

彭诗雅,刘楠涛,李 鑫,等.天山冰川退缩区土壤汞分布特征及累积 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1397-1406.

Peng S Y, Liu N T, Li X, et al. Distribution characteristics and accumulation of soil mercury in the retreated area of Tianshan Glacier [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1397-1406.

## 天山冰川退缩区土壤汞分布特征及累积

彭诗雅<sup>1</sup>,刘楠涛<sup>2</sup>,李 鑫<sup>2</sup>,王 训<sup>2</sup>,常顺利<sup>1\*</sup> (1.新疆大学生态与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 本文以新疆天山乌鲁木齐河源一号冰川退缩区为研究区域,通过<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>、<sup>137</sup>Cs放射性同位素测年和侵蚀性堆积地貌判定退缩区的年代演替序列,并据此设置了系列采样点,对土壤进行分层采样,测定样品总汞浓度等指标,计算各年代退缩区的汞累积速率,探究乌鲁木齐河源一号冰川退缩区土壤中汞的分布特征及其累积过程.结果表明:冰川退缩区土壤汞含量和汞储量随着退缩时间增长呈现出增加的趋势,各层土壤汞的平均含量由大到小依次为:0~5cm[(13.28±6.60)μg/kg]>5~10cm[(11.47±7.34)μg/kg]>10~15cm[(10.19±6.57)μg/kg]>基岩[(0.23±0.09)μg/kg];冰川退缩区植被生长促进了土壤汞的富集,退缩区内土壤汞浓度与土壤有机碳、氮含量呈显著正相关,而且由于植被生物量很小,退缩区土壤中汞的累积速率也较低(0.09~33.43μg/(m<sup>2</sup>·a),平均值为16.92μg/(m<sup>2</sup>·a);近250a来(1777年以来),天山一号冰川退缩区土壤汞累积速率呈加速增加趋势,由1777年的0.09μg/(m<sup>2</sup>·a)增加至2017年的33.43μg/(m<sup>2</sup>·a),这意味着自工业革命以来大气汞含量及沉积量在不断增加.

**关键词:** 天山冰川退缩区; 土壤汞分布; 大气Hg<sup>0</sup>沉降; 汞累积速率

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2024)03-1397-10

**Distribution characteristics and accumulation of soil mercury in the retreated area of Tianshan Glacier.** PENG Shi-ya<sup>1</sup>, LIU Nan-tao<sup>2</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, WANG Xun<sup>2</sup>, CHANG Shun-li<sup>1\*</sup> (1.College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China). *China Environmental Science*, 2024,44(3): 1397~1406

**Abstract:** This study investigated the retreated area of Urumqi Glacier No.1 in the Tianshan Mountains and its chronological succession sequence was determined using <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> and <sup>137</sup>Cs radioactive isotope dating and erosive accumulation landforms. Based on this, a network of sampling points was created to stratify the soil, measure the total mercury concentration and other indicators of the sample, and calculate the mercury accumulation rate. The aim of this study was to investigate the distribution and accumulation of mercury in the soil of the retreated area of Urumqi Glacier No.1 in the Tianshan Mountains. The results show that the mercury content of different soil layers in the glacier retreated area increased with the increase in its retreated time, specifically 0~5cm [(13.28 ± 6.60) μg/kg] > 5~10cm [(11.47 ± 7.34) μg/kg] > 10~15cm [(10.19 ± 6.57) μg/kg] > bedrock [(0.23 ± 0.09) μg/kg]. Soil mercury storage increased with retreatment time. Furthermore, there was a positive correlation between mercury concentration and organic carbon/nitrogen content at different soil levels within the retreated area, indicating that they have a significant impact on the spatial distribution of soil mercury. The soil in the retreated area of Tianshan No.1 Glacier accumulated less mercury (0.09~33.43μg/(m<sup>2</sup>·a), with an average value of 16.92 μg/(m<sup>2</sup>·a). Mercury levels in soil increased from (0.09μg/(m<sup>2</sup>·a) in 1777 to (33.43μg/(m<sup>2</sup>·a) in 2017.

