仅 8%,轨迹 1 路径最短,由伊犁河谷附近传输至采样点,途中经过部分城镇可能会携带含砷和汞的污染物,对采样点产生一定影响。图 4(f)是 52 号采样点后向轨迹聚类分析结果,其轨迹大致分为西部和南部两个方向。西北方向的轨迹 2 路径最远,由俄罗斯经哈萨克斯坦传输至采样点,西南方向的轨迹 3 和轨迹 4 分别由吉尔吉斯斯坦和土库曼斯坦东部传输而来,占比分别为

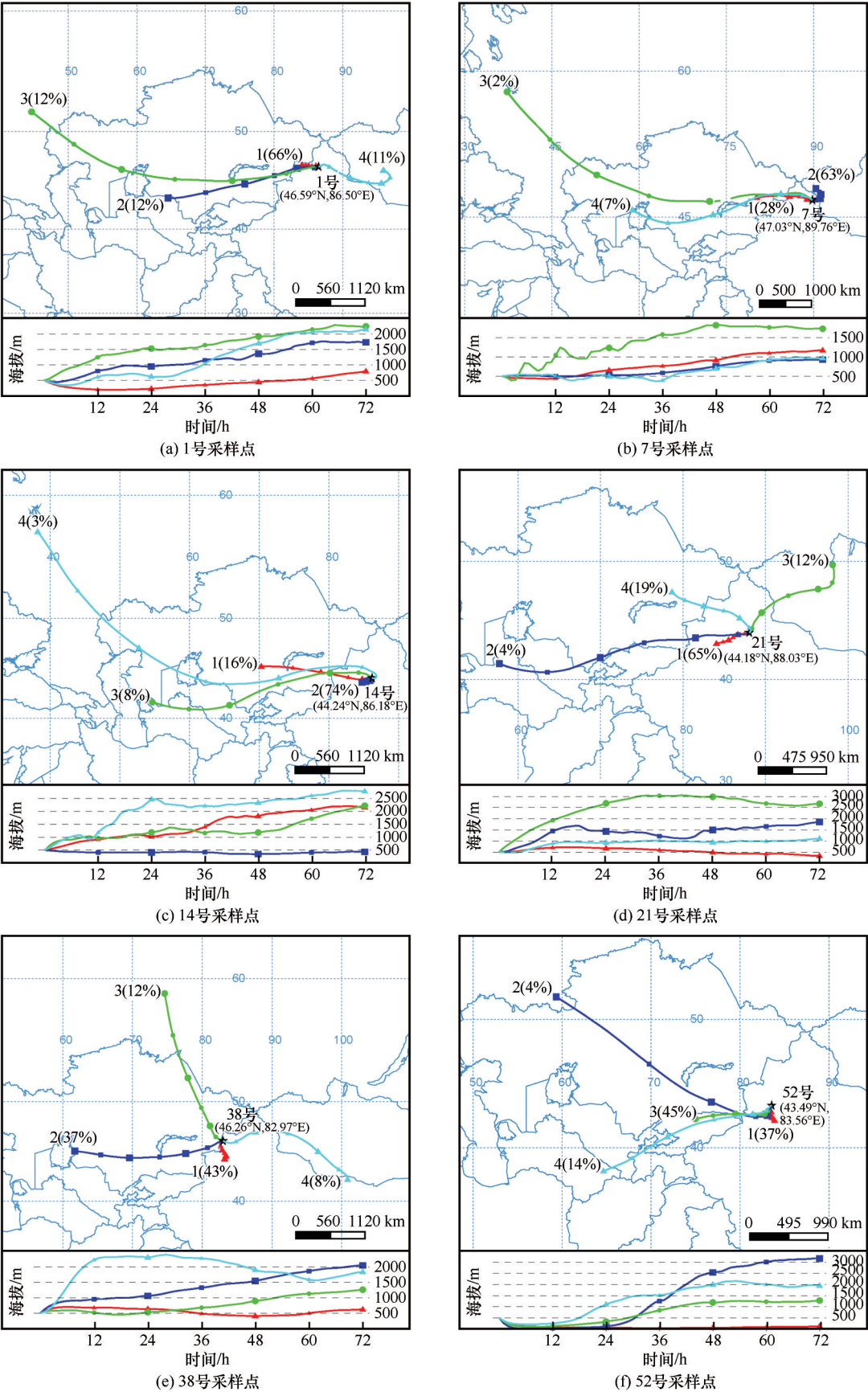


图4 采样点后向轨迹聚类分析结果

Fig. 4 Backward trajectory cluster analysis results of sampling points



45%和14%,吉尔吉斯斯坦工业基础较为薄弱,对采样点可能无太大影响,轨迹1由伊犁河谷附近传输而来,路径最短,占比37%,途径部分城镇,局地污染可能对采样点产生一定影响。

由此可知,各采样点的短距离气团轨迹所占比例较高,研究区受局地活动影响可能较大,这与研究区内工厂企业、城镇分布及独特的地形存在一定关系,由于研究区山脉与盆地相间排列,高山与盆地环绕,使得当地活动产生的污染物不易扩散,最终随大气干湿沉降迁移至地面,进而在积雪中积累。除此之外,来自哈萨克斯坦和蒙古高原等周边国家的远距离传输对积雪中污染物含量可能也会产生一定程度的影响。

### 3 结论

本研究对中国北疆地区积雪中溶解性砷和汞含量进行测定,发现积雪中砷和汞含量均在安全限值之内,变异系数表明人类活动对研究区内砷和汞含量有一定程度的影响。通过对比不同地区的研究结果可以发现,北疆地区积雪中砷和汞含量显著高于偏远地区,但显著低于受人类活动影响较大的发达城市地区。结合北疆地区积雪中砷和汞元素空间分布图可知,积雪中砷和汞含量从西南至东北大致呈低—高一低分布,其中以重工业为主的天山北坡和封闭式的准噶尔盆地浓度分布较高,说明砷和汞污染物分布受当地人类活动和工业活动的影响显著。后向轨迹聚类分析结果表明,研究区各采样点短距离气团传输轨迹所占比例较高,当地生产、生活可能对积雪中砷和汞有重要贡献,此外,来自哈萨克斯坦、蒙古高原和吉尔吉斯等周边国家的远距离气团传输亦会产生一定影响。通过对北疆地区积雪中砷和汞元素空间分布特征和来源的研究,可为当地环境治理提供科学依据。

