

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0082

LI Ruochen, SHEN Baoshou, WU Xiaobo, et al. Spatial distribution and source analysis of trace elements in typical mountain glaciers on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1277-1289. [李若晨, 申保收, 武小波, 等. 青藏高原典型山地冰川中痕量元素的空间分布和来源分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1277-1289.]

青藏高原典型山地冰川中痕量元素的空间分布和来源分析

李若晨^{1,2}, 申保收^{1,2}, 武小波³, 杨方社^{1,2}, 郭忠明^{1,2}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院/地表系统与灾害研究院, 陕西 西安 710127; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为了探究青藏高原雪中痕量元素的空间分布与主要来源, 对2019年7—9月在青藏高原七一冰川、八一冰川、岗什卡雪峰、煤矿冰川、玉珠峰冰川、古仁河口冰川以及玉龙雪山白水河1号冰川采集的表雪样酸化后, 利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试了常量元素Al、Fe与痕量元素As、Ba、Co、Cr、Cu、Li、Mn、Mo、Pb、Sr、Tl、Zn、Cd共15种元素的含量, 通过Jonckheere-Terpstra非参数检验分析痕量元素空间分布趋势。结果表明: 中部煤矿冰川和玉珠峰冰川浓度最高, 南部古仁河口冰川和玉龙雪山最低, 东北部3条冰川居中; 本研究与其他研究区关于冰川As、Cu、Pb、Zn、Cd浓度对比的结果显示, 青藏高原冰川中元素含量的空间分布总体趋势为: 中部>北部>南部。富集因子分析表明, Co、Cr、Cu、Tl、Fe、Li、Mn、Mo、Sr元素主要受粉尘输入影响, Pb、Cd、Zn元素受人为源影响较大(例如有色金属冶炼、交通排放、化石燃料燃烧等)。后向轨迹结果表明, 东北部3条冰川主要受东北和西北部地区影响; 中部冰川元素来源复杂, 以青藏高原西部和北部的粉尘输入为主, 且受西部临近煤矿和交通运输影响; 南部冰川主要受南亚和青藏高原西南部地区影响。研究成果将进一步丰富青藏高原雪冰痕量元素数据库, 为评估人类活动对青藏高原大气环境的污染和水源区的潜在环境风险提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 痕量元素; 空间分布; 大气传输

中图分类号: X142; P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1277-13

0 引言

痕量元素主要来源包括自然贡献和人为活动, 近年来随着人类活动的增加, 自然界中痕量元素浓度水平逐年上升, 这种现象引起人们的广泛关注^[1-2]。大量痕量元素的排放会对生态环境和人类健康造成严重影响, 如Pb、Cu、Cd等金属元素具有不可降解性, 随着生物累积效应, 在生物体内累积至一定浓度时具有毒性^[3-5]。痕量元素长期超标排放不仅会污染当地环境, 还能通过大气环流传输, 最终以干湿沉降形式沉积到极地、高山的冰川表层雪中而对该地区产生污染^[6-7]。由于大气中痕量元

素的输入来源、传输途径和停留时间不同, 导致不同区域的雪冰中元素组成和浓度水平可能存在较大差异^[8]。因此, 高原和极地等自然环境较为纯净地区的雪冰中所含有的痕量元素可作为一种指示剂, 反映气候变化和人类活动对区域环境的影响^[9-11]。此外, 高海拔地区的冰雪可以储存大气污染信息。早在2000年前后, 就有很多学者对高原与极地地区冰川中的痕量元素进行了相关研究^[12-16]。最初, 人们只研究了局部地区雪冰记录的Pb、Zn、Cd等元素所反映的大气污染问题, 后来更多的痕量元素被研究^[17-18], 研究范围也逐渐由局部区域向更

收稿日期: 2021-07-08; 修订日期: 2021-10-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020102); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2021JQ-451; 2020JQ-575)资助

作者简介: 李若晨, 硕士研究生, 主要从事环境水化学研究。E-mail: liruochen@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 申保收, 副教授, 主要从事环境水化学与环境材料研究。E-mail: bschen@nwu.edu.cn

大范围扩展^[19]。

由于青藏高原海拔高,位置偏远,野外取样工作难度大,因此痕量元素相关研究相对其他区域较少。目前,已有研究对青藏高原地区的唐古拉山小冬克玛底冰川^[6,18,20-21]、希夏邦马峰达索普冰川^[12,22]、七一冰川^[17,20]、东昆仑山煤矿冰川^[18,20,23]、老虎沟冰川^[6]、南部枪勇冰川^[24]、玉龙雪山等^[25-26]雪冰中痕量元素进行了报道。通过大气传输模型和地球化学手段发现,来自邻近地区(如南亚和中亚)的人为污染物对高原环境产生了深刻的影响^[27-28]。然而,以往的研究大多局限在青藏高原的局部区域,对该地区痕量元素总体的时空分布特征和来源分析研究较少。

本研究选取了青藏高原东北、中部、东南、南部地区共计7条冰川,从2019年7月底至9月中旬采集冰川表层雪样,对常量元素Al、Fe与痕量元素As、Ba、Co、Cr、Cu、Li、Mn、Mo、Pb、Sr、Tl、Zn、Cd共15种元素的浓度进行了检测。为了明确这7条冰川痕量元素的空间分布差异,通过对比不同冰川痕量元素的平均浓度和标准偏差,得出基本的痕量元素空间分布趋势并以此作出假设:(1)东北部冰川:岗什卡雪峰≥七一冰川≥八一冰川;(2)中部冰川:煤矿冰川≥玉珠峰冰川;(3)南部冰川:玉龙雪山白水河1号冰川≥古仁河口冰川;(4)研究区冰川总体:中部≥东北部≥南部,使用非参数Jonckheere–Terpstra检验验证假设,确定空间分布的差异性,并结合后向轨迹进行来源分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

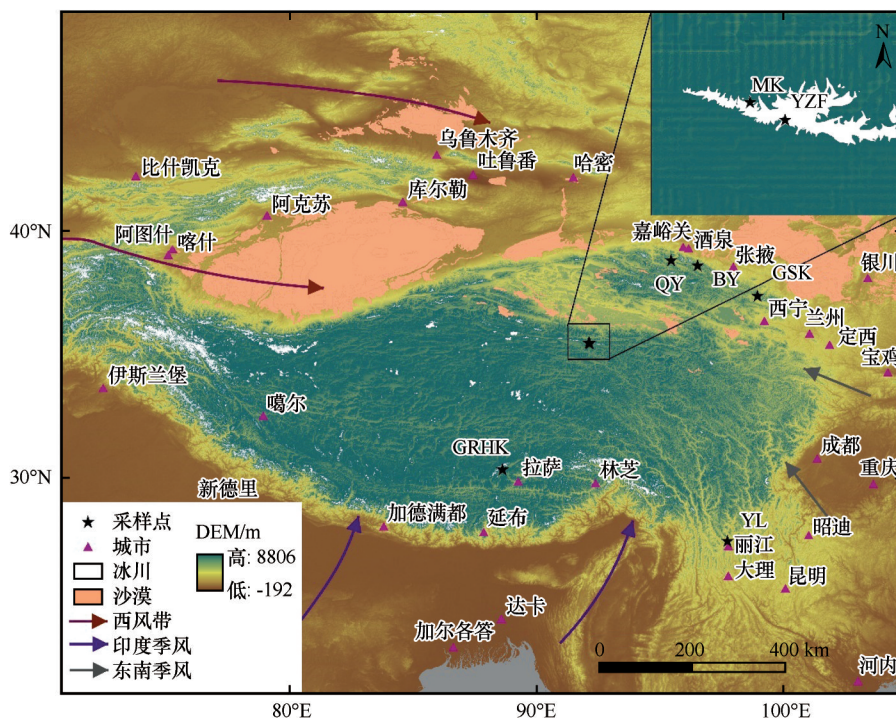
青藏高原地处北纬26°~39°之间,平均海拔4 500 m以上,受西风带以及东亚季风、南亚季风等大气环流影响^[29]。夏季湿润,降水可占全年的60%以上,冬季干旱,降水不足10%^[30]。青藏高原夏季降水由东北向西南递减,年平均气温由东南向西北递减^[31-33]。研究区东北部的几条冰川,包括七一冰川(Qiyi Glacier, QY)、八一冰川(Bayi Glacier, BY)和岗什卡雪峰(Gangshka Snow Peak, GSK)位于祁连山脉的中东部,具有典型的大陆性气候,夏季同时受西风带、高原季风和东亚季风的影响,东部偏南风,西部偏北风^[34-35]。中部的昆仑山脉,气候高寒,主要受西风带影响,向南则西风带影响渐弱,南部念青唐古拉山脉和东南部玉龙雪山在季风期受到印度季风和南亚季风的影响强烈,大气环流带来大量南亚地区的气团输入^[26,34-35]。研究区包括青藏高原东北部祁连山脉的七一冰川、八一冰川和岗什卡雪峰,中部东昆仑山煤矿冰川(Meikuang Glacier, MK)、玉珠峰冰川(Yuzhufeng Glacier, YZF),南部念青唐古拉山古仁河口冰川(Gurenkekou Glacier, GRHK)以及位于东南部玉龙雪山白水河1号冰川(Yulong Snow Mountain, YL),共计7条冰川(表1,图1)。