**Key words:** Tianshan glacier retreated area; soil mercury distribution; atmospheric Hg<sup>0</sup> deposition; mercury accumulation rate

汞(Hg)是毒性最强的重金属污染物之一<sup>[1]</sup>.近代工业革命以来,人类工业活动的快速发展加剧了全球汞循环,使得全球大气汞的平均含量大约增加了3~5倍<sup>[2]</sup>.受到人类活动影响的全球主要的汞库包括大气(4.4~5.3Gt)、陆地环境(特别是土壤:250~1000Gg)和水生生态系统(例如海洋:270~450Gg)<sup>[3]</sup>.汞在大气中具有3种形态,即气态元素汞(Hg<sup>0</sup>)、活性气态汞(RGM)和颗粒态汞(PBM).其中,Hg<sup>0</sup>具有较强的化学惰性,可在大气中停留0.5~1.5a<sup>[4-5]</sup>,并且能

在大气环流的驱动下进行全球范围内的长距离传输<sup>[6]</sup>.大气环境中的汞可通过干湿沉降进入到偏远地区陆地生态系统<sup>[7]</sup>.由于汞的生物累积性,大气沉降的汞经甲基化后可进入生物体内并随食物链富集放大<sup>[8-12]</sup>,进而对野生动物和人类产生潜在威胁.

自小冰期以来,全球气候持续变暖,全球冰川加

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4197070484)

\* 责任作者, 副教授, ecocsl@163.com

速消融,面积不断减少<sup>[13]</sup>.其中,天山一号冰川自 1959 年有观测记录以来,持续处于退缩状态.冰川消融后暴露出来的区域,形成了冰川前缘的原生裸地.随着退缩区域土壤的发育、成熟,其理化性质不断发生改变,植被逐渐增多,形成了完整的原生植被演替序列,这为研究汞的空间分布及历史累积过程提供了基础.当前国内外对冰川退缩区汞的生物地球化学过程研究主要集中在海洋性冰川<sup>[14-16]</sup>.而天山一号冰川作为典型的大陆性冰川,降水补给少,冰川消融程度弱,冰川移动速度缓慢,其退缩区的植被格局、气候条件等环境因子与海洋性冰川退缩区具有显著差异.且天山一号冰川位于西风带进入我国的上风向,欧洲及中亚地区排放的大气汞均有可能随西风带进入我国,进一步促进高山冰川汞的累积.中国大陆性冰川和海洋性冰川具有不同的气候特征,海洋性冰川的年均降水量为 1000~3000mm,年均温大于 $-6^{\circ}\text{C}$ ;大陆性冰川的年均降水量为 500~1000mm,年均温为 $-6\sim-12^{\circ}\text{C}$ <sup>[17]</sup>.典型海洋性冰川——贡嘎山海螺沟冰川退缩区 125 年的原生演替序列的调查表明,演替的总趋势为裸地→地被层→草本层→灌木层→乔木层<sup>[18]</sup>.大陆性冰川——天山一号冰川退缩地植物群落演替的研究表明,其演替的总趋势为裸地→地被层→草本层<sup>[19]</sup>.大陆性冰川退缩区的植被对于汞富集的介导作用、汞的分布特征及累积过程与海洋性冰川退缩区存在哪些异同点,大陆性冰川退缩区是否具有海洋性冰川退缩区类似的汞汇效应,这些重要的相关科学问题目前尚未可知.

本研究假设植被是调控其冰川退缩区土壤汞累积与分配的主要因素,并基于生态学中空间替代时间的研究方法,以新疆天山一号冰川为研究对象,测定了土壤、植被、基岩的汞含量及土壤的相关理化性质,明确土壤汞的分布特征及累积过程,进一步估算了该区域汞的历史累积速率,旨在为认识大陆性冰川退缩区汞的生物地球化学循环提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本研究以新疆天山乌鲁木齐河源一号冰川(以下统称“天山一号冰川”)退缩区为研究对象( $43^{\circ}11'\text{N}$ , $86^{\circ}81'\text{E}$ ,海拔高度 3620~3860m)(图 1).天山一号冰川为高寒生态系统,是典型的侵蚀性堆积

地貌,冰川遗迹保存完整;气候寒冷,年均温度为 $-4.6^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量约为 460mm,其中 78%的降水量集中在 5 月~9 月<sup>[20]</sup>;受西风带的影响,是典型的温带大陆性气候<sup>[21-23]</sup>;植物群落结构简单,物种贫乏,以高山草甸和苔原为主.天山一号冰川退缩区的草甸植物以火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、新疆早熟禾(*Poa versicolor subsp. Relaxa*)、囊种草(*Thylacospermum caespitosum*)、黑褐穗藁草(*Carex atrofusca subsp. Minor*)等为主<sup>[19]</sup>,苔藓优势种主要为大曲背藓[*Oncophorus virens (Hedw.) Bird.*]、折叶扭藓[*Tortella fragilis (Drumm.) Limpr.*]、南欧紫萁藓(*Grimmia tergestina Tomm. ex Bruch et Schimp.*)、卷叶灰藓[*Hypnum revolutum (Mitt.) Lindb.*]等<sup>[24]</sup>.由于天山一号冰川海拔较高且气温较低,该区域植被形成耐寒旱等特征.

