

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0363

ZHANG Yuxuan, WANG Ninglian, WU Xiaobo, et al. Study on chemical composition of snowpack in southeast and southwest of Tibetan Plateau in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):18-30. [张榆萱, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原东南和西南部冬季积雪化学组成研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):18-30.]

## 青藏高原东南和西南部冬季积雪化学组成研究

张榆萱<sup>1,2</sup>, 王宁练<sup>1,2,3</sup>, 武小波<sup>4</sup>, 杨雪雯<sup>1,2</sup>, 李瑶<sup>5</sup>, 方振祥<sup>1,2</sup>

(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 青藏高原研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 5. 中山大学 大气科学学院, 广东 广州 519082)

**摘要:** 根据2021年1月在青藏高原东南和西南部所采集的73个积雪样,通过测定积雪中氢氧稳定同位素和可溶性无机离子,结合主成分分析和Hysplit后向轨迹分析,揭示了干季氢氧稳定同位素( $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ )分馏特征及水汽迁移对积雪剖面化学组分变化的影响,讨论了氢氧稳定同位素与气候的关系和可溶性无机离子组成及来源。结果表明:整个研究区积雪大气水线为 $\delta D=7.86\delta^{18}O+11.8$  ( $R^2=0.95$ ),接近拉萨冬季大气水线,且东南部大气水线斜率和截距略低于西南部; $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 波动分别介于 $-178.11‰$ ~ $-68.07‰$ 和 $-23.80‰$ ~ $-9.61‰$ ,  $d$ -excess值波动范围为 $11.03‰$ ~ $23.49‰$ ,表现为冬季 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 低值,高 $d$ -excess值;雪坑表层相对富集重同位素,同位素值高于下层雪样,且积雪内部的水汽迁移使得分层雪样的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 关系曲线的斜率出现差异;主要可溶性无机离子浓度序列为 $Ca^{2+}>SO_4^{2-}>Na^+>NO_3^->Cl^->K^+>Mg^{2+}>NH_4^+$ ,其中 $Ca^{2+}$  (42.47%)、 $SO_4^{2-}$  (23.53%)分别在阳、阴离子中占比最大,且东南部离子浓度平均值高于西南部;主成分分析结果显示,陆源是积雪中离子的主要来源, $NH_4^+$ 和部分 $NO_3^-$ 与人类活动有关;后向气团轨迹显示,水汽来源与高空西风环流控制的水汽输送有关,且离子大多为冬季西风所携带的陆源矿物粉尘。

**关键词:** 青藏高原; 积雪; 氢氧稳定同位素; 无机离子

中图分类号: P426.63<sup>+</sup>5; P597<sup>+</sup>.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2023)01-0018-13

## 0 引言

雪冰是高海拔地区大气中各种物质重要的存储器,记录着大量反映气候和环境变化的化学信息<sup>[1-2]</sup>,氢氧稳定同位素( $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ )和可溶性无机离子(主要包括: $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $NH_4^+$ )是雪冰化学研究的重要指标。积雪表面不断接收着各种大气成分的干湿沉降,将大气中的化学物质带至地球表面,参与生物地球化学循环,且雪融水也是丰富的淡水资源<sup>[3-5]</sup>。同时,积雪消融时所释放的化学组分可能对陆地和水生生态系统产生重要影响<sup>[6]</sup>。因此,了解积雪中化学物质的含量、来源及其在积雪中的次生变化等问题,对我国西部冰

冻圈气候环境演变过程中人为和自然影响因素的综合评估以及物质在各圈层之间的迁移转化有着重要意义。

氢氧稳定同位素是自然水体的重要指标,被广泛用于区分水文循环的各种组成部分,对气候环境变化的响应极为敏感<sup>[7-10]</sup>。降雪事件发生后,随着沉积过程的发生,积雪中的氢氧稳定同位素也会发生一系列变化,因而扰乱了雪坑中同位素的垂直分布。过去对青藏高原地区积雪同位素信息的提取进行过广泛的研究,也取得了显著成果。例如,周石桥等<sup>[11]</sup>通过对七一冰川降水和冰川表面粒雪氢氧稳定同位素进行分析,发现雪坑剖面的 $d$ -excess值与 $\delta^{18}O$ 呈明显正相关;康世昌等<sup>[12]</sup>对珠穆朗玛峰

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-06-04

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020102)资助

作者简介: 张榆萱, 硕士研究生, 主要从事雪冰中氢氧同位素的研究. E-mail: 13795858945@163.com

通信作者: 王宁练, 教授, 主要从事冰冻圈与全球变化研究. E-mail: nlwang@nwnu.edu.cn

和希夏邦马峰的新雪、老雪以及定日站夏季降水进行氢氧稳定同位素分析,发现在夏季风期间高山冰川区和低海拔地区降水中的氢氧稳定同位素值是相似的,而水汽源地和气团轨迹的差异可能是定日站降水中  $d\text{-excess}$  值远低于珠穆朗玛峰新雪中  $d\text{-excess}$  值的原因。但过去的研究主要集中在能够较好保存同位素信息的冰川区<sup>[13-16]</sup>。由于积雪的消融会使其记录的环境信息发生显著变化,所以探究积雪中氢氧稳定同位素变化为获取青藏高原不同时期积雪后沉积过程的信息提供了平台。

积雪是部分积雪区区域内河流的主要补给水源,积雪中的污染物极有可能威胁到人体健康,而对积雪化学组分的研究是判断大气污染物来源的重要途径。由于局地的大气环流和地理环境存在一定差异,不同区域雪冰中的主要离子来源和特征也有所不同<sup>[17]</sup>。之前的研究指出,青藏高原雪冰中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  主要由中亚干旱地区的大气粉尘控制,远高于世界其他偏远地区的背景浓度值<sup>[18]</sup>。所以,了解积雪的化学组成对反映区域尺度的大气环境状况及污染程度至关重要<sup>[19]</sup>。

近年来,极地地区以及高海拔地区冰川化学特征研究备受关注,例如,南极洲<sup>[20]</sup>、北极地区<sup>[21]</sup>、阿尔卑斯山<sup>[22]</sup>、喜马拉雅山<sup>[23]</sup>等地,但对积雪中化学组分和积雪化学性质的研究非常有限<sup>[24]</sup>。因此,本文以青藏高原东南和西南部为研究区,通过冬季积雪样品采集与分析,讨论该区域雪层中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  与气候的关系以及与水汽迁移相联系的雪变质问题,

分析干季氢氧稳定同位素分馏特征以及积雪中可溶性无机离子的主要特征和来源,揭示不同因子对干季积雪化学成分变化影响程度,为了解青藏高原地区积雪的化学组分提供重要数据支撑。

## 1 研究区概况

青藏高原平均海拔在 4 000 m 以上<sup>[25]</sup>,是世界上海拔最高的高原,被视为南北极之外的“地球第三极”。青藏高原高原地形复杂,南起喜马拉雅山脉南缘,北至昆仑山-祁连山,东部有唐古拉山和横断山脉,西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉。此外,青藏高原也是亚洲主要河流的发源地,素有“亚洲水塔”之称。受地形、地貌和大气环流的影响,青藏高原气候复杂多样。总体上呈西北寒冷干燥,东南温暖湿润的特征,年平均气温由东南的 20 °C,向西北递减至 -6 °C 以下。1 月的平均气温为 -17 °C,且日较差变幅在 12~20 °C,是典型的高原大陆性气候。青藏高原的旱季和雨季区分明显,一般每年 10 月至翌年 4 月为旱季,5 月至 9 月为雨季,年降水量为 400 mm 左右<sup>[26-27]</sup>。

青藏高原是我国主要的积雪区之一,除去藏北高原和柴达木盆地,稳定区积雪面积约 230 万平方公里<sup>[28]</sup>。高原内积雪空间分布不均,主要分布在四周山区,其中以唐古拉山和念青唐古拉山积雪面积最大<sup>[29]</sup>。青藏高原东南和西南部地区积雪的采样点如图 1 所示,东南部主要位于念青唐古拉山脉东段,西南部主要位于喜马拉雅山西段沿线地区。由