1.2 样品的采集与检测

2019年7月底至9月中旬,研究人员身穿洁净

表1 采样点信息
Table 1 Information of sampling sites

冰川	采样日期	样品数目/个	坐标	海拔/(m a. s. l.)	样品类型
七一冰川 (QY)	2019-08-28	5	39°14. 165'~39°14. 374' N; 97°45. 374'~97°45. 398' E	4 623~4 668	表层雪样
八一冰川 (BY)	2019-08-27	9	39°0. 664'~39°1. 249' N; 98°52. 982'~98°54. 146' E	4 592~4 818	表层雪样
岗什卡雪峰 (GSK)	2019-08-24	6	37°41. 832'~37°42. 032' N; 101°29. 244'~101°29. 520' E	4 548~4 649	表层雪样
煤矿冰川 (MK)	2019-09-04	7	35°40. 180'~35°40. 215' N; 94°11. 123'~94°11. 252' E	5 067~5 085	表层雪样
玉珠峰冰川 (YZF)	2019-09-05	7	35°38. 715'~35°39. 032' N; 94°13. 588'~94°13. 854' E	5 345~5 442	表层雪样
古仁河口冰川 (GRHK)	2019-09-10	7	30°11. 323'~30°11. 438' N; 90°27. 084'~90°27. 292' E	5 617~5 707	表层雪样
玉龙雪山 (YL)	2019-07-25—27	13	27°5. 864'~27°6. 182' N; 100°11. 400'~100°11. 688' E	4 628~4 787	表层雪样



注: 研究区域为青藏高原内部的山地冰川。采样点共7处, 包括青藏高原东北部的七一冰川 (QY), 八一冰川 (BY), 岗什卡雪峰 (GSK); 中部的煤矿冰川 (MK), 玉珠峰冰川 (YZF) (左上角局部放大图); 南部的古仁河口冰川 (GRHK) 以及东南部玉龙雪山白水河1号冰川 (YL)。DEM底图中灰色部分为无数据区域

图1 研究区域及采样点

Fig. 1 The location of the study area and sampling sites of the mountain glaciers in the Qinghai-Tibet Plateau. The seven mountain glaciers include Qiyi Glacier (QY), Bayi Glacier (BY) and Gangshka Snow Peak (GSK) in the northeastern region; Meikuang Glacier (MK) and Yuzhufeng Glacier (YZF) in the central region (please note the inserted figure for the specific glacier in the upper and right corner); and Gurenhekou Glacier (GRHK) in the southern region and Baishuihe Glacier No.1 of Yulong Snow Mountain (YL) in the southeastern region. The gray part is no data area in the DEM base map

工作服佩戴双层聚乙烯(PE)手套完成对青藏高原东北、中部、东南部、南部共计7条冰川积累区表层0~5 cm深度雪样的采集, 共计采集样品54个, 采样点详细信息见表1。使用超清洁的广口低密度聚乙烯瓶(LDPE)沿冰川不同海拔高度采集冰川表层(0~5 cm)雪样。其中, 所有与样品接触的材料均完成了Liu等^[36]所描述的清洁过程。所得样品在冻结状态下被运送至西北大学陕西省地表系统与环境承载力实验室保存在-18℃的冷库内, 直至样品进行前处理时方可取出。所有样品均在室温下融化, 然后向样品中加入超纯HNO₃使最终浓度为1%(V/V), 以起到酸化样品的效果, 酸化时间为31天^[37]。酸化后再经过过滤, 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对常量元素Al、Fe与微量元素As、Ba、Co、Cr、Cu、Li、Mn、Mo、Pb、Sr、Tl、Zn、Cd共15种元素的浓度进行检测。

测样前通过测试经过认证的标准河水参考物质SLRS-5(National Research Council Canada, Otta-

wa, Canada)来评估测试方法的准确性和精密性, 以酸化空白溶液中痕量元素信号强度标准偏差的3倍对应的浓度值作为检出限, 检测结果如表2所示。SLRS-5的测量结果中, 除Li、Tl元素无参考数据, Fe元素测量值略高于参考值, Mo元素略低于参考值外, 其余元素测量值与参考值之间具有较好的一致性, 且各元素测量结果精度较好, 相对标准偏差均小于10%。

1.3 统计分析及计算

通过对青藏高原7条冰川痕量元素浓度平均值(标准偏差)的比较, 确定研究区痕量元素空间分布的总体趋势。由于本研究数据并不呈现正态分布, 适宜采用非参数检验来评估验证研究区痕量元素分布趋势。其中, Jonckheere-Terpstra检验在多个独立样本非参数检验中能反映多个独立样本是否具有持续上升或下降的趋势, 因此更适用于本研究的实际情况。通过Jonckheere-Terpstra非参数检验对根据冰川平均浓度分布趋势做出的假设进行验证,

表2 各元素检出限及SLRS-5测量值与参考值

Table 2 Element detection limit, standard value and measured value of SLRS-5

元素	检出限/(ng·g ⁻¹)	SLRS-5		
		参考值/(ng·g ⁻¹)	测量值/(ng·g ⁻¹)	相对标准偏差/%
Al	0.0663	49.5±5.0	48.792±0.893	1.83
As	0.0023	0.413±0.039	0.435±0.012	2.83
Ba	0.0022	14.0±0.5	14.091±0.385	2.73
Co	0.0018	0.05	0.062±0.001	1.85
Cr	0.1485	0.208	0.227±0.005	2.30
Cu	0.0092	17.4±1.3	17.108±0.292	1.71
Fe	2.6869	91.2±5.8	115.38±2.093	1.81
Li	0.0015	—	—	—
Mn	0.0085	4.33±0.18	4.089±0.077	1.88
Mo	0.0013	0.5	0.236±0.007	3.13
Pb	0.0014	0.081±0.006	0.111±0.003	2.52
Sr	0.0005	53.6±1.3	51.268±1.238	2.42
Tl	0.0000	—	—	—
Zn	0.0697	0.845±0.095	0.986±0.316	3.21
Cd	0.0006	0.0060±0.0014	0.0092±0.0008	8.60

检验趋势是双尾的,显著性水平 α 为0.05。如果检验结果双尾渐进显著性 $P>0.05$ 则假设不成立,组间无显著性差异;如果 $P<0.05$,则假设成立,痕量元素分布存在空间差异性。因此,通过Jonckheere-Terpstra非参数检验可以确定研究区不同冰川各元素空间分布的差异性。

通过富集因子(Enrichment factors, EF)可以得出某种元素相对于地壳的富集程度从而判断该元素的主要来源是人为源还是自然源。本研究以Li等^[38]研究得到的青藏高原表层土壤中的元素组合作为参考物质,以地壳元素Al作为参考元素,计算不同元素的 EF 值,进而比较各冰川不同元素的平均 EF 值,计算公式如下:

$$EF = \frac{(\frac{C_X}{C_{Al}})_{sample}}{(\frac{C_X}{C_{Al}})_{soil}} \tag{1}$$

式中: X 为目标分析元素; $(C_X/C_{Al})_{sample}$ 指样品中的 X 元素与Al元素的浓度比值; $(C_X/C_{Al})_{soil}$ 指参考物质即青藏高原颗粒 $<20\mu m$ 表层土壤组分中 X 元素与Al元素的浓度比值。 EF 大小代表污染程度及污染源的不同,一般认为当 $EF<10$ 时,元素的来源主要为陆源粉尘或其他非粉尘的自然源;当 $EF>10$ 时,表示元素中度富集; $EF>100$ 表示元素高度富集;后两种情况均表明研究区受不同程度人类活动影响^[39-40]。