### 参考文献(References):

- [1] Lahoutifard N, Sparling M, Lean D. Total and methyl mercury patterns in Arctic snow during springtime at Resolute, Nunavut, Canada[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 7597-7606.
- [2] Tyagi P, Yamamoto S, Kawamura K. Hydroxy fatty acids in fresh snow samples from northern Japan: long-range atmospheric transport of Gram-negative bacteria by Asian winter monsoon[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(23): 7071-7080.
- [3] Chen Wenqian, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Black carbon in seasonal snow across northern of Xinjiang[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(1): 83-91. [陈文倩, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆干旱区季节性积雪中黑碳气溶胶研究[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 83-91.]
- [4] Wang Xin, Pu Wei, Zhang Xueying, et al. Water-soluble ions and trace elements in surface snow and their potential source regions across northeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 114: 57-65.
- [5] Zhang Yanyan, Xiu Guangli, Wu Xuefang, et al. Characterization of mercury concentrations in snow and potential sources, Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 449: 434-442.
- [6] Maruszczak N, Larose C, Aurélien D, et al. Total mercury and methyl mercury in high altitude surface snow from the French Alps[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3949-3954.
- [7] Dai Qingyun, He Qianfeng, Liu Daihuan, et al. Progress in research on heavy metals in atmospheric deposition: pollution characteristics and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(3): 56-64. [戴青云, 贺先锋, 刘代欢, 等. 大气沉降重金属污染特征及生态风险研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(3): 56-64.]
- [8] Zahir F, Rizwi S J, Haq S K, et al. Low dose mercury toxicity and human health[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 20(2): 351-360.
- [9] Wang Yuheng, Le Pape P, Morin G, et al. Arsenic speciation in Mekong Delta sediments depends on their depositional environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3431-3439.
- [10] Zhou Houyun, Greig A, You Chen-feng, et al. Arsenic in a speleothem from Central China: stadial-interstadial variations and implications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4): 1278-1283.
- [11] Liu Yajun, Zhang Yulan, Kang Shichang, et al. Characteristics of heavy metal elements deposited on glaciers in the south-eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1200-1211. [刘亚军, 张玉兰, 康世昌, 等. 青藏高原东南部冰川雪冰重金属元素特征[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1200-1211.]
- [12] Hong S M, Lee K, Hou Shugui, et al. An 800-year record of atmospheric As, Mo, Sn, and Sb in central Asia in high-altitude ice cores from Mt. Qomolangma (Everest), Himalayas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8060-8065.
- [13] Ferrari C P, Padova C, Faïn X, et al. Atmospheric mercury depletion event study in Ny-Alesund (Svalbard) in spring 2005: deposition and transformation of Hg in surface snow during springtime[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 397(1/2/3): 167-177.
- [14] Gao Yunchuan, Yang Chao, Ma Jin, et al. Characteristics of the trace elements and arsenic, iodine and bromine species in snow in east-central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 174: 43-53.
- [15] Fortner S K, Berry L W, Olesik J W. Eolian deposition of trace elements onto Taylor Valley Antarctic glaciers[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(11): 1897-1904.
- [16] Gustaytis M A, Myagkaya I N, Chumbaev A S. Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia)[J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 446-459.
- [17] Wu Guanghong, Wei Qi, Sun Conghui, et al. Determination of major and trace elements in snow in Tianjin, China: a three-heating-season survey and assessment[J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2016, 9(6): 687-696.