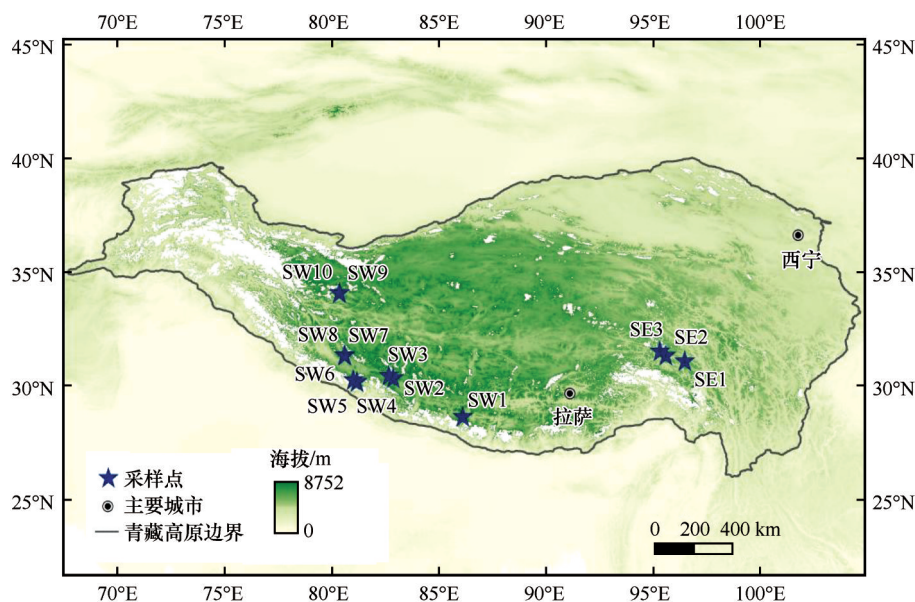


图1 研究区采样点示意图,SE和SW分别为东南部和西南部

Fig. 1 Location map of sampling points in the study area, SE and SW are southeast and southwest respectively

于冬季青藏高原气温较低且降水量较少,积雪发生淋溶的可能性减小,因此较好地保存了该时段的环境信息。本研究所采用的青藏高原边界数据总集<sup>[30-33]</sup>来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)。

## 2 样品采集与分析

采样点分布在青藏高原东南部和西南部,沿途选取了13个采样点,共计采集了73个有效雪样。采样点具体位置以及采样相关信息如表1所示(SE为东南部,SW为西南部)。采样点选取在远离道路、牧场、人群的开阔平坦处,并且使用GPS测定采样点的经纬度及高程,同时用温度计测量非阳光直射下的气温。采样前严格遵守采样规范,佩戴口罩和PVC清洁手套,用去离子水反复冲洗采样所用的塑料铲。塑料铲在雪层中反复磨蹭至干燥。对积雪进行固定分层采样,每5 cm采集一个样品,同样的

方法再采集两组平行样。整个采样过程中均没有连续降水事件发生。雪样装在whirl-pak无菌雪样自封袋中密封保存,并在采样袋上标注编号,随后送于实验室以-18℃低温存放,直至处理分析前取出。

所有雪样均在陕西省地表系统与环境承载力重点实验室完成测定。测样前将雪样于万级超净实验室室温下融化,避免受到空气中各物质影响,融化后立即进行实验。样品经0.22 μm孔径的聚醚砜PES滤头过滤后用Picarro L2130-i激光水汽同位素分析仪测定其 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ ,分析精度分别为0.1‰和0.02‰。测试结果以相对于维也纳标准平均海水(VSMOW)的千分值偏差表示。每个样品测试6次,避免记忆效应造成误差,取后三次的平均值作为最终值。阴离子和阳离子由美国戴安公司DIONEX-AQ型离子色谱仪测定,误差小于±1%,所有离子检测限度均为1 μg·L<sup>-1</sup>。实验过程中用到的电阻率为18.2 MΩ·cm超纯水均由Milli-Q IQ7000超纯水仪制备。

表1 采样点信息与测试值

Table 1 Information and test values of all sampling points

采样点编号	经度/E	纬度/N	高程/m	样品数量/个	气温/℃	$\delta^{18}O$ 平均值/‰	$\delta D$ 平均值/‰	$d$ -excess/‰
SE1	96.50°	31.09°	4 645	9	10	-17.10	-120.59	16.23
SE2	95.61°	31.34°	4 795	12	4	-16.48	-119.20	12.61
SE3	95.33°	31.52°	4 472	3	3	-13.67	-90.49	18.88
SW1	86.12°	28.65°	4 460	3	7	-17.23	-142.06	-4.21
SW2	82.88°	30.35°	4 662	3	2	-22.93	-172.39	11.03
SW3	82.67°	30.45°	4 795	6	4	-16.27	-106.64	23.49
SW4	81.19°	30.19°	4 200	9	3	-16.75	-118.79	15.21
SW5	81.18°	30.18°	4 243	6	3	-15.56	-110.25	14.23
SW6	81.01°	30.26°	4 170	6	2	-18.84	-137.64	13.11
SW7	80.62°	31.33°	4 745	6	2	-14.39	-100.20	14.90
SW8	80.60°	31.35°	4 805	3	2	-12.94	-90.83	12.72
SW9	80.36°	34.08°	5 039	6	-2	-21.04	-155.40	12.90
SW10	80.37°	34.09°	4 160	1	-3	-21.00	-151.73	16.28

## 3 结果与讨论

### 3.1 氢氧稳定同位素特征

#### 3.1.1 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 相关关系

分析结果显示(表1),积雪中 $\delta D$ 值的变化范围在-178.11‰~-68.07‰之间,平均值为-121.71‰; $\delta^{18}O$ 的变化范围在-23.80‰~-9.61‰之间,平均值为-16.99‰,表现为较低的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值,但值均在中国大气降水氢氧稳定同位素组成范围内<sup>[34]</sup>( $\delta D$ : -229.6‰~+45.4‰, $\delta^{18}O$ : -29.47‰~+9.15‰)。积雪中的氢氧稳定同位素一定程度上反映降水氢氧

稳定同位素的组成,由于冬季气温较低,蒸发作用较弱,且受冬季西风环流的影响,漫长的水汽输送使得重同位素逐渐贫化<sup>[35]</sup>,其含有的水汽同位素值较低。

在全球平均状况下,水汽在其源地非平衡蒸发及在凝结过程中平衡分馏条件下,降水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 存在一定的线性关系,Craig<sup>[36]</sup>将这种关系定义为全球大气水线(GMWL): $\delta D=8\delta^{18}O+10$ 。降水同位素的组成随时间和空间变化较大,不同的水汽蒸发源地和输送路径,降水中氢氧稳定同位素动力分馏程



度不同,各地的大气水线(LMWL)会发生不同程度的偏移<sup>[37]</sup>。对采样点积雪中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值进行线性回归分析,得到研究区积雪氢氧稳定同位素的回归方程(图2): $\delta D=7.86\delta^{18}O+11.80$ ( $R^2=0.95$ )。与郑淑惠<sup>[38]</sup>提出的我国的大气水线: $\delta D=7.90\delta^{18}O+8.20$ 以及高晶<sup>[39]</sup>提出的拉萨冬季的大气水线: $\delta D=8.08\delta^{18}O+11.87$ ( $R^2=0.98$ )相比较为接近,高于拉萨夏季的大气水线: $\delta D=7.63\delta^{18}O+5.78$ ( $R^2=0.99$ )。固态降水降落过程中几乎不与大气中的水汽发生同位素交换,受到云下二次蒸发影响较小,大气水线因而具有较高的斜率和截距<sup>[40-41]</sup>。此外,水汽在

形成降水前经过多次蒸发,由于氢质量数较小,比氧更容易发生动力分馏,导致降水中富含更多的氘,这也会使得局地大气水线斜率和截距都较高<sup>[42]</sup>。为了进一步证实降雪对同位素的保存作用,表2列举了青藏高原部分河流、湖泊、地热水以及地下水的大气水线。对比分析可见(图2),各水域大气水线的斜率和截距均小于积雪大气水线的斜率和截距,说明其他水域均受到较为强烈的蒸发作用,使得重同位素富集。而相比众多水域而言,地下水和地热水的曲线斜率更低,这可能是因为水-岩作用使其发生 $^{18}O$ 飘移现象。