为了确定研究区痕量元素的潜在源区,我们使用HYSPLIT(Hybrid single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型,结合全球气象再分析资料(Reanalysis Data),对采样当日前一个月到达采样点上方500 m处的气流的72 h后向轨迹进行了模拟,每隔6 h计算一次,每天计算4个时间(02:00、8:00、14:00、20:00,北京时间),并对模拟出的所有轨迹进行了聚类,从而获得研究区痕量元素的潜在来源。

2 结果与讨论

2.1 研究区冰川积雪中的痕量元素浓度

图2显示了7条冰川15种元素的平均值和标准偏差。对比7条冰川中痕量元素的平均浓度发现,不同元素之间浓度相差几个数量级,其中Al、Fe和Mn元素浓度在各个冰川雪样中均相对较高,而Mo和Tl相对较低。7条冰川痕量元素的平均浓度呈现明显的空间异质性。通过对比不同冰川痕量元素的平均浓度和标准偏差(图2),得到7条冰川痕量元素的空间分布的基本趋势并据此作出假设,采用Jonckheere-Terpstra非参数检验进行验证分析,最终明确7条冰川痕量元素的空间分布特点(表3)。

Jonckheere-Terpstra非参数检验的结果表明,青藏高原东北部地区3条冰川痕量元素的浓度水平整体呈现岗什卡雪峰 \geq 七一冰川 \geq 八一冰川($J-T<0$; $P<0.05$, Ba、Mo和Sr除外)。中部地区的煤矿冰川和

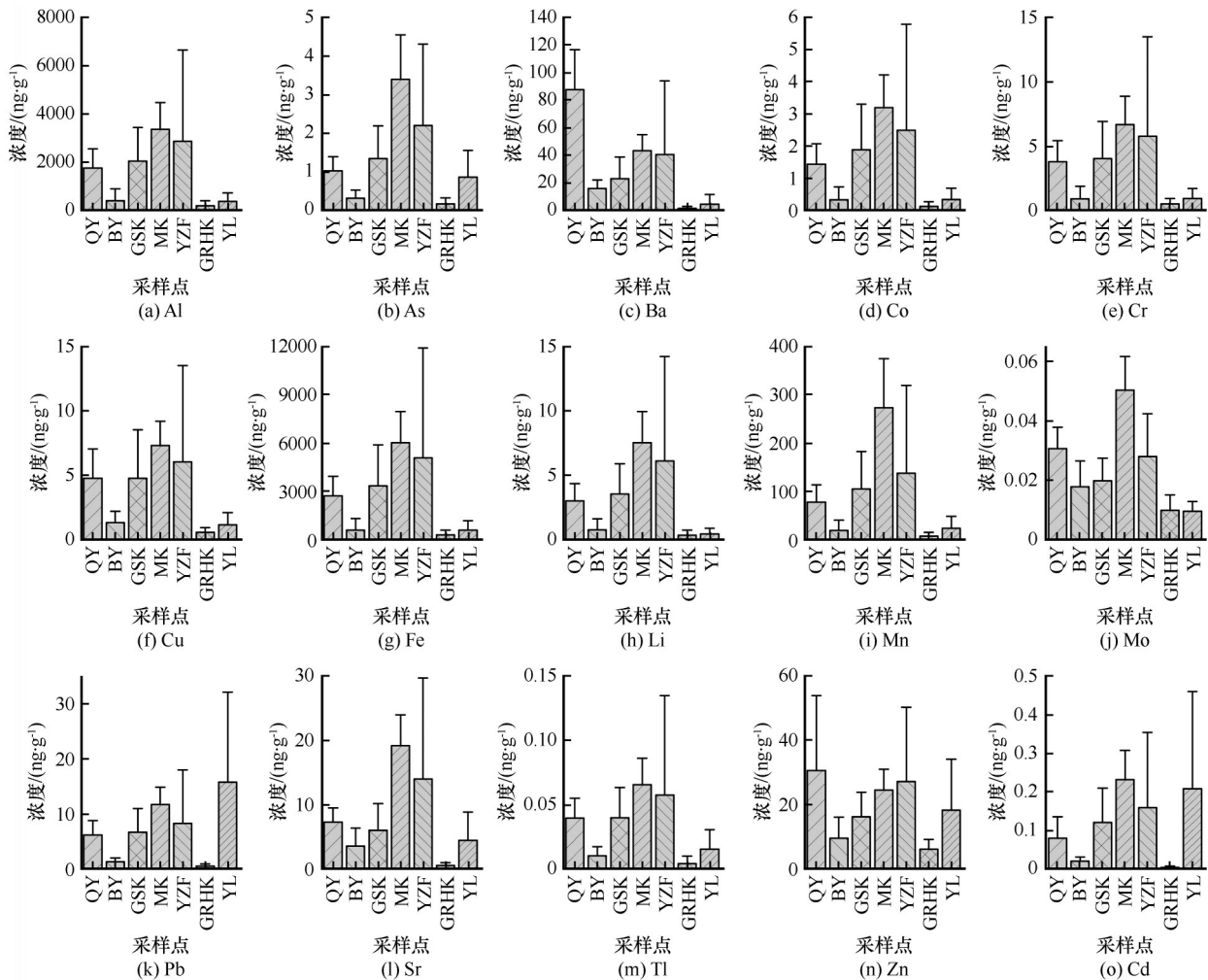


图2 7条冰川雪样中痕量元素的浓度(与标准偏差)分布

Fig. 2 Trace element concentrations and standard deviations in seven glaciers

玉珠峰冰川中痕量元素浓度水平整体无显著差异($P > 0.05$),除Mn、Mo和Sr元素呈现出煤矿冰川 \geq 玉珠峰冰川($J-T < 0; P < 0.05$)的空间分布。青藏高原南部地区冰川中As、Pb、Sr、Tl、Zn和Cd元素的浓度水平均呈现出玉龙雪山白水河1号冰川 \geq 古仁河口冰川($J-T < 0; P < 0.05$)的空间分布,其他元素无显著差异($P > 0.05$)。总体而言,青藏高原山地冰川中的痕量元素浓度水平分布除Pb外,均表现为中部 \geq 东北部 \geq 南部($J-T < 0; P < 0.05$)。

2.2 与其他研究区的痕量元素浓度比较

研究区7条冰川与青藏高原其他冰川及周边地区典型痕量元素(As、Cu、Pb、Zn、Cd)浓度进行对比(表4),发现所有冰川中As的浓度分布较为均匀,处于同一个量级。例如,煤矿冰川和玉珠峰冰川与青藏高原中部求勉雷克冰川的As、Cu、Pb浓度水平相当,在青藏高原地区元素浓度较高,而同样处于青藏高原中部地区的小冬克玛底冰川痕量元素浓

度却较低,这可能因为该冰川样品在非季风期采集且地理位置远离亚洲粉尘源^[18]。北部的七一冰川、八一冰川和岗什卡雪峰的Cu、Pb、Zn浓度高于北部的老虎沟12号冰川和天山庙尔沟冰川,这可能与天山庙尔沟冰川和老虎沟12号远离人类聚集区,周边没有明显的污染源有关。古仁河口冰川与玉龙雪山白水河1号冰川与同处于南部的德木拉冰川、仁龙巴冰川、东嘎冰川、枪勇冰川和珠穆拉玛峰北坡的痕量元素浓度基本处于同一水平,除了玉龙雪山的Pb、Zn、Cd浓度水平明显高于南部其他冰川,这可能与其紧邻城市的人类活动影响有着一定的联系。

将青藏高原冰川分为3个区域进行比较:中部(包括煤矿冰川、玉珠峰冰川、求勉雷克冰川和小冬克玛底冰川),北部(包括七一冰川、八一冰川、岗什卡雪峰、老虎沟12号冰川以及庙尔沟冰川),南部(包括古仁河口冰川、玉龙雪山、德木拉冰川、仁龙