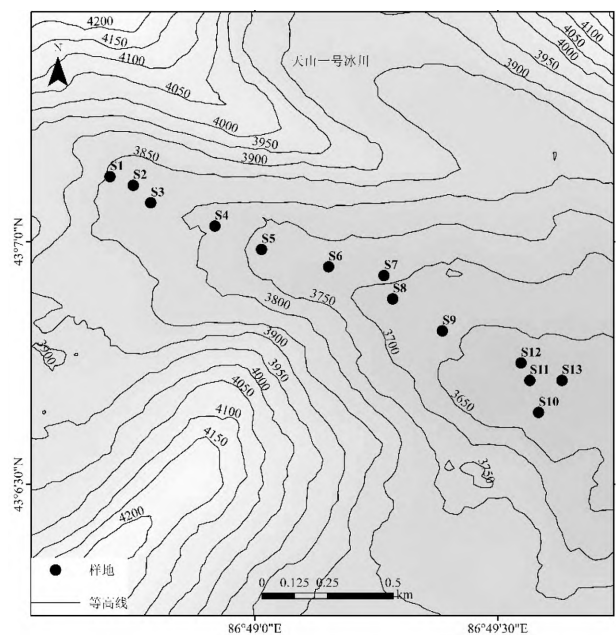


图 1 研究区域及采样点

Fig.1 Location of study area and sampling sites

### 1.2 样品采集

于 2022 年 6 月对天山一号冰川退缩区土壤、植物、基岩样品进行了采集.基于实验站资料、现场考察及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 放射性同位素定年确定了不同样地的退缩年代.设置了 13 个样地,其中 9 个样地地处冰川退缩区内(样地 S1:2017 年;样地 S2:2015 年;样地 S3:2001 年;样地 S4:1985 年;样地 S5:1977 年;样地 S6:2007 年;样地 S7:1965 年;样地 S8:1871 年;样地

S9:1777 年),其余 4 个样地属于退缩区附近的成熟草甸区域(样地 S10~样地 S13),本研究在每个样地设置面积为 1m×1m 的 5 个重复样方,按照 0~5cm、5~10cm、10~15cm 的深度对土壤进行采集,冰川退缩区植被稀少,对于植被样品则设置 50cm×50cm 面积大小的样方进行采集,并在每块样方底层采集岩石,天山一号冰川退缩区的样地信息如表 1、表 2 所示。

表 1 天山一号冰川退缩区样地信息

Table 1 Sampling sites information of the No.1 Glacier retreated area in Tianshan Mountains

样地	退缩年份	海拔 (m)	坡度 (°)	土壤剖面深 度(cm)	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	土壤 pH 值
S1	2017	3860	15	0~5	1.49±0.11	7.14±0.14
				5~10	1.53±0.22	7.27±0.04
				10~15	1.53±0.12	7.28±0.04
S2	2015	3820	3	0~5	1.44±0.16	7.74±0.12
				5~10	1.50±0.22	8.14±0.05
				10~15	1.64±0.22	8.19±0.14
S3	2001	3760	10	0~5	1.31±0.09	8.11±0.01
				5~10	1.35±0.12	8.09±0.05
				10~15	1.38±0.11	8.13±0.06
S4	1985	3730	3	0~5	1.37±0.04	7.91±0.18
				5~10	1.34±0.08	7.81±0.06
				10~15	1.33±0.07	7.86±0.01
S5	1977	3730	12	0~5	1.33±0.06	8.07±0.12
				5~10	1.30±0.04	8.32±0.07
				10~15	1.31±0.02	8.26±0.02
S6	2007	3810	3	0~5	1.34±0.12	7.58±0.24
				5~10	1.25±0.11	8.06±0.15
				10~15	1.25±0.16	8.25±0.08
S7	1965	3720	4	0~5	1.29±0.05	8.10±0.03
				5~10	1.28±0.06	8.04±0.03
				10~15	1.36±0.06	8.18±0.14
S8	1871	3700	17	0~5	1.31±0.11	7.74±0.02
				5~10	1.34±0.11	7.78±0.19
				10~15	1.50±0.10	7.87±0.10
S9	1777	3660	13	0~5	1.33±0.04	7.18±0.04
				5~10	1.37±0.09	7.18±0.05
				10~15	1.44±0.06	7.35±0.06
S10	成熟草甸	3620	5	0~5	0.84±0.05	6.79±0.25
				5~10	0.95±0.07	6.65±0.26
				10~15	0.96±0.17	5.73±0.31
S11	成熟草甸	3630	1	0~5	1.82±0.04	6.18±0.19
				5~10	1.69±0.12	6.32±0.18
				10~15	1.89±0.10	7.01±0.04
S12	成熟草甸	3632	18	0~5	0.63±0.12	6.48±0.11
				5~10	0.71±0.14	6.34±0.05
				10~15	0.77±0.12	6.44±0.17
S13	成熟草甸	3632	11	0~5	0.66±0.02	5.92±0.05
				5~10	1.06±0.19	6.03±0.10
				10~15	1.11±0.11	6.18±0.12