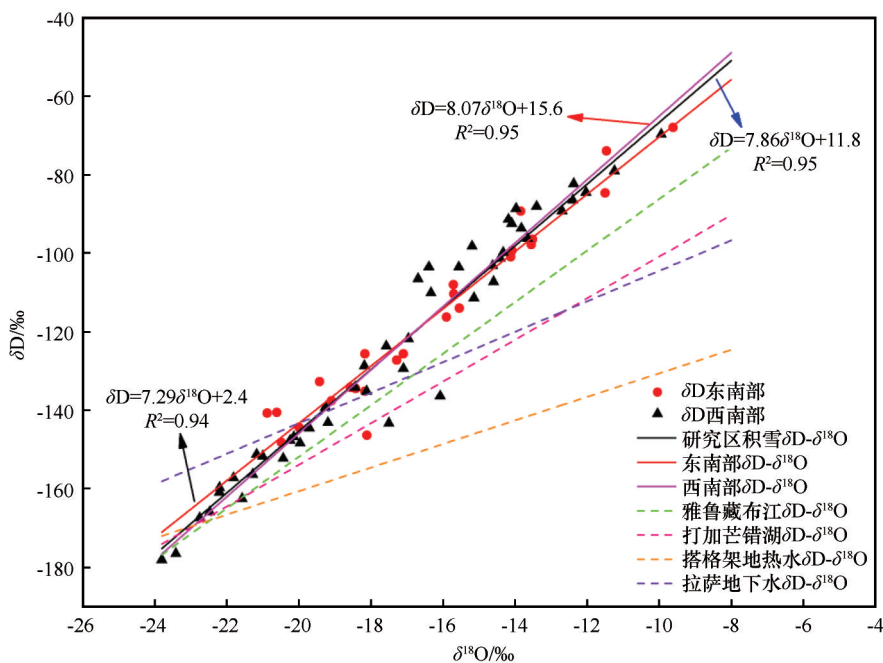


图2 各水域 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的关系

Fig. 2 The relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in different waters

表2 青藏高原不同类型水域的大气水线

Table 2 The meteoric water lines of different types of waters in the Qinghai-Tibet Plateau

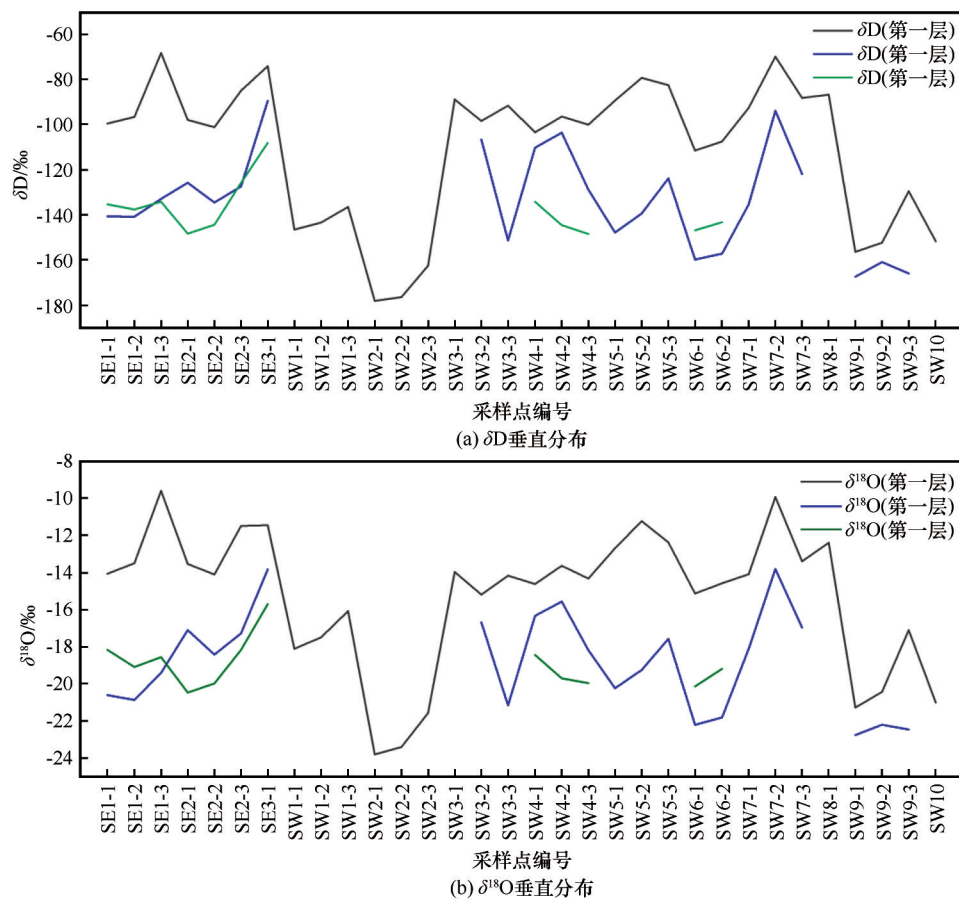
水域类型	大气水线	相关系数	文献来源
雅鲁藏布江	$\delta D=6.56\delta^{18}O-20.68$	0.822	[44]
打加芒错湖水	$\delta D=5.30\delta^{18}O-47.94$	0.962	[45]
搭格架地热水	$\delta D=3.00\delta^{18}O-100.62$	0.942	[46]
拉萨河地下水	$\delta D=3.88\delta^{18}O-65.74$	0.340	[46]
研究区积雪	$\delta D=7.86\delta^{18}O+11.80$	0.950	本文

采样点东西横跨2 000余公里,有明显的地域和气候差异,将东南部和西南部的大气水线进行对比(图2),结果显示东南部积雪大气水线的截距和

斜率均低于西南部。这可能是由于青藏高原在非季风期,水汽来源主要受局地环流和西风环流控制<sup>[43]</sup>,冬季西风气流遇到青藏高原的阻塞在西侧发生分支,沿高原绕行,于是高原西北侧为暖平流,西南侧为冷平流,绕过高原后气流辐合,东北侧为冷平流,东南侧为暖平流。气候的差异导致大气水线斜率和截距的不同。

### 3.1.2 雪坑氢氧稳定同位素垂直分布特征

讨论雪坑剖面的同位素特征,能更好地了解 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 与当地气象要素的关系。通过对雪坑剖面 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的值进行比较(图3),发现 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值变化趋势一致,且第一层雪样(表层5 cm)的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值均高于下层雪样,而第二层(5~10 cm)和第三层

图3 雪坑中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 的垂直分布Fig. 3 Vertical distribution of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in snow pits

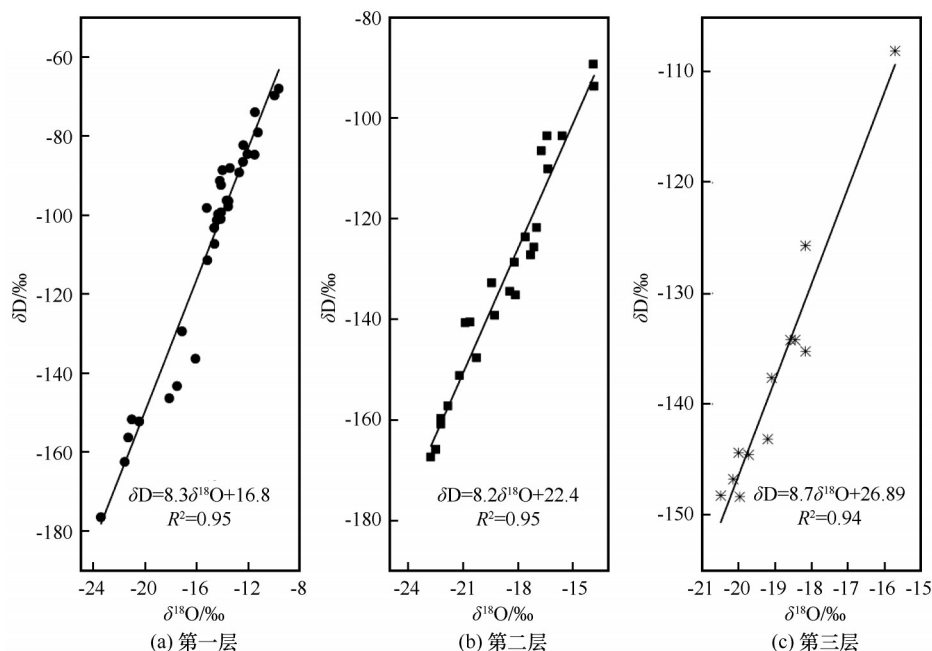
(10~15 cm)雪样的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值没有明显的特点。这可能是由于采集的积雪样并不是新雪,而是降水事件发生后一段时间内的老雪,而积雪蒸发和消融的损耗仅产生在雪表层,表层雪样反映不同降水过程的雪积累时期的综合气象状况<sup>[47]</sup>。由表1可知,采样时的气温除了SW9和SW10两个采样点外,其余采样点均在 $0^{\circ}C$ 以上。此外,根据西藏自治区气候中心发布的《西藏气候影响评价(2021年)》,2020—2021年冬季,西藏地区气温异常偏高,为区域性强暖冬。且在高山地区,大气气溶胶粒子和空气中的含水量随海拔升高而减小,大气辐射被吸收和散射的作用减弱,引起垂直方向辐射通量密度增强,给积雪表面带来高温<sup>[48]</sup>,所以积雪表面会发生一定的消融,但远不足以形成径流。