表3 研究区7条冰川表层雪中痕量元素的统计数据

Table 3 Statistical data of trace elements both in the surface snow and snow pit samples of the five studied glaciers												
痕量元素	冰川							J-T ^a 标准统计 值与P ^a 值	J-T ^b 标准统计 值与P ^b 值	J-T ^c 标准统计 值与P ^c 值	J-T ^d 标准统计 值与P ^d 值	
	岗什卡 雪峰	七一 冰川	八一 冰川	煤矿 冰川	玉珠峰 冰川	古仁河 口冰川	玉龙 雪山					
Al*	2 047. 824	1 758. 858	410. 856	3 370. 741	2 864. 005	200. 386	384. 256	-2. 77; 0. 006	-1. 60; 0. 110	-1. 55; 0. 122	-4. 74; <0. 001	
As	1. 345	1. 028	0. 324	3. 400	2. 201	0. 175	0. 866	-3. 05; 0. 002	-1. 73; 0. 085	-2. 97; 0. 003	-3. 46; 0. 001	
Ba	23. 022	87. 587	16. 055	43. 443	40. 696	1. 629	4. 531	-0. 737; 0. 461	-1. 47; 0. 142	-1. 78; 0. 075	-6. 41; <0. 001	
Co	1. 893	1. 437	0. 336	3. 199	2. 490	0. 134	0. 349	-2. 77; 0. 006	-1. 73; 0. 085	-1. 86; 0. 063	-5. 09; <0. 001	
Cr	4. 026	3. 781	0. 910	6. 687	5. 770	0. 515	0. 933	-2. 63; 0. 009	-1. 60; 0. 110	-1. 47; 0. 143	-4. 83; <0. 001	
Cu	4. 767	4. 780	1. 337	7. 321	6. 053	0. 562	1. 163	-2. 63; 0. 009	-1. 73; 0. 085	-1. 70; 0. 088	-4. 74; <0. 001	
Fe*	3 339. 000	2 722. 490	599. 941	6 039. 311	5 094. 016	288. 475	595. 523	-2. 70; 0. 007	-1. 60; 0. 110	-1. 70; 0. 088	-4. 82; <0. 001	
Li	3. 554	3. 017	0. 768	7. 539	6. 118	0. 356	0. 455	-2. 77; 0. 006	-1. 73; 0. 085	-1. 15; 0. 251	-5. 61; <0. 001	
Mn	105. 195	77. 705	19. 117	273. 247	138. 019	7. 288	23. 829	-2. 70; 0. 007	-2. 11; 0. 035	-1. 94; 0. 052	-5. 26; <0. 001	
Mo	0. 020	0. 031	0. 018	0. 050	0. 028	0. 010	0. 010	-0. 59; 0. 551	-2. 36; 0. 018	-0. 119; 0. 905	-6. 11; <0. 001	
Pb	6. 729	6. 224	1. 409	11. 782	8. 322	0. 561	15. 801	-3. 40; 0. 001	-1. 85; 0. 064	-3. 61; <0. 001	-1. 85; 0. 066	
Sr	6. 067	7. 335	3. 607	19. 191	14. 058	0. 598	4. 511	-1. 79; 0. 074	-1. 98; 0. 048	-3. 05; 0. 002	-5. 56; <0. 001	
Tl	0. 040	0. 040	0. 011	0. 066	0. 058	0. 005	0. 016	-2. 91; 0. 004	-1. 60; 0. 110	-2. 02; 0. 043	-4. 09; <0. 001	
Zn	16. 380	30. 741	9. 719	24. 686	27. 294	6. 296	18. 435	-1. 72; 0. 086	-0. 575; 0. 565	-2. 42; 0. 016	-2. 00; 0. 046	
Cd	0. 122	0. 081	0. 021	0. 232	0. 160	0. 005	0. 209	-3. 68; <0. 001	-1. 73; 0. 085	-3. 61; <0. 001	-2. 66; 0. 008	

注：使用Jonckheere-Terpstra非参数检验来评估不同组间的趋势（ $P>0.05$ ，各组间无统计学差异； $P<0.05$ （粗体），各组之间有显著增加或减少的趋势；J-T标准统计值是计量组间差异的统计值，J-T的绝对值越大，组间差异越大， P 值越小。a：假设研究区东北部雪样中痕量元素含量空间分布趋势为岗什卡雪峰 \geq 七一冰川 \geq 八一冰川；b：假设研究区中部雪样中痕量元素含量空间分布趋势为煤矿冰川 \geq 玉珠峰冰川；c：假设研究区南部雪样中痕量元素含量空间分布趋势为玉龙雪山白水河1号冰川 \geq 古仁河口冰川；d：假设研究区雪样中痕量元素含量总体空间分布趋势为中部（煤矿冰川和玉珠峰冰川） \geq 东北部（岗什卡雪峰，七一冰川和八一冰川） \geq 南部（玉龙雪山白水河1号冰川和古仁河口冰川）；第一列标有*的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，其他单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表4 与其他研究区关于As、Cu、Pb、Zn、Cd平均浓度的比较

Table 4 Comparison the averaged concentrations of As, Cu, Mo, Pb, and Sb in this study with data reported for other regions									
冰川/地区	年份	海拔高度 /(m a. s. l.)	样品类型	浓度/(ng·g ⁻¹)					数据 来源
				As	Cu	Pb	Zn	Cd	
七一冰川	2019年	4 623~4 668	表层雪	1. 028	4. 78	6. 224	30. 741	0. 081	本文
八一冰川	2019年	4 592~4 818	表层雪	0. 324	1. 337	1. 409	9. 713	0. 021	本文
岗什卡雪峰	2019年	4 548~4 649	表层雪	1. 345	4. 767	6. 729	16. 380	0. 122	本文
煤矿冰川	2019年	5 067~5 085	表层雪	3. 400	7. 321	11. 782	24. 686	0. 232	本文
玉珠峰冰川	2019年	5 345~5 442	表层雪	2. 201	6. 053	8. 322	27. 294	0. 160	本文
古仁河口冰川	2019年	5 617~5 707	表层雪	0. 175	0. 562	0. 561	6. 300	0. 005	本文
玉龙雪山	2019年	4 628~4 787	表层雪	0. 866	1. 163	15. 801	18. 435	0. 209	本文
老虎沟 12 号冰川	2018 年	4 260~5 483	表层雪	0. 390	0. 350	0. 018	0. 940	0. 005	[17]
庙尔沟冰川(天山)	2018 年	3 840~4 512	表层雪	2. 250	1. 400	0. 004	0. 087	0. 015	[17]
求勉雷克冰川	2013 年	5 228~5 423	表层雪	1. 873	12. 145	6. 088	—	—	[18]
小冬克玛底冰川	2013 年	5 714	表层雪	0. 317	0. 682	0. 034	—	—	[18]
德木拉冰川	2015 年	5 002~5 111	表层雪	—	0. 290	0. 066	7. 433	0. 002	[41]
仁龙巴冰川	2015 年	4 818~4 847	表层雪	—	0. 060	0. 092	0. 160	0. 002	[41]
东嘎冰川	2015 年	4 570~4 650	表层雪	—	0. 100	0. 221	6. 705	0. 004	[41]
枪勇冰川	2008—2009 年	6 100	雪坑	—	1. 604	1. 502	4. 576	0. 002	[24]
珠穆拉玛峰北坡	2005 年	6 500~8 844	表层雪	0. 183	0. 343	0. 005	2. 032	—	[42]

巴冰川、东嘎冰川、枪勇冰川以及珠穆拉玛峰北坡)。因为冰川数量并不是很大,研究仍采用Jonckheere-Terspstra 检验以评估这3类数据之间的趋势。Jonckheere-Terspstra 检验结果为,As(J-T=-4. 354,

$P < 0.001$), Cu ($J-T = -5.852$, $P < 0.001$), Pb ($J-T = -3.248$, $P = 0.001$), Zn ($J-T = -3.521$, $P < 0.001$), Cd ($J-T = -3.886$, $P < 0.001$), 说明这 5 种典型元素在青藏高原地区冰川雪冰中的浓度从中部到北部和南部呈递减趋势, 这与本研究痕量元素浓度空间分布趋势基本一致。

2.3 痕量元素富集特征

冰川积雪中的痕量元素主要是由自然或人为源的相应元素经过长距离大气传输, 最终通过干湿沉降进入冰川。痕量元素的自然源主要包括粉尘、火山喷发、森林大火等^[43], 人为源则主要包括工业排放、煤炭开采、化石燃料燃烧等, 通过富集因子的大小可以大致判断出某元素相对于地壳的富集程

度, 从而推断其主要来源。研究区 7 条冰川中不同痕量元素 EF 值的计算结果如图 3 所示。总体而言, 7 条冰川的 Co、Cr、Cu、Tl、Fe、Li、Mn、Mo、Sr 元素的 EF 值均小于 10, 表明这些元素均未发生明显富集, 其来源以自然源输入为主。祁连山脉的 3 条冰川的 Pb 和 Cd 元素的 EF 值均大于 10, 七一冰川和八一冰川中 Zn 元素 EF 值显示大于 10, 说明在两条冰川中 Pb、Cd、Zn 这 3 种元素均以人为输入为主。此外, 八一冰川中大多数元素的富集因子均高于七一冰川, 说明八一冰川受人类活动影响更大。七一冰川和八一冰川 Pb、Zn、Cd 元素显著富集可能与镜铁山矿区、周围城市以及省道国道的人类活动影响有关。