表 2 天山一号冰川退缩区 0~5cm 土壤层的放射性同位素比活度(Bq/kg)

Table 2 Radioisotope specific activity in 0~5cm soil layer of the No.1 glacier retreated area in Tianshan Mountains(Bq/kg)

样地	<sup>137</sup> Cs	<sup>210</sup> Pb	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub>
S1	3.34	232.73	158.19	74.54
S2	0.44	259.36	175.29	84.07
S3	149.09	542.93	86.94	455.99
S4	83.02	517.30	114.72	402.58
S5	43.47	211.82	104.22	107.60
S6	86.94	367.88	103.57	264.32
S7	127.18	323.63	119.63	204.00

### 1.3 样品处理和测定

土壤样品放置于黑暗干燥无尘的室内自然风干后,称量后利用行星式玛瑙研磨仪器(上海净信实业发展有限公司,型号 JX-4G)研磨土壤样品,研磨过后的土样去除>2mm 的粗粒,称量并记录其干重用以计算土壤容重,最后再过 200 目的尼龙筛(74μm)。植被样品和岩石样品先用超纯水将表面杂质清洗掉,然后放置于 50℃ 的电热鼓风干燥箱中烘干至恒重。风干后的植物样品按照地上部分和地下部分进行分离,称量并记录其干重。植物用电动研磨机研磨至粉末状。岩石同样研磨至粉末状。样品研磨前均用清水清洗一遍玛瑙研磨仪器、尼龙筛和电动研磨机,仪器和工具烘干后再用酒精擦拭,待完全风干后再进行磨样。处理过的土壤、植物和岩石样品均置于乙烯密封袋中保存备用。

研磨过后的土壤、植物和岩石样品利用固体进样直接测汞仪(DMA-80, Milestone, Italy)测定总汞浓度。土壤在有机碳含量测定之前先进行处理,以达到去除土壤中无机碳的目的。称取已过 200 目筛子的土样 0.5~1g 放置于 15mL 的离心管中,加入 5mL 的 2mol/L 的稀盐酸,充分摇匀后静置 7h 以上,随后用超纯水洗土和离心 4 次,直至上层清液 pH>6。植物测定其总碳含量和总氮含量,土壤测定其有机碳含量和总氮含量。植物和处理过后的土壤的碳氮含量采用德国元素分析仪(Elementar Vario Macro Cube)测定。

测样时,每 10 个样品设置一对平行样品、一个空白和一个标准物质的测定,土壤标准物质的回收率为 92%~108%,植物标准物质的回收率为 95%~105%(岩石汞浓度的测定也采用土壤标准物质计算回收率)。测定汞浓度的土壤标准物质为

GBW07404a(GSS-4a,标准浓度:(72±6)μg/kg)灰岩地区土壤成分分析标准物质,测定汞浓度的植物标准物质为 NIST SRM 1515(标准浓度:(43.2±2)μg/kg)苹果叶生物成分分析标准物质;测定碳氮含量的土壤标准物质为 IVA33802189,测定植物碳氮含量的标准物质为 AR-2026.利用伽玛能谱探测仪(美国 Canberra 公司,型号 GX6020)测定土壤的放射性同位素,从而对样地进行定年.