因此,表层雪样 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值较高可能有以下几方面原因:(1)昼间气温高于 $0^{\circ}C$ ,表层雪样发生轻微消融,融水的浸渗过程与粒雪进行物质交换,使得雪表层重同位素发生富集,下层雪样的含水量增加,雪融水比残留积雪中的重同位素要低<sup>[49]</sup>,导致

下层雪样的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值发生变化。(2)由于青藏高原冬季风力较强,降雪密度较低,积雪很容易受到风力的运输与再分配<sup>[50]</sup>,使得雪表层同位素更加富集。(3)冬季寒冷干燥,积雪表层易发生升华作用,同样会使得积雪表层同位素发生富集<sup>[51]</sup>。

下层雪样的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值的紊乱可能为两方面的原因:一方面是老雪并非来自同一场降雪,而是多场降雪的混合作用;另一方面是因为积雪空隙间的分子运动,虽然对同位素均值影响较小,却导致垂直方向的同位素值趋于平滑<sup>[52]</sup>。

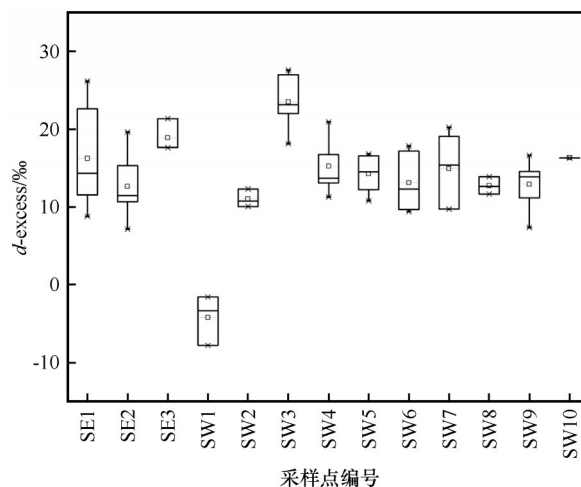
$\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值的差异意味着曲线方程的差异。通过对第一、二、三层不同深度雪样的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值进行一元线性回归分析,得到三条不同的曲线,如图4所示。结果显示,第一层雪样的回归曲线的斜率(8.3)略高于第二层雪样的斜率(8.2),小于第三层雪样的斜率(8.7)。这是由于冬季温度较低,产生的雪融水较少,融水在浸渗过程中受到低温重新冻结,重新冻结会使得积雪的斜率降低<sup>[53-54]</sup>,且融水不再向更深层的积雪浸渗,底部积雪同位素得到较

图4 不同深度雪样 $\delta D$ - $\delta^{18}O$ 关系曲线比较Fig. 4 Comparison of  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  relation curves of snow samples in different depths

好的保存。第二层雪样受到轻微影响,而第三层雪样未受到融水的影响,这也表明干季偶发性的升温 and 消融并不能显著改变雪坑剖面同位素特征。表层同位素的富集使得曲线更偏向重同位素一边,斜率明显低于底部雪样。

### 3.2 过量氘( $d$ -excess)分析

水源地的气象信息与  $d$ -excess 值紧密相关,因此  $d$ -excess 值可以作为反映水源地信息的可靠指标。本研究积雪的  $d$ -excess 值变化范围为  $-4.21\text{‰}$ ~ $+23.49\text{‰}$ (表1),平均值为  $13.65\text{‰}$ ,其中 SW1 的  $d$ -excess 值异常低,可能是由于样品存储时发生了融化蒸发<sup>[55]</sup>,其余采样点  $d$ -excess 值均高于全球的平均值  $10\text{‰}$ (图5),舍去异常低值,  $d$ -excess 值变化范围为  $11.03\text{‰}$ ~ $23.49\text{‰}$ ,平均值为  $15.13\text{‰}$ 。 $d$ -excess 值的不同表明降水水源地的差异性,已有研究显示  $d$ -excess 值的大小受降水时的水汽源地的温度和湿度以及形成降水时的环境状况的影响,通常与水源地湿度呈负相关<sup>[35]</sup>。青藏高原冬季为西风带控制,水汽来自高纬度西风带输送的亚欧大陆内部局地蒸发补给,降水形成前的水汽湿度和温度较低,在相对干燥的气候条件下,水分蒸发的非平衡动力分馏作用强,形成降水的  $d$ -excess 值也就越高<sup>[56-57]</sup>。此外,由于较低的温度使得水汽冷凝程度较高, $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  的斜率受与温度有关的平衡分馏系数显著影响,斜率随着冷凝温度的降

图5  $d$ -excess 的变化特征Fig. 5 Variation characteristics of  $d$ -excess

低而减小,致使  $d$ -excess 值的增加<sup>[58]</sup>。

### 3.3 研究区积雪的离子特征

#### 3.3.1 积雪中离子浓度的区域特征

积雪的理化特性受到大尺度大气环境的影响,积雪中的可溶性无机离子浓度能够在一定程度上记录环境信息,从而反映气候状况及大气的污染程度<sup>[59]</sup>。积雪中主要可溶性无机离子的统计信息如表3所示。其中,SE2的阴离子载量( $\Sigma^-$ )以及离子总载量( $\Sigma^+ + \Sigma^-$ )均最大,SW1的阳离子载量( $\Sigma^+$ )最大,且远大于它的阴离子载量。SW10的阴、阳离子载量以及离子总载量均最小,且所有离子的载量均

表3 各采样点主要可溶性无机离子浓度相关信息

Table 3 Relevant information of the concentrations of main soluble inorganic ions at each sampling point

编号	要素	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Σ <sup>+</sup>	Σ <sup>-</sup>	Σ <sup>+</sup> +Σ <sup>-</sup>
SE1	平均值	0.86	0.10	0.20	0.20	2.89	0.43	1.73	0.58	4.25	2.73	6.98
	标准差	0.49	0.05	0.09	0.08	1.47	0.17	1.11	0.31	—	—	—
SE2	平均值	2.48	0.11	0.29	0.31	3.66	1.06	4.33	0.62	6.85	6.01	12.86
	标准差	3.77	0.07	0.32	0.32	2.82	1.49	6.02	0.42	—	—	—
SE3	平均值	0.35	0.15	0.15	0.15	2.70	0.30	0.77	0.43	3.50	1.49	4.99
	标准差	0.12	0.03	0.03	0.04	0.94	0.06	0.19	0.12	—	—	—
SW1	平均值	0.22	0.21	0.62	0.23	6.03	0.70	0.82	0.45	7.31	1.97	9.28
	标准差	0.07	0.03	0.11	0.03	0.60	0.14	0.21	0.06	—	—	—
SW2	平均值	0.11	0.14	0.11	0.11	2.50	0.20	0.60	0.48	2.98	1.28	4.26
	标准差	0.08	0.03	0.01	0.01	0.33	0.07	0.07	0.03	—	—	—
SW3	平均值	0.10	0.18	0.14	0.08	1.40	0.26	0.42	0.65	1.92	1.34	3.26
	标准差	0.03	0.05	0.05	0.01	0.63	0.03	0.13	0.16	—	—	—
SW4	平均值	0.13	0.25	0.14	0.12	1.85	0.26	0.75	0.42	2.48	1.43	3.92
	标准差	0.10	0.06	0.02	0.06	1.45	0.10	0.30	0.09	—	—	—
SW5	平均值	0.04	0.29	0.12	0.15	2.74	0.19	1.00	0.57	3.34	1.75	5.09
	标准差	0.02	0.11	0.02	0.06	1.59	0.03	0.41	0.16	—	—	—
SW6	平均值	0.02	0.12	0.19	0.12	2.14	0.13	0.64	0.35	2.59	1.12	3.71
	标准差	0.02	0.09	0.20	0.07	2.17	0.03	0.53	0.22	—	—	—
SW7	平均值	0.02	0.09	0.10	0.10	1.23	0.13	0.35	0.40	1.54	0.88	2.42
	标准差	0.01	0.04	0.03	0.03	0.66	0.02	0.22	0.11	—	—	—
SW8	平均值	0.08	0.16	0.29	0.17	2.36	0.19	0.75	0.54	3.06	1.47	4.53
	标准差	0.02	0.01	0.09	0.05	0.61	0.02	0.21	0.09	—	—	—
SW9	平均值	0.06	0.06	0.12	0.11	1.43	0.17	0.45	0.45	1.79	1.07	2.86
	标准差	0.03	0.03	0.06	0.05	0.86	0.04	0.27	0.16	—	—	—
SW10	平均值	0.04	0.07	0.09	0.09	1.23	0.12	0.30	0.37	1.51	0.79	2.30
	标准差	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：表中离子浓度单位为mg·L<sup>-1</sup>。  
Note: the unit of ion concentration is mg·L<sup>-1</sup> in the table.