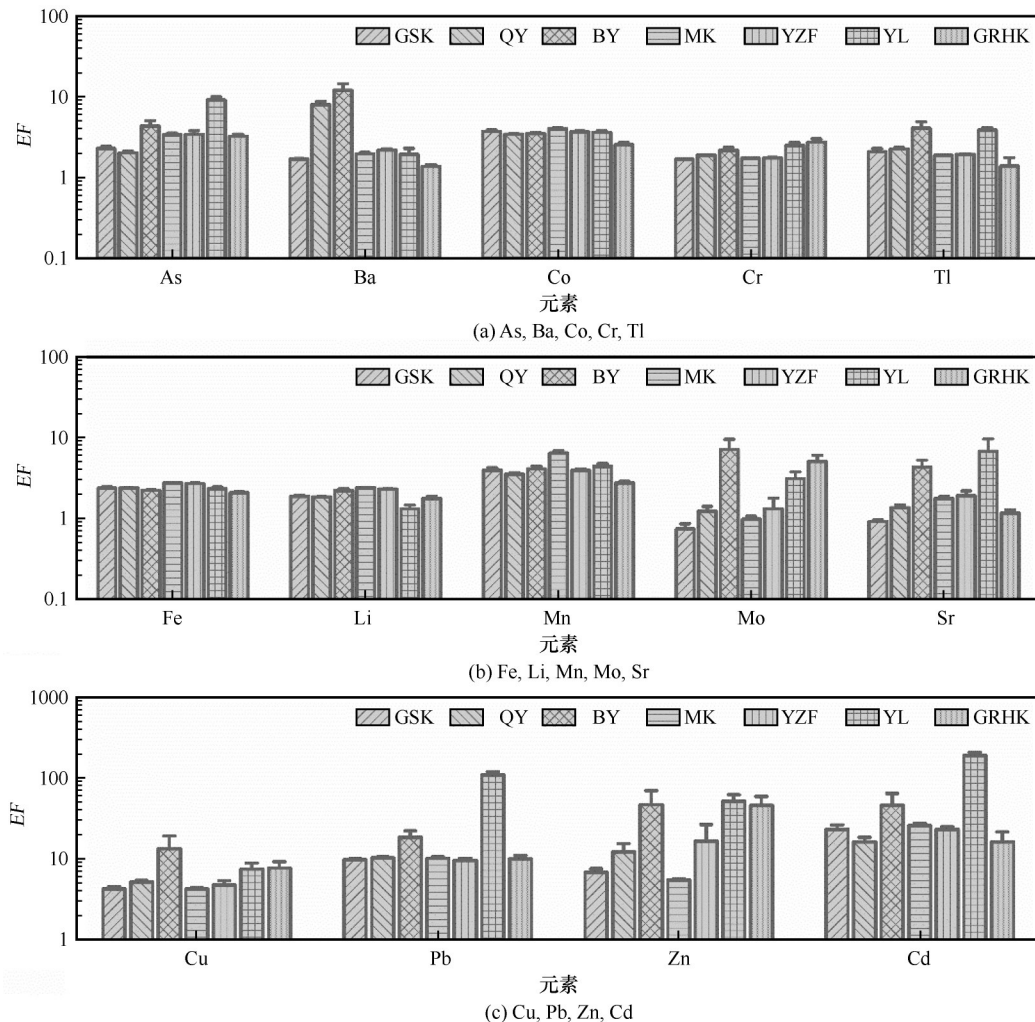


图3 7条冰川中痕量元素的富集因子和标准偏差

Fig. 3 The EF values with standard deviations of trace elements of seven glaciers

中部煤矿冰川和玉珠峰冰川的痕量元素浓度虽然都较高, 但 EF 值却在 7 条冰川中总体偏低, 说明中部地区冰川受人为排放影响较小。中部冰川

只有 Cd 元素的富集因子远大于 10, 表明 Cd 元素显著富集, 以人为源的输入贡献为主; Pb 元素的 EF 分别为 10.2 和 9.7, 说明有轻微富集; 此外, 玉珠峰冰

川Zn元素富集因子 EF 的平均值为16.7,呈现显著富集,而煤矿冰川Zn元素并未富集。南部念青唐古拉山脉的古仁河口冰川的痕量元素平均浓度和 EF 值都相对较低,但Zn元素的 EF 高达50,Zn的显著富集可能与有色金属矿的开采与冶炼活动有关;古仁河口冰川表层雪样品中Pb和Cd元素的 EF 值在10上下,有一定程度的人为源贡献。玉龙雪山白水河1号冰川中除Pb、Zn和Cd之外,其他元素浓度均相对较低,然而 EF 值在研究区的7条冰川中总体偏高,尤其是Pb、Zn、Cd的 EF 值均高于50,较高的富集程度可能与该冰川靠近丽江等人类聚集区,受局地人为活动的影响较大有关。此外,白水河1号冰

川As元素的 EF 值约为10,呈轻度富集,这可能与玉龙雪山地区周边地区的人为输入有一定的关系^[44]。

地壳元素的 EF 值与Al浓度的变化无关,而人为源元素则随着Al浓度的增加而减少^[40]。图4呈现了 EF 值与Al的关系。结果显示,Fe和Mn等地壳元素的 EF 值相对于Al元素浓度的变化呈现离散分布,线性拟合结果显示正相关。此外,Co和Li元素也具有类似特点,说明主要为自然粉尘贡献,与上文结论一致。而Pb、Zn、Cd元素的 EF 值与Al负相关,进一步印证了人为源输入对于其贡献占主导。

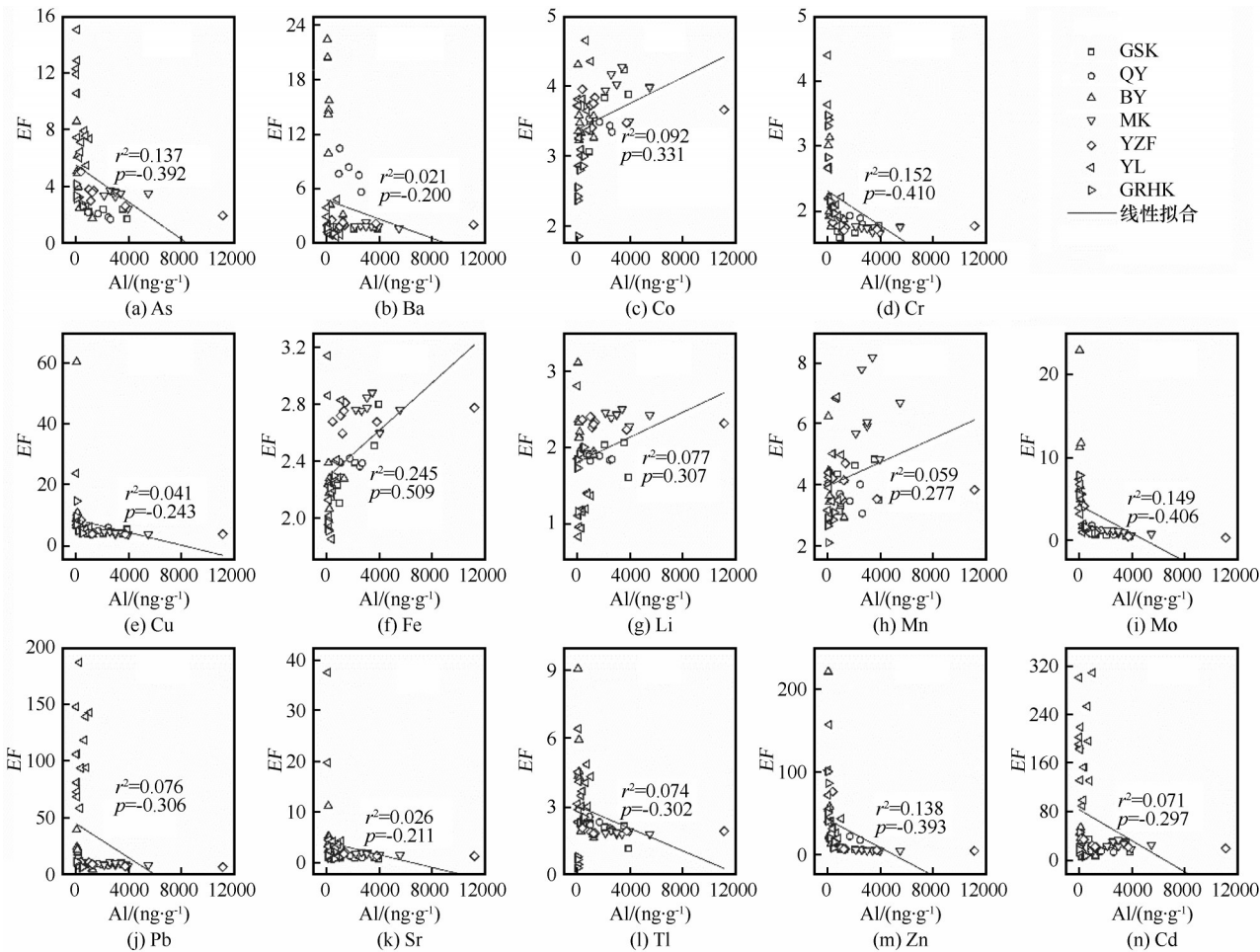


图4 7条冰川元素富集因子与Al浓度变化关系曲线(r 为线性相关系数, p 为皮尔逊相关系数)
Fig. 4 The relationship between element enrichment factor and Al concentration in seven glaciers
(r is linear correlation coefficient, p is Pearson correlation coefficient)