- [18] Huang Ju, Wu Guangjian, Zhang Xuelei, et al. New insights into particle-bound trace elements in surface snow, Eastern Tien Shan, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115272.
- [19] Liu Yuyan, Liu Cheng, Tian Fangfang, et al. Wet deposition of heavy metals in an arid city [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(3): 1159-1164.
- [20] Huang Xiaodong, Zhang Xuetong, Li Xia, et al. Accuracy analysis for MODIS snow products of MOD10A1 and MOD10A2 in northern Xinjiang area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5): 56-63. [黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区MODIS积雪产品MOD10A1和MOD10A2的精度分析与评价[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 56-63.]
- [21] Habibi R, Alesheikh A, Mohammadinia A, et al. An assessment of spatial pattern characterization of air pollution: a case study of CO and PM<sub>2.5</sub> in Tehran, Iran [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6: 270.
- [22] Luo Nana, An Li, Nara A, et al. GIS-based multielement source analysis of dustfall in Beijing: a study of 40 major and trace elements [J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 123-131.
- [23] Kumar S, Devara P C S, Manoj M G, et al. Winter aerosol and trace gas characteristics over a high-altitude station in the Western Ghats, India [J]. *Atmósfera*, 2011, 24(3): 311-328.
- [24] Du Peng, Li Deping, Liu Jianguo, et al. Pollution characteristics and potential source region analysis of atmospheric particulate matter during 2014 APEC in Beijing suburb [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(10): 3846-3855. [杜朋, 李德平, 刘建国, 等. APEC前后北京郊区大气颗粒物变化特征及其潜在源区分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(10): 3846-3855.]
- [25] Lai A M, Shafer M M, Dibb J E, et al. Elements and inorganic ions as source tracers in recent Greenland snow [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 205-215.
- [26] Sun Shiwei, Kang Shichang, Guo Junming, et al. Insights into mercury in glacier snow and its incorporation into meltwater runoff based on observations in the southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 68: 130-142.
- [27] Carling G T, Fernandez D P, Johnson W P. Dust-mediated loading of trace and major elements to Wasatch Mountain snow-pack [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 432: 65-77.
- [28] Wang Zhangwei, Zhang Xiaoshan, Zhang Yi, et al. Mercury of atmospheric particle PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and snow in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 6: 668-673. [王章玮, 张晓山, 张逸, 等. 北京市大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>及降雪中的汞[J]. *环境化学*, 2004, 6: 668-673.]
- [29] Siudek P, Frankowski M, Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: 225.
- [30] Pan Wei, Yang Degang, Yang Li, et al. Characteristics of industrial structure evolution of Xinjiang from 1952 to 2008 [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 177-185. [潘伟, 杨德刚, 杨莉, 等. 1952-2008年新疆产业结构演进特征分析[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 177-185.]
- [31] Ma Yuxiang, Zhang Junmin, Wang Lihong. City-size distribution and allometric growth in Xinjiang based on fractal theory [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(3): 661-667. [马玉香, 张军民, 王莉红. 基于分形理论的新疆城市规模分布及异速生长特征研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(3): 661-667.]
- [32] Wei Binggan, Jiang Fengqing, Li Xuemei, et al. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China [J]. *Microchemical Journal*, 2009, 93(2): 147-152.
- [33] Zhang Lei, Wang Shuxiao, Wang Long, et al. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(5): 3185-3194.
- [34] Dousova B, Erbanova L, Novak M. Arsenic in atmospheric deposition at the Czech-Polish border: two sampling campaigns 20 years apart [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1/2/3): 185-193.



## Spatial distribution characteristics and possible sources of dissolved arsenic and mercury in the snow pack of northern Xinjiang

LIU Xin<sup>1,2</sup>, NIU Zhiying<sup>1</sup>, LI Yangzi<sup>1</sup>, HE Maoyong<sup>3</sup>, HUANG Huayu<sup>1,2</sup>, WANG Ninglian<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Snow is an important environmental medium and can be used to reflect regional characteristics and to trace sources of air pollution. To understand the spatial distribution and possible sources of arsenic (As) and mercury (Hg) in snow pack, snow pack samples were collected in 58 sample sites from the northern Xinjiang, and dissolved As and Hg concentrations were analyzed using an atomic fluorescence spectroscopy. The spatial distribution pattern was investigated by inverse distance weighted interpolation algorithm, and the possible sources of snow pack As and Hg were tracked by using backward trajectory model. The results indicate that the concentrations of As and Hg were within a range of 0.21 to 2.69  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and 5.32 to 64.09  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The average concentrations of the dissolved As and Hg in the snow samples were  $(0.70\pm0.46) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $(15.94\pm10.49) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. The average concentrations of the dissolved As and Hg are lower than the standard limit of Chinese surface water quality I, indicating that snow pack As and Hg were less polluted. The inverse distance weight analysis shows that snow pack As and Hg had differences patterns in spatial distribution, and the snow pack As and Hg were mainly influenced by the industrial coal combustion and winter heating. Moreover, the higher concentrations of snow pack As and Hg were observed in the Junggar Basin and northern Tianshan slope, due to the domination of heavy industries in the area. The backward trajectory model analysis shows that the regional/local anthropogenic activities and desert sand transport are likely the sources of As and Hg in the snow pack. However, these pollutants in surface snow were less affected by the long-range transport of air pollution. Our study can provide important scientific insights for assessing the quality of remote ecosystems and implementing air pollution control in northern Xinjiang.

**Key words:** snow pack; arsenic; mercury; spatial distribution; northern Xinjiang

(责任编辑: 张强弓; 编辑: 武俊杰)