是阳离子载量大于阴离子载量。阴、阳离子载量的不平衡可能是受到地表矿物粉尘的影响。离子载量较小可能是因为采样点处海拔较高,太阳辐射较强,风力较大以及升华作用等特殊气候条件影响<sup>[60]</sup>。标准偏差相差较大,表明不同深度雪层离子浓度差异相对较大<sup>[61]</sup>。

积雪的主要可溶性无机离子成分如图6所示。积雪中可溶性无机离子平均浓度大小依次为:Ca<sup>2+</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Na<sup>+</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>Cl<sup>-</sup>>K<sup>+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>。Ca<sup>2+</sup>浓度在积雪中占比最大,约占42.47%,其浓度范围在0.41~10.39 mg·L<sup>-1</sup>之间,平均浓度为2.49 mg·L<sup>-1</sup>。其次为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,平均浓度为1.38 mg·L<sup>-1</sup>,占比约23.53%。与乌鲁木齐河源1号冰川和老虎沟12号冰川表层雪中较高Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度一致,很可能都是受到中亚矿物粉尘的影响<sup>[62-63]</sup>。Na<sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>占

比分别为10.03%、8.63%、6.69%、3.32%、2.81%、2.52%。阴离子浓度顺序为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>Cl<sup>-</sup>,与国际标准海水的浓度排序(Cl<sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)不同,而阳离子浓度顺序与地壳元素含量一致(Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>Mg<sup>2+</sup>),表明离子的主要来源为大陆而并非海洋。

地理位置的差异也可能导致离子浓度的差异,将东南部与西南部离子浓度进行对比(图6),结果显示除去NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,其余离子浓度均是东南部高于西南部,且Na<sup>+</sup>差异较为显著。西南部地处喜马拉雅山区地带,已有研究表明,无论在季风还是非季风期,喜马拉雅山脉主峰对于Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>离子空间分布的影响没有起到一个完全有效的屏障作用,但对Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>作用明显<sup>[64]</sup>。所以Na<sup>+</sup>的浓度差异可能是因为喜马拉雅山的屏障作用。其他离子浓度差异较小,表现为东南部略高于西南部。对采样点地理特征进



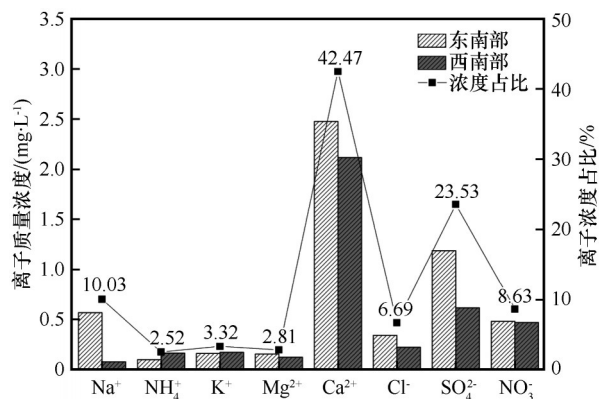


图6 积雪中主要离子成分占比以及东南部和西南部离子浓度平均值对比

Fig. 6 Composition proportion of main ions in snowpack and comparison of average concentration of ions in southeast and southwest

行分析发现,西南部采样点多处于被大面积积雪覆盖的地段,积雪的覆盖不利于地表粉尘进入大气,而东南部采样点附近则多有裸原,局地频发的沙暴更可能影响东南部积雪中的离子浓度。

为进一步分析研究区积雪中主要离子的区域特征,将其与其他典型积雪区进行对比(表4),可以发现具有如下特征:在青藏高原地区,从东南部海洋型玉龙雪山白水一号冰川到东北部靠近粉尘源区的祁连山十一冰川的离子含量逐渐增加,而错那

地区的离子含量与本研究较为接近,反映了离子沉降的空间差异以及陆源矿物对积雪中化学成分的明显影响。反观我国东北地区,积雪中离子浓度整体较高,表明受到的人为影响较强。

### 3.3.2 积雪中离子主成分和物源分析

为进一步了解污染源对积雪中主要可溶性无机离子的贡献,本研究利用SPSS软件进行主成分分析(表5),发现第1主成分方差贡献率占比较高,东南部和西南部分别占58.9%和79.3%,且以 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,这些离子同源性较高。而 $\text{NH}_4^+$ 在第2主成分贡献较大,且东南部积雪中 $\text{NO}_3^-$ 在第2主成分贡献较大,西南部则相反,表明离子来源的差异性。已有研究指出,青藏高原的雪冰化学物质大多为亚洲中部干旱-半干旱地区富含 $\text{Ca}^{2+}$ 的大气尘埃<sup>[69]</sup>,与本研究中 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度占比较高结论一致。且研究区在非季风期受西风急流南支的影响,粉尘除了来自局地沙暴,也来自南亚塔尔沙漠和西亚干旱地区,甚至更远的北非撒哈拉沙漠<sup>[70]</sup>。同时,青藏高原分布着大量盐湖,有丰富的盐矿粉尘,含有丰富的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ <sup>[71]</sup>,因而积雪中的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 等离子可能来自青藏高原及周边富含盐矿的尘源区。以上分析表明,陆源矿物粉尘为积雪中主要可溶性无机离子的主要来源。

表4 研究区与其他典型积雪区主要可溶性无机离子浓度对比

Table 4 Comparison of concentrations of soluble inorganic ions between the study area and other typical snow-covered areas

研究区	研究时段	离子浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )								参考文献
		$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	
青藏高原东南部	2021年	0.57	0.10	0.16	0.16	2.47	0.34	1.19	0.48	本研究
青藏高原西南部	2021年	0.08	0.17	0.17	0.12	2.11	0.22	0.62	0.47	本研究
祁连山十一冰川	2011年	2.12	0.27	0.29	0.56	7.41	2.47	3.37	0.66	[65]
喜马拉雅东段错那地区	2018—2019年	0.32	0.30	0.22	0.18	3.87	0.22	0.77	0.21	[66]
玉龙雪山白水1号冰川	2009年	0.02	—	0.02	0.04	1.77	0.09	0.39	0.32	[67]
我国东北地区	2017—2018年	2.25	2.63	1.06	1.05	10.39	2.99	6.97	3.34	[68]

为了进一步确定气团来源和大气颗粒物的传输路径,如图7所示,利用HYSPLIT模型对采样前一个月到达东南部(SE3)、西南部(SW8)两个采样点上空500 m的气团进行72 h后向轨迹模拟。结果显示,气团主要来自偏西方向,表现为西向东进趋势。西南部主要受来自南亚途经塔尔沙漠翻越喜马拉雅山脉入境的绕流的影响,西北方向气团最远可以追溯到里海附近,西方向可追溯到内夫得沙漠。东南部主要受西偏南的气团影响,气团的主要