根据 EF 数据综合分析得知,青藏高原地区受人类活动影响较大的元素主要包括Pb、Zn和Cd。一般而言,大气中大部分痕量元素的主要来源相对固定。其中,Zn和Cd主要来自有色金属冶炼、矿区

开采等工业排放和日常交通排放^[45]。2000年含铅汽油禁用后,燃煤和金属冶炼成为大气Pb元素的主要来源。大气中的污染物通过远距离传输和干湿沉降沉积到青藏高原冰川表雪中,在青藏高原的不

同区域有着不同程度的富集。

2.4 痕量元素的潜在源区及空间差异分析

为了明确痕量元素的潜在源区,我们对研究区7条冰川的72 h后向轨迹进行了模拟聚类(图5)。结果表明,不同冰川的气团来源和传输路径存在显著差异。七一冰川和八一冰川位于祁连山中段,主要受西风环流控制,夏季受东南季风影响,七一冰川北部紧邻嘉峪关、酒泉等城市,受到新疆准格尔盆地、哈顺戈壁、内蒙古巴吉林沙漠以及乌兰布和沙漠等的粉尘输入影响;八一冰川则主要受到周边公路交通、东北临近地区,包括张掖市以及内蒙古

东南部地区的影响,同时来自西北方向新疆地区的粉尘输入也有一定的贡献[图5(a)、5(b)]。2.1和2.3小节显示七一冰川和八一冰川虽地理位置临近,痕量元素浓度和 EF 值均有显著差异。痕量元素浓度水平的差异可能与七一冰川和八一冰川局地环流模式的差异性有关。七一冰川位于祁连山北坡,处于迎风坡面,西风环流和东南季风所带来的气团相对于地处祁连山中段南坡且位于西风带下风向的八一冰川更易沉积,因此呈现出七一冰川痕量元素浓度大于八一冰川。此外,后向轨迹显示,来自东北、西北部方向的大量气团大都形成于

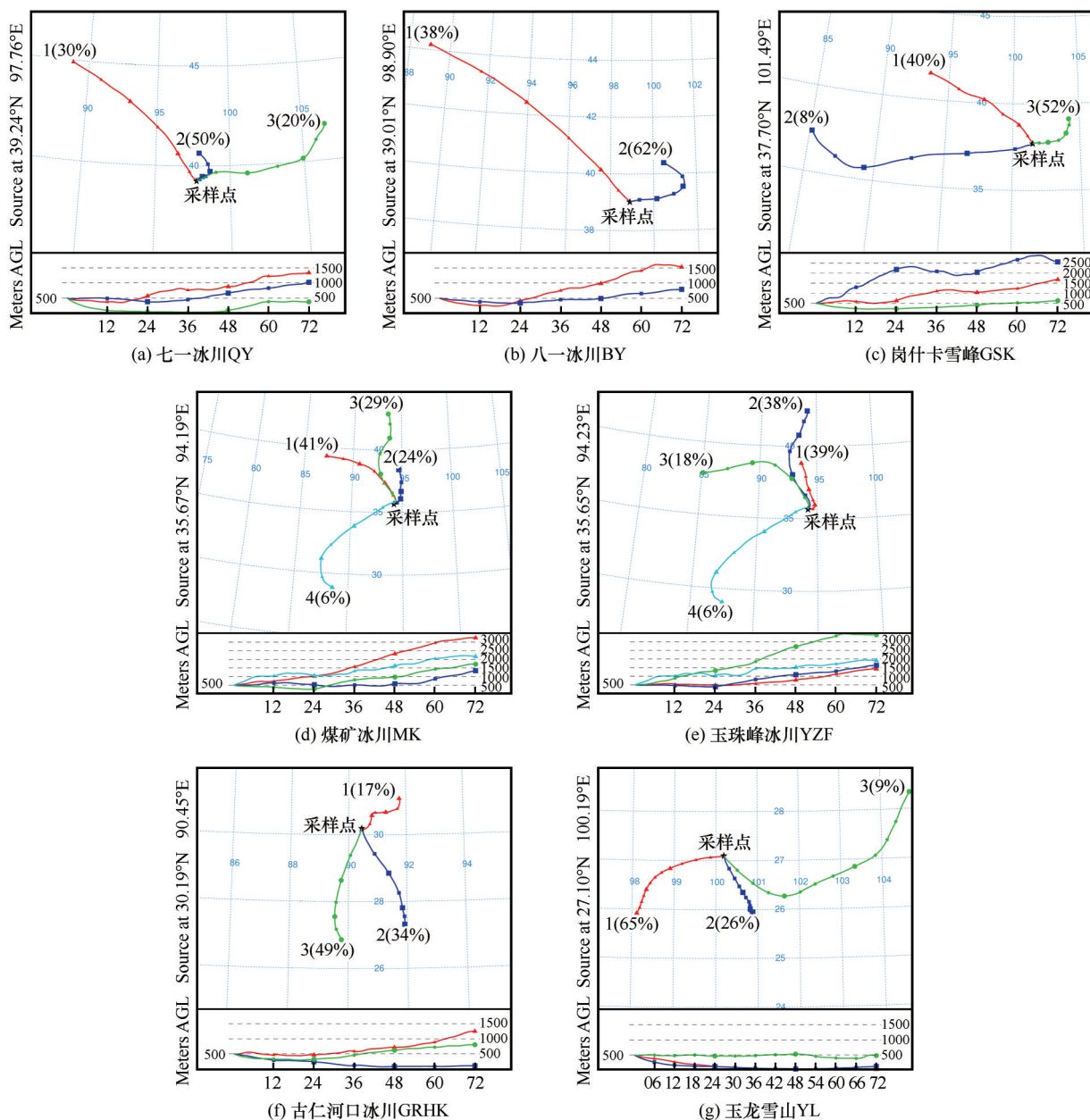


图5 7条典型山地冰川72 h后向轨迹图

Fig. 5 The cluster analyses of 72 hours backward air trajectories in seven glaciers

沙漠、戈壁等地区,说明七一冰川较高的元素含量主要由自然源贡献的,这也可能是七一冰川雪冰中痕量元素的人为源贡献率相对八一冰川更低的重要原因。岗什卡雪峰位于祁连山脉最东南端,主要受东亚季风影响,同时受西风带作用[图5(c)],其输入气团大多来自东北部的腾格里沙漠、河西走廊地区以及西部塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地,总体痕量元素浓度较高;且其距离227国道、煤矿区以及河西走廊部分城市较近,车辆道路磨损、燃料的使用、矿物开采以及人类日常活动都可能是Pb、Cd元素的潜在来源。

煤矿冰川和玉珠峰冰川位于东昆仑山,由于地理位置临近,其所受气团影响相似,主要受西风环流绕行北支气流控制,受季风影响较小[图5(d)、5(e)]。中部冰川痕量元素浓度虽然最高,但是地壳富集因子(除了Cd)较低,说明此处以自然源输入为主,又因地处内陆,故以粉尘输入为主。结合后向轨迹推断粉尘源可能来自北部柴达木盆地、新疆库木塔格沙漠、哈顺戈壁以及西部塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠。此外,位于煤矿冰川和玉珠峰冰川西部临近的煤矿可能是Cd的重要潜在输入源^[46],而附近的青藏铁路、公路的交通运输排放可能是Pb元素轻微富集的主要原因^[47];紧邻玉珠峰冰川的109国道的交通运输排放可能是玉珠峰冰川Zn元素富集的主要原因。而煤矿冰川相比玉珠峰冰川地理位置偏西,因此受到来自西部库木塔格沙漠的粉尘输入和煤矿开采的人为源影响更大,造成煤矿冰川的总体痕量元素浓度水平与EF值均略大于玉珠峰冰川。