#### 1.4 样地定年

本研究中位于天山一号冰川退缩区内的样地共有 9 块,其中两块样地是根据前人的文献资料记载进行定位后采集的<sup>[25]</sup>,这两块样地位于小冰期形成的冰碛垄上,易于分辨,分别是退缩年份为 1871 年和 1777 年对应的样地 8 和样地 9.其余的 7 个样地将根据 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 和 <sup>137</sup>Cs 放射性同位素进行定年.

利用 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 计算样地退缩年龄的公式如下:

$$C = C_0 + C_0 \cdot \exp[-1k] + C_0 \cdot \exp[-2k] + C_0 \cdot \exp[-3k] + \dots + C_0 \cdot \exp[-(n-1)k] + C_0 \cdot \exp(-n \cdot k) \quad (1)$$

式中:  $C$  为采样年份土壤的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的比活度, Bq/kg;  $C_0$  为每年沉降到土壤中的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的比活度, Bq/kg;  $k$  为 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的衰变常数, 0.0311/a;  $n$  为采样年份与该样地冰川退缩年份之间的相隔年份数, a.

<sup>137</sup>Cs 是一种人工放射性核素,在自然界中不存在,人工核爆炸试验之后才出现在自然环境中.历史上 <sup>137</sup>Cs 的产生存在 3 个峰值,其中最大峰值出现在 1963 年.因此,可以根据土壤中的 <sup>137</sup>Cs 含量将所有样地进行排序,样地表层 0~5cm 土壤的 <sup>137</sup>Cs 含量越高,表明该样地越接近于 1963 年.本研究主要采用 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 进行样地定年, <sup>137</sup>Cs 起到校正、检验的作用.基于 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 和 <sup>137</sup>Cs 放射性同位素定年结果,样地 1~7 分别对应的冰川初始退缩年份是:2017 年、2015 年、2001 年、1985 年、1977 年、2007 年、和 1965 年.

#### 1.5 统计计算和分析

土壤容重的计算公式如下:

$$BD = m / V \quad (2)$$

式中:  $BD$  为土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $m$  为风干的土壤质量, g;  $V$  为环刀容积, 100cm<sup>3</sup>.

土壤汞储量的计算公式如下:

$$Pool = BD \cdot Conc \cdot h \quad (3)$$

式中:  $Pool$  为土壤汞储量, μg/m<sup>2</sup>;  $BD$  为土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $Conc$  为土壤汞含量, μg/kg;  $h$  为土壤剖面深度, 5cm.

利用冰川退缩时间与土壤总汞储量作散点图,通过非线性拟合求得曲线方程,将冰川退缩时间代入曲线方程求导得到的导数之中,得到对应的具体退缩年份数的汞累积速率.

采用 EXCEL2021 进行数据整理,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行统计分析,采用 Origin 2018 完成图表的制作.运用线性回归模型分析土壤有机碳含量、氮含量与汞浓度以及植物地上部分汞浓度与植物地下部分汞浓度之间的关系.运用非线性回归模型分析土壤和植物的碳氮比与汞碳比之间的关系.采用单因素方差和独立样本  $T$  检验对数据进行显著性分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤理化性质

在 2015 年之前退缩的样地,随着退缩年龄的增加,土壤 pH 值从 8.02 逐渐变为 7.24,呈现出降低的趋势(表 1).其中位于天山一号冰川退缩区 0~5, 5~10, 10~15cm 层土壤的 pH 值变化范围分别为 7.14~8.11、7.18~8.32 和 7.28~8.26.冰川退缩区不同层土壤的容重差异较小,依次为: 10~15cm[(1.42±0.17)g/cm<sup>3</sup>] > 5~10cm[(1.36±0.16)g/cm<sup>3</sup>] > 0~5cm[(1.35±0.12)g/cm<sup>3</sup>].不同深度土壤的 pH 值和容重无显著差异 ( $P > 0.05$ , 单因素方差分析).

如图 2 所示,天山一号冰川退缩区土壤的有机碳含量依次为: 0~5cm[(0.50±0.20)%] > 5~10cm[(0.46±0.16)%] > 10~15cm[(0.34±0.08)%]; 土壤的氮含量由大到小依次为: 0~5cm[(0.045±0.020)%] > 5~10cm[(0.042±0.020)%] > 10~15cm[(0.029±0.007)%].成熟草甸土壤的有机碳含量由大到小依次为: 0~5cm[(8.76±1.05)%] > 5~10cm[(5.22±0.79)%] > 10~15cm[(2.85±0.55)%]; 土壤的氮含量由大到小依次为: 0~5cm[(0.79±0.13)%] > 5~10cm[(0.51±0.07)%] > 10~15cm[(0.28±0.06)%].冰川退缩区土壤的有机碳含量和氮含量均较低.成熟草甸各层土壤有机碳含量和氮含量显著高于冰川退缩区 ( $P < 0.05$ , 独立样本  $T$  检验).