起源为塔尔沙漠、尼泊尔以及喜马拉雅山南麓等地。气团行径过程途经沙漠等干旱-半干旱地区,携带大量沙尘和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 等化学物质。已有研究表明, $\text{SO}_4^{2-}$ 的来源可能为荒漠区,盐湖的蒸发以及盐矿物质的风化也是其潜在来源<sup>[71,67]</sup>,所以 $\text{SO}_4^{2-}$ 也可能来自青藏高原局地硫酸盐输入。 $\text{NO}_3^-$ 浓度主要与太阳活动、含有土壤颗粒的大陆气团以及平流层 $\text{N}_2\text{O}$ 的氧化有关<sup>[18,72]</sup>。此外, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 可形成如 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 这样的硝酸盐、硫酸



表5 积雪中主要可溶性无机离子主成分分析

Table 5 Principal component analysis of main soluble inorganic ions in snow

项目	东南部		西南部	
	第1主成分	第2主成分	第1主成分	第2主成分
Na <sup>+</sup>	0.729	-0.544	0.942	-0.310
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.438	0.748	0.529	0.788
K <sup>+</sup>	0.870	-0.431	0.953	-0.174
Mg <sup>2+</sup>	0.961	0.173	0.978	-0.071
Ca <sup>2+</sup>	0.955	0.033	0.856	0.371
Cl <sup>-</sup>	0.869	-0.456	0.946	-0.294
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.749	0.583	0.969	-0.209
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.278	0.741	0.864	0.317
方差贡献率/%	58.9	27.1	79.3	14.0

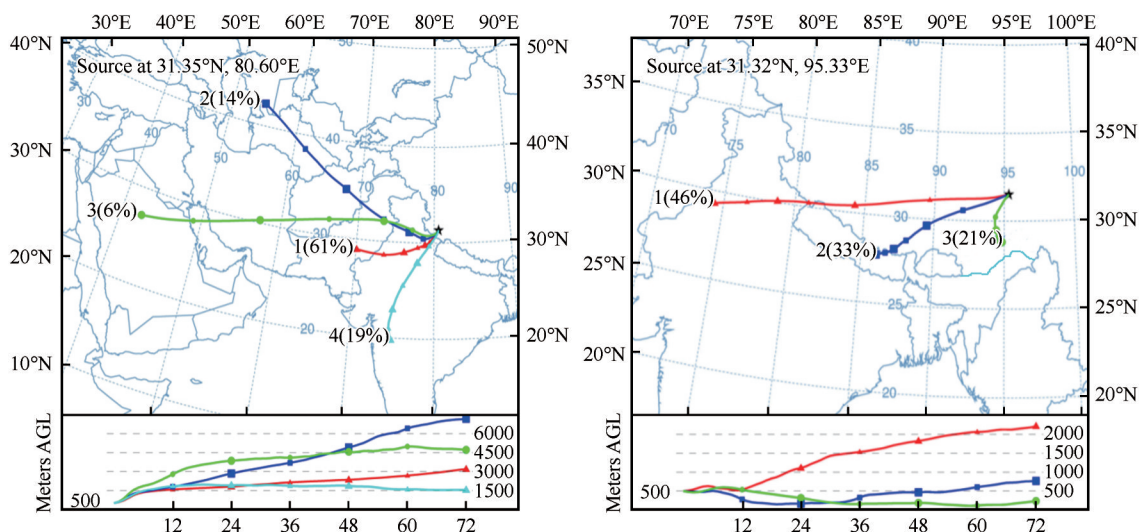


图7 研究区72 h后向轨迹, (a)和(b)分别为SW8和SE3

Fig. 7 72 hours of backward trajectory of the study area, (a) and (b) are SW8 and SE3 respectively

盐覆盖层而后被长距离运输沉积在积雪表面<sup>[65]</sup>。人为活动(化石燃料燃烧、生物质燃烧等)也会影响SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的浓度。Galloway等<sup>[73]</sup>研究发现,碱性土壤的释放与动物的粪便也能影响大气中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的浓度。青藏高原地区以畜牧业为主,且野生动物资源丰富,这可能是NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的来源之一。所以,结合主成分分析发现NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和部分NO<sub>3</sub><sup>-</sup>可能与人为活动有关,且东南部NO<sub>3</sub><sup>-</sup>受到人为影响因素更为显著。

#### 4 结论

为了解积雪中化学组分的含量、来源和其在积雪中的次生变化等问题,本研究通过对青藏高原东南和西南部冬季73个积雪样的氢氧稳定同位素特征和主要可溶性无机离子组成及来源进行了研究分析,得出了以下主要结论:

(1)研究区冬季积雪的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值波动分别介

于 $-178.11‰ \sim -68.07‰$ 和 $-23.80‰ \sim -9.61‰$ ,氢氧稳定同位素值偏低。积雪大气水线为 $\delta D = 7.86\delta^{18}O + 11.8 (R^2 = 0.95)$ ,与拉萨冬季的大气水线: $\delta D = 8.08\delta^{18}O + 11.87 (R^2 = 0.98)$ 相比较为接近,东南部( $\delta D = 7.29\delta^{18}O + 2.4$ )与西南部( $\delta D = 8.07\delta^{18}O + 15.6$ )大气水线有明显差异,西南部的斜率和截距均高于东南部。

(2)雪坑剖面 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值变化趋势一致,表层5 cm雪样同位素富集,有相对较高的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值。积雪中的水汽迁移使得分层雪样 $\delta D/\delta^{18}O$ 曲线的斜率略有不同,表层雪样的斜率略高于近表层雪样 $\delta D/\delta^{18}O$ 的斜率,底部雪样未受影响,斜率最高。

(3) $d$ -excess值变化范围为 $-4.21‰ \sim 23.49‰$ ,平均值为 $13.65‰$ ,剔除SW1的异常低值,过量氘变化范围为 $11.03‰ \sim 23.49‰$ ,平均值为 $15.13‰$ ,高于全球的平均值 $10‰$ 。这表明水汽源地的低湿、低

温以及降水时较高的冷凝程度等环境条件决定了较高的过量氧值。

(4)积雪中可溶性无机离子平均浓度顺序为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ , 主导阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ , 主导阴离子为  $\text{SO}_4^{2-}$ 。主成分分析显示, 陆源为积雪中离子的主要来源,  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  可能来自青藏高原富含盐矿的粉尘源区,  $\text{NH}_4^+$  与部分  $\text{NO}_3^-$  可能与人为活动有关。后向气团轨迹整体表现为西向东进趋势, 东南部和西南部主要受偏西方向的气团影响, 带来了南亚、中亚等干旱-半干旱区的沙尘。