南部的古仁河口冰川主要受印度季风影响,输入气团来自西南和东南方向[图5(f)]。此冰川表层雪样的痕量元素浓度最低,但是Pb、Cd尤其是Zn元素的富集程度较高,说明其具有显著人为来源。此冰川地处青藏高原南部,临近拉萨市,其周边存在有色金属冶炼活动,这可能是Zn和Cd元素的重要来源;同时古仁河口冰川紧邻青藏铁路,青藏铁路带来的交通源污染可能是导致Pb元素轻度富集的潜在原因^[47]。此外,印度、尼泊尔、不丹等南亚国家由于化石和生物质燃料的大量使用,已成为世界上最大的人为大气污染排放源之一,可通过大气传输对青藏高原南部地区产生较大影响^[6,48-49]。东南部的玉龙雪山白水河1号冰川与其他冰川相比,Pb、Zn和Cd元素的浓度水平以及富集因子都相对较

高,表明其受人类活动影响较大。该地区季风期主要受西南季风、东南季风影响,缅甸等南亚国家的气团输入是造成人为源元素浓度增加的主要原因[图5(g)]。此外,白水河1号冰川临近丽江等人口密集区,而且周围遍布公路、铁路,人为污染以及交通运输也是该地区痕量元素的潜在人为来源^[26,44]。

青藏高原冰川中痕量元素的总体分布趋势为中部冰川最高,北部次之,南部最低。结合后向轨迹分析发现,这种空间差异与中部地区受强烈西风环流影响带来的大量自然源沙尘输入有关。夏季西风的南支绕行气流减弱,南亚季风增强,高原的西风环流北移,中北部地区受西风环流带来的大量来自西部的气团输入影响增强^[34]。总体而言,中部地区受西风环流影响最大,北部次之,南部最弱,这与冰川中痕量元素的分布趋势一致;东南部地区玉龙雪山地区受西风带影响较弱,但紧邻丽江市等人口密集区域,受人类活动影响相对古仁河口冰川较大,因此该地区冰川痕量元素浓度水平较低但富集因子较高;古仁河口冰川的痕量元素浓度水平在研究区的7条冰川中最低,可能与其地处青藏高原南部,主要受印度季风的影响,而西风环流的影响微弱。

3 结论

(1)青藏高原范围内7条冰川表层雪中Al、Fe、Mn等粉尘源元素含量最高,其他元素含量较低。空间分布上,多数痕量元素在青藏高原中部煤矿冰川和玉珠峰冰川浓度最高,东北部3条冰川次之,东南部玉龙雪山白水河1号冰川较低,南部古仁河口冰川最低,Jonckheere-Terpstra非参数检验的结果也证明了这一结论。

(2)15种元素中,多数元素未显示富集,仅Pb、Zn、Cd元素富集较为严重,Pb、Zn、Cd元素的EF值与Al浓度呈现一定的反比趋势也证明了这一点。青藏高原东北部祁连山脉的3条冰川中,八一冰川的Pb、Zn、Cd元素的富集因子显著大于七一冰川和岗什卡雪峰,说明存在明显的人为来源;青藏高原中部昆仑山系的煤矿冰川、玉珠峰冰川元素浓度较高,富集因子却明显较低,说明痕量元素的主要来源为自然源;东南部玉龙雪山白水河1号冰川样品中Pb、Zn、Cd元素的EF值明显较大,表明受人为活动影响显著;南部古仁河口冰川元素浓度与EF值都相对较低,而Pb、Zn、Cd元素有一定程度的富集。

(3)大气后向轨迹结果显示,七一和八一冰川都受西风环流控制,痕量元素输入源主要来自东北和新疆西北部等地,岗什卡雪峰主要受来自东北部腾格里沙漠以及河西走廊气团输入的影响,元素来源以自然源输入为主;中部煤矿和玉珠峰冰川气团来源复杂,痕量元素以青藏高原西部和北部的自然源粉尘输入为主;古仁河口冰川和玉龙雪山主要受西南和东南气团输入影响,其中古仁河口冰川距离拉萨市较近,除了可能受到局地人为活动的影响之外,其周围矿山开采、交通源和南亚地区人为输入也是痕量元素可能的潜在来源;玉龙雪山除了南亚地区输入性影响之外,同时紧邻丽江等人口密集区,受人类活动影响大,导致Pb、Zn、Cd等元素浓度水平和富集程度都较高。

参考文献(References):

- [1] Candelone J-P, Hong S, Pellone C, et al. Post-Industrial Revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metals as documented in central Greenland snow and ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D8): 16605-16616.
- [2] Barbante C, Gabrieli J, Gabrielli P, et al. A historical record of heavy metal pollution in alpine snow and ice[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 71-94.
- [3] 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: 1-9.
- [4] Huang Jie, Kang Shichang, Zhang Qiangong, et al. Atmospheric deposition of trace elements recorded in snow from the Mt. Nyainqentanglha region, southern Tibetan Plateau[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(8): 871-881.
- [5] Lee C S L, Li Xiangdong, Zhang Gan, et al. Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China: evidence of the long-range transport of air contaminants[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 432-447.
- [6] Dong Zhiwen, Kang Shichang, Qin Xiang, et al. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 529: 101-113.
- [7] Kyllonen K, Karlsson V, Ruoho-Airola T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2260-2269.
- [8] Tripathee L, Kang S, Jie H, et al. Concentrations of trace elements in wet deposition over the central Himalayas, Nepal[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95(oct.): 231-238.
- [9] Tuohy A, Bertler N, Neff P, et al. Transport and deposition of heavy metals in the Ross Sea Region, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(20): 10,996-11,011.
- [10] Singh S M, Sharma J, Gawas-Sakhalkar P, et al. Atmospheric deposition studies of heavy metals in Arctic by comparative analysis of lichens and cryoconite[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(2): 1367-1376.
- [11] Xiao Cunde, Qin Dahe, Yao Tandong, et al. Spread of lead pollution over remote regions and upper troposphere: glaciochemical evidence from polar regions and Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 66(6): 691-698.
- [12] Huo Wenmian, Yao Tandong, Li Yuefang. Air pollution and isotopic evidences reflected in the pb records in the dassault ice core[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(2): 125-128. [霍文冕, 姚檀栋, 李月芳. 达索普冰芯中Pb记录反映的大气污染及其同位素证据[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(2): 125-128.]
- [13] Li Yuefang, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. The concentrations of Cd and Pb in ice core from Malan Glacier, Qinghai[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 194-196. [李月芳, 姚檀栋, 王宁练, 等. 可可西里马兰冰川冰芯中Cd和Pb的浓度[J]. *环境化学*, 2002, 21(2): 194-196.]
- [14] Li Yuefang, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Atmosphere pollution revealed by cadmium in the Guliya ice core[J]. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(2): 176-180. [李月芳, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原古里雅冰芯中痕量元素镉记录的大气污染: 1900—1991[J]. *环境化学*, 2000, 19(2): 176-180.]
- [15] Bortron C F, Candelone J P, Hong S. Greenland snow and ice cores: unique archives of large-scale pollution of the troposphere of the Northern Hemisphere by lead and other heavy metals[J]. *Science of the total environment*, 1995, 160: 233-241.
- [16] Van de Velde K, Bortron C F, Ferrari C P, et al. A two hundred years record of atmospheric cadmium, copper and zinc concentrations in high altitude snow and ice from the French-Italian Alps[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(2): 249-252.
- [17] Wei Ting, Dong Zhiwen, Kang Shichang, et al. Atmospheric deposition and contamination of trace elements in snowpacks of mountain glaciers in the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 689: 754-764.
- [18] Huang Ju, Li Yuefang, Li Zhen, et al. Spatial variations and sources of trace elements in recent snow from glaciers at the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(8): 7875-7883.
- [19] Macdonald K M, Sharma S, Toom D, et al. Observations of atmospheric chemical deposition to high Arctic snow[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(9): 5775-5788.
- [20] Huang Ju, Li Yuefang, Li Zhen. Spatial distribution and pollution assessment of trace elements in the surface snow of five glaciers on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(7): 1506-1515. [黄菊, 李月芳, 李真. 青藏高原五条冰川表雪中痕量元素的空间分布及污染评估[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1506-1515.]
- [21] Xiong Longfei, Li Yuefang, Li Zhen. Comparative study of trace elements in snow pit from Xiaodongkemadi Glacier in Tanggula Mountain based on two sample preparation method[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(3): 520-528. [熊隆飞, 李月芳, 李真. 基于两种样品前处理方法对比研究小冬克玛底冰川雪坑中痕量元素[J]. *环境化学*, 2015, 34(3): 520-528.]
- [22] Huo Wenmian, Yao Tandong, Li Yuefang. The Pb record in the ice core at 7 000 m reveals that the pollution of human activities is increasing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(9): 978-981. [霍文冕, 姚檀栋, 李月芳. 7 000 m处冰芯中Pb记录揭示人类活动污染在加剧[J]. *科学通报*, 1999, 44(9): 978-981.]