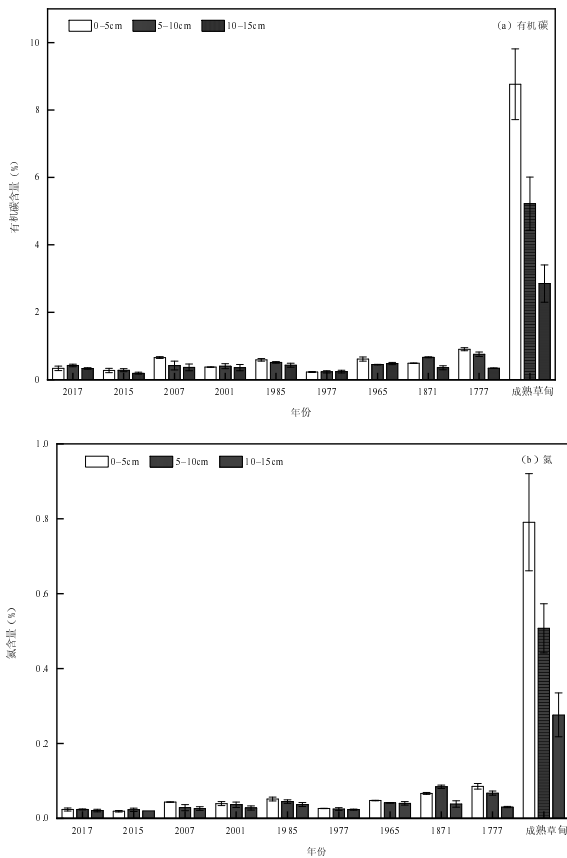


图2 天山一号冰川退缩区土壤的有机碳和氮含量  
Fig.2 Soil organic carbon and nitrogen content of the No.1 glacier retreated area in Tianshan Mountains

2.2 土壤和植被中的汞分布

随着冰川退缩时间增加,其土壤汞含量呈增加趋势(图 3).1777~2017 年的样地土壤平均汞含量为  $(11.45 \pm 6.08) \mu\text{g}/\text{kg}$ ,其土壤和基岩的汞含量依次为:  $0\sim 5\text{cm} [(12.99 \pm 5.50) \mu\text{g}/\text{kg}] > 5\sim 10\text{cm} [(11.78 \pm 7.02) \mu\text{g}/\text{kg}] > 10\sim 15\text{cm} [(9.56 \pm 5.06) \mu\text{g}/\text{kg}] >$  基岩  $[(0.28 \pm 0.08) \mu\text{g}/\text{kg}]$ .  $0\sim 5\text{cm}$  层的土壤汞含量最高值是最低值的 3.7 倍,  $5\sim 10\text{cm}$  层的土壤汞含量最高值是最低值的 6.7 倍,  $10\sim 15\text{cm}$  层的土壤汞含量最高值是最低值的 7 倍.其中 1871 年样地和 1777 年样地  $5\sim 10\text{cm}$  层的土壤汞含量  $[(23.56 \pm 8.70) \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $(20.33 \pm 3.18) \mu\text{g}/\text{kg}]$  大于表层  $0\sim 5\text{cm}$  层的土壤汞含量  $[(18.97 \pm 7.45) \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $(19.00 \pm 2.40) \mu\text{g}/\text{kg}]$ .所有样地的基岩汞含量均较低  $[(0.17 \pm 0.03) \mu\text{g}/\text{kg} \sim (0.42 \pm 0.33) \mu\text{g}/\text{kg}]$ .不同层土壤的汞含量均比基岩的汞含量大.成熟草甸土壤和基岩的汞含量由大到小依次为:  $0\sim 5\text{cm} [(32.07 \pm 6.91) \mu\text{g}/\text{kg}] > 5\sim 10\text{cm} [(23.88 \pm 5.88) \mu\text{g}/\text{kg}] > 10\sim 15\text{cm} [(20.75 \pm 7.75) \mu\text{g}/\text{kg}] >$  基岩  $[(0.40 \pm 0.10) \mu\text{g}/\text{kg}]$ .

成熟草甸各层土壤汞含量均大于冰川退缩区.