#### 参考文献(References):

- [1] Fuhrer K, Neftel A, Anklin M, et al. High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D2): 4147-4164.
- [2] Olivier S, Blaser C, Brütisch S, et al. Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D5): D05309.
- [3] Tiwari S, Kulshrestha U C, Padmanabhamurty B. Monsoon rain chemistry and source apportionment using receptor modeling in and around National Capital Region (NCR) of Delhi, India [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(27): 5595-5604.
- [4] Wang Yan, Wai Kaming, Gao Jian, et al. The impacts of anthropogenic emissions on the precipitation chemistry at an elevated site in North-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(13): 2959-2970.
- [5] Thompson L G, Mosley-Thompson E. Microparticle concentration variations linked with climatic change: evidence from polar ice cores [J]. *Science*, 1981, 212(4496): 812-815.
- [6] Filippa G, Freppaz M, Williams M W, et al. Major element chemistry in inner alpine snowpacks (Aosta Valley Region, NW Italy) [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2): 158-166.
- [7] Li Yaju, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Progress of the research of stable isotope in precipitation in China: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 624-633. [李亚举, 张明军, 王圣杰, 等. 我国大气降水中稳定同位素研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 624-633.]
- [8] Castro-López J A, Robles-Morua A, Méndez-Barroso L A, et al. Water isotope variation in an ecohydrologic context at a seasonally dry tropical forest in northwest Mexico [J]. *Journal of Arid Environments*, 2022, 196: 104658.
- [9] Rai S P, Purushothaman P, Kumar B, et al. Stable isotopic composition of precipitation in the River Bhagirathi Basin and identification of source vapour [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(11): 4835-4847.
- [10] Yu Wusheng, Wei Feili, Ma Yaoming, et al. Stable isotope variations in precipitation over Deqin on the southeastern margin of the Tibetan Plateau during different seasons related to various meteorological factors and moisture sources [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 123-130.
- [11] Zhou Shiqiao, Nakawo M, Sakai A, et al. Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in northwest China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(21): 2963-2972.
- [12] Kang Shichang, Kreutz K J, Mayewski P A, et al. Stable-isotopic composition of precipitation over the northern slope of the central Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2002, 48(163): 519-526.
- [13] Pu Tao, Chen Pengfei, Wang Shijin, et al. Isotopic evolution in snowpacks from a typical temperate glacier in the south-Asia monsoon region [J]. *Water*, 2020, 12(12): 3402.
- [14] Pang Hongxi, He Yuanqing, Hou Shugui, et al. Changes in ionic and oxygen isotopic composition of the snow-firn pack at Baishui Glacier No. 1, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(8): 2345-2358.
- [15] Zhang Yulan, Kang Shichang, Zhang Qianggong, et al. Microparticle variations in snowpits from Mt. Geladaindong in the source region of Yangtze River and its environmental significance [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2117-2122. [张玉兰, 康世昌, 张强弓, 等. 长江源区各拉丹冬峰雪冰中微粒季节变化及其环境意义 [J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2117-2122.]
- [16] Cui Xiaoqing, Ren Jiawen, Qin Xiang, et al. Chemical characteristics and environmental records of a snow-pit at the Glacier No. 12 in the Laohugou Valley, Qilian Mountains [J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(2): 379-385.
- [17] Dong Zhiwen, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. Chemistry and environmental significance of snow on Haxilegen Glacier No. 51 in Kuytun of eastern Tianshan mountains [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(1): 149-156. [董志文, 李忠勤, 张明军, 等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川雪坑化学特征及环境意义 [J]. *地理科学*, 2010, 30(1): 149-156.]
- [18] Williams M W, Tonnessen K A, Melack J M, et al. Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 25-32.
- [19] Thapa P, Xu Jianzhong, Neupane B, et al. Chemical composition of inorganic and organic species in snow/ice in the glaciers of Western China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 135351.
- [20] Noro K, Hattori S, Uemura R, et al. Spatial variation of isotopic compositions of snowpack nitrate related to post-depositional processes in eastern Dronning Maud Land, East Antarctica [J]. *Geochemical Journal*, 2018, 52(2): e7-e14.
- [21] Ala-Aho P, Welker J M, Bailey H, et al. Arctic snow isotope hydrology: a comparative snow-water vapor study [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(2): 150.
- [22] Miner K R, Bogdal C, Pavlova P, et al. Quantitative screening level assessment of human risk from PCBs released in glacial meltwater: Silvretta Glacier, Swiss Alps [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166: 251-258.
- [23] Panicker A S, Sandeep K, Gautam A S, et al. Chemical composition and isotopic signatures of ice and snow over a Himalayan Glacier (Satopanth) in India [J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(10): 1-7.
- [24] Kondrat'ev I I, Mukha D E, Boldeskul A G, et al. Chemical composition of precipitation and snow cover in the Primorsky Krai [J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, 42(1): 64-70.
- [25] Qiu J. China: the third pole [J]. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [26] Zheng Du, Zhao Dongsheng. Characteristics of natural environment of the Tibetan Plateau [J]. *Science & Technology Re-*

- view, 2017, 35(6): 13-22. [郑度, 赵东升. 青藏高原的自然环境特征[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 13-22.]
- [27] Bai Huzhi, Dong Wenjie, Ma Zhenfeng. Climatic characteristics of Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 890-897. [白虎志, 董文杰, 马振锋. 青藏高原及邻近地区的气候特征[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 890-897.]
- [28] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 9-18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18.]
- [29] Che Tao, Hao Xiaohua, Dai Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1247-1253. [车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253.]
- [30] Zhang Y, Ren H, Pan X. Integration dataset of Tibet Plateau boundary [DS]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019. [张懿锂, 任慧霞, 潘小多. 青藏高原边界数据总集[DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2019.]
- [31] Zhang Yili, Li Bingyuan, Liu Linshan, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2021, 40(6): 1543-1553. [张懿锂, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围[J]. 地理研究, 2021, 40(6): 1543-1553.]
- [32] Zhang Yili, Liu Linshan, Li Bingyuan, et al. Comparison of boundary datasets covering Tibetan Plateau between 2021 and 2014 versions[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2021, 5(3): 322-332, 461. [张懿锂, 刘林山, 李炳元, 等. 青藏高原范围数据集 2021 与 2014 年版比较研究[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2021, 5(3): 322-332, 461.]
- [33] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. Datasets of the boundary and area of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(Suppl 1): 65-68. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 《论青藏高原范围与面积》一文数据的发表——青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据[J]. 地理学报, 2014, 69(增刊 1): 65-68.]
- [34] Xie Linhuan, Jiang Tao, Cao Yingjie, et al. The hydrogen and oxygen isotope characteristics of precipitation and water vapor sources in the lower Dongjiang River reaches, Guangdong Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(1): 86-95. [谢林环, 江涛, 曹英杰, 等. 东江下游大气降水氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(1): 86-95.]
- [35] Zeng Di, Wu Jinkui, Li Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: a review[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 857-869. [曾帝, 吴锦奎, 李洪源, 等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 857-869.]
- [36] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [37] Hu Yue, Liu Guodong, Meng Yuchuan, et al. Analysis of stable hydrogen and oxygen isotope characteristics and vapor sources of event-based precipitation in Chengdu[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1179-1187. [胡月, 刘国东, 孟玉川, 等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1179-1187.]
- [38] Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Study on hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in my country[J]. Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806. [郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.]
- [39] Dai Di, Gao Jing, Steen-Larsen H C, et al. Continuous monitoring of the isotopic composition of surface water vapor at Lhasa, southern Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2021, 264: 105827.
- [40] Meng Yuchuan, Liu Guodong. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 327-334. [孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 327-334.]
- [41] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1996, 24: 225-262.
- [42] Li Tingyong, Li Hongchun, Shen Chuanzhou, et al. Study on the  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  characteristics of meteoric precipitation during 2006—2008 in Chongqing, China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 757-764. [李廷勇, 李红春, 沈川洲, 等. 2006—2008 年重庆大气降水  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  特征初步分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 757-764.]
- [43] Yu Wusheng, Ma Yaoming, Sun Weizhen, et al. Climatic significance of  $\delta^{18}O$  records from precipitation on the western Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(16): 2732-2741.
- [44] Liu Jiaju, Guo Huaicheng. Temporal and spatial variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in Yarlung Zangbo River[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5194-5200. [刘佳驹, 郭怀成. 雅鲁藏布江河水氢氧同位素时空变化特征[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5194-5200.]
- [45] Xiao Ke, Shen Licheng, Wang Peng. Hydrogen and oxygen isotopes of lake water and geothermal spring water in arid area of south Tibet[J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 2952-2958. [肖可, 沈立成, 王鹏. 藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2952-2958.]
- [46] Lin Congye, Gao Bai, Hua Enxiang, et al. Characteristics and indicative significance of oxygen and hydrogen isotopes in water environment of Lhasa River Basin[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(11): 99-106. [林聪业, 高柏, 华恩祥, 等. 拉萨河流域水环境氢氧同位素特征及其指示意义[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(11): 99-106.]
- [47] Zhang Xinping, Yao Tandong, Jiao Keqin, et al. The temporal and spatial variations of the  $\delta^{18}O$  in firn of the glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River during summer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(1): 57-62. [章新平, 姚檀栋, 焦克勤, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川夏季积雪中  $\delta^{18}O$  的时空变化[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 57-62.]
- [48] Liu Chunguang. Evaluation of remotely sensed debris surface temperature (DST) and study on thermal infrared radiative transfer processes: a case study of the Koxkar Glacier, western Tianshan, China [D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2019. [刘春光. 冰川表碛区遥感温度产品精度评估及热辐射传输过程研究——以西天山科其喀尔冰川为例[D]. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院, 2019.]
- [49] He Yuanqing, Pang Hongxi, Lu Aigang, et al. Spatial and temporal variations of the stable isotopes in snowpacks and glacial runoff in different types of glacier areas in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 22-28. [何元庆, 庞洪喜, 卢爱刚, 等. 中国西部不同类型冰川区积雪及其融水径流中稳定同位素比率的时空变化及其气候效应[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 22-28.]