- [23] Xiao Cunde, Qin Dahe, Yao Tandong, et al. Global Air pollution reflected by Pb and Cd in modern precipitation in the South, Arctic and Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(23): 2558-2563. [效存德, 秦大河, 姚檀栋, 等. 南、北极和青藏高原现代降水中Pb、Cd反映的全球大气污染[J]. 科学通报, 1999, 44(23): 2558-2563.]
- [24] Li Yuefang, Tian Lide, Shi Xiaolan, et al. The composition characteristics and environmental significance of trace elements in the firn core of Qiangyong Glacier, southern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Geochimica, 2012, 41(2): 181-187. [李月芳, 田立德, 时晓兰, 等. 青藏高原南部枪勇冰川雪冰中痕量元素的组成特征及其环境意义[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 181-187.]
- [25] Pu Tao, Kong Yanlong, Kang Shichang, et al. New insights into trace elements in the water cycle of a karst-dominated glacierized region, southeast Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141725.
- [26] Jiao Xiaoyu, Dong Zhiwen, Kang Shichang, et al. New insights into heavy metal elements deposition in the snowpacks of mountain glaciers in the eastern Tibetan Plateau [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: 111228.
- [27] Li Chaoliu, Chen Pengfei, Kang Shichang, et al. Fossil fuel combustion emission from South Asia influences precipitation dissolved organic carbon reaching the remote Tibetan Plateau: isotopic and molecular evidence [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(11): 6248-6258.
- [28] Zhang Yulan, Kang Shichang, Cong Zhiyuan, et al. Light-absorbing impurities enhance glacier albedo reduction in the southeastern Tibetan plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(13): 6915-6933.
- [29] Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(3): 73-87. [李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 73-87.]
- [30] Li Jian, Yu Rucong, Zhou Tianjun. Teleconnection between NAO and climate downstream of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate, 2008, 21(18): 4680-4690.
- [31] Liang Jingjing, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Drought evolution characteristics on the Tibetan Plateau based on daily standardized precipitation evap-otranspiration index [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1100-1109. [梁晶晶, 张勃, 马彬, 等. 基于日值SPEI的青藏高原干旱演变特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1100-1109.]
- [32] Duan Lijun, Shen Hongyan, Yu Di, et al. Study on water vapor conditions of precipitation on the Tibetan Plateau during rainy season [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1-9. [段丽君, 申红艳, 余迪, 等. 青藏高原雨季降水的水汽条件研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1-9.]
- [33] Zhang Yuxin, Li Yu, Zhu Gengrui. The effects of altitude on temperature, precipitation and climatic zone in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 505-515. [张宇欣, 李育, 朱耿睿. 青藏高原海拔要素对温度、降水和气候型分布格局的影响[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 505-515.]
- [34] Yao Tandong, Thompson L, Yang Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.
- [35] Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaoqin, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and Indian monsoon on Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 976-984. [姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 976-984.]
- [36] Liu Yaping, Hou shugui, Li Yuefang, et al. The acid-cleaning method of labwares for analysis of ultra low concentration heavy metals in Antarctic and Arctic snow and ice samples [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 1007-1012. [刘亚平, 侯书贵, 李月芳, 等. 极地雪冰样品超痕量重金属分析实验器具的酸洗方法. 冰川冻土, 2008, 30(6): 1007-1012.]
- [37] Koffman B G, Handley M J, Osterberg E C, et al. Dependence of ice-core relative trace-element concentration on acidification [J]. Journal of Glaciology, 2017, 60(219): 103-112.
- [38] Li Chaoliu, Kang Shichang, Zhang Qianggong. Elemental composition of Tibetan Plateau top soils and its effect on evaluating atmospheric pollution transport [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8-9): 2261-2265.
- [39] Hans Wedepohl K. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [40] Al-Momani I. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(32): 4507-4515.
- [41] Zhang Yulan, Kang Shichang, Chen Pengfei, et al. Records of anthropogenic antimony in the glacial snow from the southeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 131: 62-71.
- [42] Kang Shichang, Zhang Qianggong, Kaspari S, et al. Spatial and seasonal variations of elemental composition in Mt. Everest (Qomolangma) snow/firn [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(34): 7208-7218.
- [43] Nriagu J O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals [J]. Nature, 1989, 338(6210): 47-49.
- [44] Zhang Ningning, Cao Junji, Ho K, et al. Chemical characterization of aerosol collected at Mt. Yulong in wintertime on the southeastern Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2012, 107: 76-85.
- [45] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust [J]. Environment International, 2004, 30(8): 1009-1017.
- [46] Huang Cuilan, Pu Jianchen. The features of cations within glacier ice, snow and river water in the district of Xidatan Meikuang glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(3): 283-8. [皇翠兰, 蒲健辰. 西大滩煤矿冰川区冰川冰、雪和河水的阳离子特征[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 283-288.]
- [47] Zhang Hua, Wang Zhaofeng, Zhang Yili, et al. The effects of the Qinghai-Tibet Railway on heavy metals enrichment in soils [J]. Science of the Total Environment, 2012, 439: 240-248.
- [48] Salam A, Hossain T, Siddique M N A, et al. Characteristics of atmospheric trace gases, particulate matter, and heavy metal pollution in Dhaka, Bangladesh [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2008, 1(2): 101-109.
- [49] Lelieveld J, Crutzen P J, Ramanathan V, et al. The Indian Ocean experiment: widespread air pollution from south and southeast Asia [J]. Science, 2001, 291(5506): 1031-1036.

Spatial distribution and source analysis of trace elements in typical mountain glaciers on the Qinghai-Tibet Plateau

LI Ruochen^{1,2}, SHEN Baoshou^{1,2}, WU Xiaobo³, YANG Fangshe^{1,2}, GUO Zhongming^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences/Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to explore the spatial distribution and main sources of trace elements in the snow and ice of the Qinghai-Tibet Plateau, the surface snow samples at a depth of 0~5 cm collected from the Qiyi Glacier, Bayi Glacier, Gangshika Glacier, Meikuang Glacier, Yuzhufeng Glacier, Gurenhekou Glacier, and Baishuihe Glacier No. 1 of Yulong Snow Mountain on the Qinghai-Tibet Plateau from July to September 2019 were analyzed to determine the concentrations of fifteen elements (Al, As, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Pb, Sr, Tl, Zn, Cd). The spatial distribution trend of these trace elements was presented by Jonckheere-Terpstra non-parametric test. The results showed that the Meikuang Glacier and the Yuzhufeng Glacier in the central region had the highest concentration of trace elements, while the lowest concentrations were identified in the Gurenhekou Glacier and the Baishuihe Glacier No. 1 of Yulong Snow Mountain in the southern region. We compared the concentrations of As, Cu, Pb, Zn and Cd with other glaciers in the study area, and the elemental distribution generally showed the decrease trend of Central>Northern>Southern regions on Qinghai-Tibet Plateau. Enrichment factor analysis showed that Co, Cr, Cu, Tl, Fe, Li, Mn, Mo and Sr were mainly affected by dust input, while Pb, Cd and Zn were more affected by anthropogenic sources (i. e. non-ferrous metal smelting, traffic emissions and fossil fuel combustion). The backward trajectory indicated that the three glaciers in the northeastern region were mainly affected by the air mass originated from northeastern and northwestern regions. The air mass source of the central glaciers was mainly from the dust input from the western and northern Qinghai-Tibet Plateau, which was influenced by the nearby coal mines. The two southern glaciers were mainly influenced by South Asia and the southwestern part of the Qinghai-Tibet Plateau. This research could expand the trace element database of snow and ice on the Qinghai-Tibet Plateau, providing scientific understanding for assessing the pollution of the Qinghai-Tibet Plateau's atmospheric environment derived from human activities and the potential environmental risks of water source areas.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; trace elements; spatial distribution; atmospheric transport

(责任编辑: 张强弓; 编辑: 周成林)