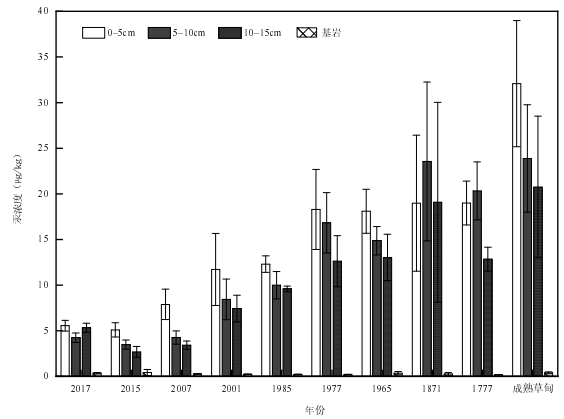


图3 天山一号冰川退缩区土壤和基岩的汞浓度  
Fig.3 Mercury content in soil and bedrock of the No.1 glacier retreated area in Tianshan Mountains

植物地上部分汞含量的均值为  $(16.56 \pm 6.57) \mu\text{g}/\text{kg}$  ( $7.70 \sim 29.47 \mu\text{g}/\text{kg}$ ),植物地下部分汞含量的均值为  $(18.40 \pm 8.97) \mu\text{g}/\text{kg}$  ( $8.72 \sim 41.91 \mu\text{g}/\text{kg}$ ).植物根的汞含量与土壤汞含量的比值均小于 1;而植物地上部分的汞含量与植物地下部分的汞含量的平均比值小于 1(图 4).植物的地上部分和地下部分汞浓度呈正相关(图 5).

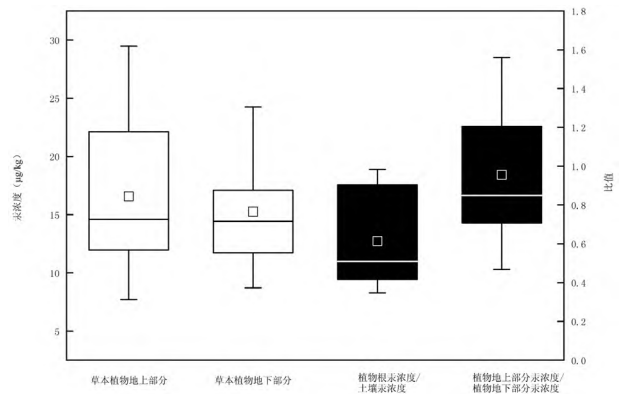


图4 草本植物地上和地下部分汞浓度以及植物根与土壤汞浓度之比、植物地上与地下部分汞浓度之比  
Fig.4 Mercury concentration in the aboveground and underground parts of herbaceous plants, and the ratio of mercury concentration in plant roots to soil and the aboveground and underground plant parts

表层土壤中的汞主要来自大气  $\text{Hg}^0$  的沉积(植被吸收大气中的  $\text{Hg}^0$  及凋落物输入)、大气  $\text{Hg}^{2+}$  的

输入(降水)以及地质成因(基岩的风化)3种来源<sup>[14]</sup>。如图3所示,整体上,土壤汞含量随着深度增加逐渐递减,且各层土壤汞含量均显著高于基岩汞含量( $0.28\pm 0.08\mu\text{g}/\text{kg}$ ),表明表层土壤汞的累积可能受到外源汞输入的影响。从时间尺度上看,随着冰川退缩时间增加,土壤汞含量呈现出增加趋势,这与Wang等<sup>[14]</sup>在海洋性冰川退缩区的研究结果一致。考虑到短距离内降水量(大气Hg湿沉降)变化可忽略,推测这可能是由于植被演替介导的大气 $\text{Hg}^0$ 增加以及土壤侵蚀作用增强等原因所致<sup>[26]</sup>。1871年和1777年样地5~10cm层的土壤汞含量大于表层0~5cm,这可能是由于该样地退缩时间较长,具有相对成熟的草甸植被覆盖,且处于地势较低的位置,易受到冰川融水的冲刷和淋溶作用,从而导致深层土壤汞浓度高于表层。