- [50] Naftz D L, Susong D D, Cecil L D W, et al. Variations between  $\delta^{18}\text{O}$  in recently deposited snow and on-site air temperature, upper Fremont glacier, Wyoming [M]//Earth Paleoenvironments: Records Preserved in Mid-and Low-Latitude Glaciers. Springer, Dordrecht, 2004: 217-234.
- [51] Neumann T A, Waddington E D, Steig E J, et al. Non-climate influences on stable isotopes at Taylor Mouth, Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(173): 248-258.
- [52] Li Yaju, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Seasonal variations of stable oxygen isotope in surface snow and vapor transportation at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 953-962. [李亚举, 张明军, 李忠勤, 等. 表层雪中稳定同位素季节变化及其与水汽输送的关系: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川积累区为例[J]. *地理研究*, 2011, 30(5): 953-962.]
- [53] Holdsworth G. Glaciological reconnaissance of an ice core drilling site, penny ice cap, Baffin Island [J]. *Journal of Glaciology*, 1984, 30(104): 3-15.
- [54] Zhou Shiqiao, Nakawo M, Hashimoto S, et al. The effect of refreezing on the isotopic composition of melting snowpack [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(6): 873-882.
- [55] Gammons C H, Poulson S R, Pellicori D A, et al. The hydrogen and oxygen isotopic composition of precipitation, evaporated mine water, and river water in Montana, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 319-330.
- [56] Satake H, Kawada K. The quantitative evaluation of sublimation and the estimation of original hydrogen and oxygen isotope ratios of a firn core at East Queen Maud Land, Antarctica [J]. *Bulletin of Glacier Research*, 1997, 15: 93-97.
- [57] Tian Lide. Westerly moisture transport to the middle of Himalayas revealed from the high deuterium excess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(10): 1026.
- [58] Vimeux F, Masson V, Jouzel J, et al. Glacial-interglacial changes in ocean surface conditions in the Southern Hemisphere [J]. *Nature*, 1999, 398(6726): 410-413.
- [59] Liu Yaping, Geng Zhixing, Hou Shugui. Spatial and seasonal variation of major ions in Himalayan snow and ice: a source consideration [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 195-205.
- [60] Li Xiangying, Liu Shiyin, Han Tianding, et al. Ion concentration in snow pits on glaciers in eastern Tianshan Mountain: take haxilegen glacier No. 51 of Kuitun River and Hami Miaogou flat-topped glacier as an example [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(12): 1268-1276. [李向应, 刘时银, 韩添丁, 等. 天山东部冰川雪坑离子浓度特征的对比研究: 以奎屯河哈希勒根51号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川为例[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(12): 1268-1276.]
- [61] Wu Xiaobo, Wang Ninglian, Li Quanlian, et al. Ionic compositions of surface snow in the Yehelong Glacier of A'nyemaqên mountains in the headwaters of Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 415-420. [武小波, 王宁练, 李全莲, 等. 黄河源区阿尼玛卿山耶和龙冰川表层雪化学组成[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 415-420.]
- [62] Li Zhongqin, Edwards R, Mosley-Thompson E, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 250-256.
- [63] Dong Zhiwen, Ren Jiawen, Qin Dahe, et al. Chemistry characteristics and environmental significance of snow deposited on the laohugou glacier No. 12, Qilian mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 327-335. [董志文, 任贾文, 秦大河, 等. 祁连山老虎沟12号冰川积雪化学特征及环境意义[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 327-335.]
- [64] Kang Shichang, Mayewski P A, Qin Dahe, et al. Seasonal differences in snow chemistry from the vicinity of Mt. Everest, central Himalayas [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(18): 2819-2829.
- [65] Wang Mingming, Li Zhongqin, Wei Jing, et al. Major ion characteristics and environmental significance of snow and ice on typical glaciers in Qilian mountains [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10): 1459-1470. [王明明, 李忠勤, 魏静, 等. 祁连山典型冰川雪冰主要化学离子特征及其环境意义[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1459-1470.]
- [66] Li Changxiang, Ma Keke, Yang Liu, et al. Interannual variations and source analysis of major ions in snow from Cona region, eastern Himalayas [J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(2): 160-170. [李畅想, 马珂珂, 杨柳, 等. 喜马拉雅东段错那地区雪中主要离子年际变化及来源分析[J]. *地球与环境*, 2022, 50(2): 160-170.]
- [67] Li Zongxing, He Yuanqing, Pang Hongxi, et al. Source of major anions and cations of snowpacks in the typical monsoonal temperate glacial region of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 992-1001. [李宗省, 何元庆, 庞洪喜, 等. 我国典型季风海洋性冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 992-1001.]
- [68] Xue Honghai, Chen Weilun, Li Ming, et al. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017—2018 [J]. *Chemosphere*, 2020, 251: 126328.
- [69] Wake C P, Mayewski P A, Xie Zichu, et al. Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(14): 1411-1414.
- [70] Geng Zhixin, Hou Shugui, Zhang Dongqi, et al. Major ions in ice cores and snowpits from the Himalayas: temporal and spatial variations and their sources [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 191-200. [耿志新, 侯书贵, 张东启, 等. 喜马拉雅山雪冰主要离子的时空变化特征及来源分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 191-200.]
- [71] Wu Xiaobo, Li Quanlian, Wang Ninglian, et al. Regional characteristics of ion concentration in glacial snowpits over the Tibetan Plateau and source analysis [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 971-975. [武小波, 李全莲, 王宁练, 等. 青藏高原冰川雪坑中离子浓度的区域特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 971-975.]
- [72] Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L F. Variation and environmental implication of nitrate concentration in Guliya ice core in the recent 1 500 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 15-21. [王宁练, 姚檀栋, L. F. Thompson. 近1 500年来古里雅冰芯中 $\text{NO}_3^-$ 浓度变化及其环境意义[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 15-21.]
- [73] Galloway J N, Zhao Dianwu, Xiong Jiling, et al. Acid rain: China, United States, and a remote area [J]. *Science*, 1987, 236(4808): 1559-1562.

## Study on chemical composition of snowpack in southeast and southwest of Tibetan Plateau in winter

ZHANG Yuxuan<sup>1,2</sup>, WANG Ninglian<sup>1,2,3</sup>, WU Xiaobo<sup>4</sup>, YANG Xuewen<sup>1,2</sup>,  
LI Yao<sup>5</sup>, FANG Zhenxiang<sup>1,2</sup>

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

3. Institute of Tibet Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 519082, China)

**Abstract:** According to 73 snow samples collected in the southeast and southwest of Tibetan Plateau in January, 2021, the characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) fractionation in dry season and the influence of water vapor migration on the chemical composition change of snow profile were revealed by measuring the stable isotopes of hydrogen and oxygen and soluble inorganic ions in snow, and the relationship between stable isotopes of hydrogen and oxygen and climate and the composition and source of soluble inorganic ions were discussed. The results show that the local meteoric waterline of snowpack in the whole study area is  $\delta D = 7.86\delta^{18}O + 11.8$  ( $R^2 = 0.95$ ), which is close to the Lhasa winter meteoric waterline, and the slope and intercept of the meteoric waterline in the southeast are slightly lower than those in the southwest.  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  fluctuates from  $-178.11\text{‰}$  to  $-68.07\text{‰}$  and  $-23.80\text{‰}$  to  $-9.61\text{‰}$ , respectively, and the d-excess values fluctuate from  $11.03\text{‰}$  to  $23.49\text{‰}$ , showing low values of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in winter, and high d-excess values. The surface layer is relatively enriched in heavy isotopes, and the isotope values are higher than those of the lower snow samples, and the water vapor migration inside the snow makes the slope of the relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  different. The concentration sequence of the main soluble inorganic ions is  $Ca^{2+} > SO_4^{2-} > Na^+ > NO_3^- > Cl^- > K^+ > Mg^{2+} > NH_4^+$ , of which  $Ca^{2+}$  (42.47%),  $SO_4^{2-}$  (23.53%) accounted for the largest proportion of cation and anion, respectively, and the average concentration of ions in the southeast was higher than that in the southwest. The results of principal component analysis show that terrigenous sources are the main source of ions in snow, and  $NH_4^+$  and some  $NO_3^-$  are related to human activities. The backward air mass trajectory shows that the source of water vapor is related to the water vapor transport controlled by the upper-altitude westerly circulation, and most of the ions are terrestrial mineral dust carried by westerly winds in winter.

**Key words:** Tibetan Plateau; snowpack; stable hydrogen and oxygen isotopes; inorganic ions

(责任编辑: 张玉兰)