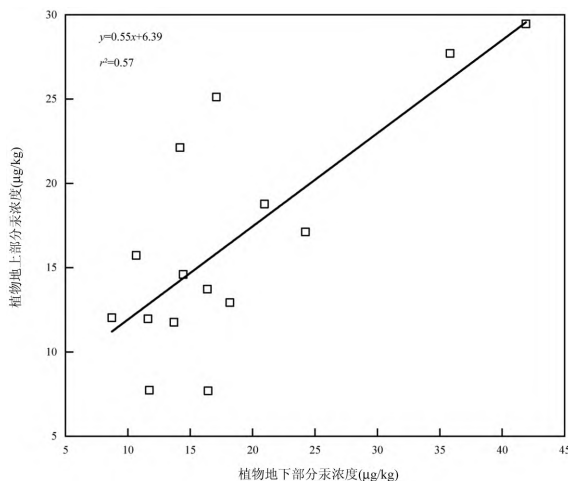
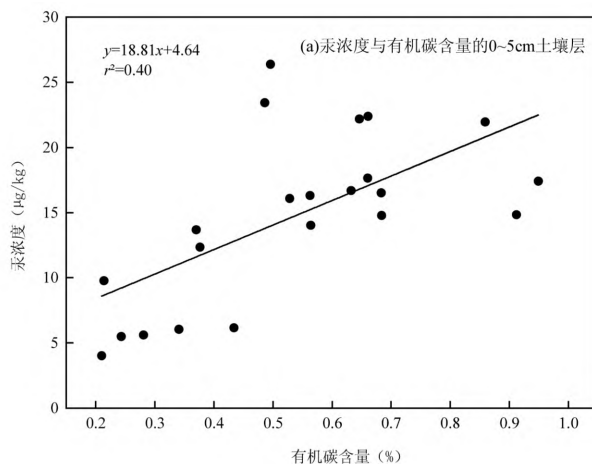


图5 植物地上与地下部分汞浓度的线性关系

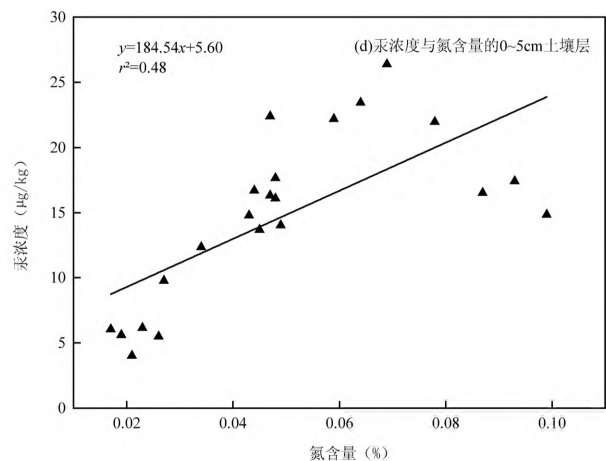
Fig.5 Linear relationship between mercury concentration in aboveground and underground plant parts



### 2.3 土壤汞含量与有机碳和氮含量之间的关系

如图6所示,各层土壤的汞含量与有机碳含量和氮含量均存在显著正相关,其中5~10cm土层的汞含量与有机碳含量和氮含量的相关性最强( $r$ 分别为0.81和0.93)。此外,土壤汞碳比随着碳氮比的降低呈指数增长(图7)。

0~15cm土壤中的汞浓度与有机碳含量及氮含量均呈显著正相关(图7),这归因于二价汞与有机分子中还原硫基团或氮氧基团的强烈络合作用<sup>[27]</sup>。考虑到植物残体为土壤有机碳和氮元素的重要来源<sup>[28]</sup>,推测植被可能是影响退缩区土壤汞分布的重要因素。本研究中土壤汞碳比随着碳氮比的降低呈指数增长(图7),而C/N是衡量有机质分解程度的指标,其中高C/N通常代表新鲜的、分解程度较低的有机质,而低C/N则代表相对较老的、分解程度高的有机质<sup>[29]</sup>,这表明相对较老的、分解程度较高的有机质中积累的汞比新鲜的、分解程度较低的有机质中积累的汞多。从土壤剖面上看,首先,由于表层土壤直接暴露于大气之中,从而使得表层土壤比深层土壤更容易接收大气汞;其次,表层土壤有植被生长(植被类型多为地被层和草本层,属于浅根系列),受植物根系分泌物的产生及凋落物输入的影响,使得表层土壤积累的有机质比深层土壤多,而有机碳含量与汞浓度呈显著正相关,所以土壤汞含量整体上表现出随深度增加逐渐递减的现象。从时间尺度上看,碳氮比随退缩时间增加逐渐降低,土壤汞碳比随着碳氮比的降低呈指数增长(图7),进一步证实了随着冰川退缩时间的增加,植被生物量的增加促进土壤有机质的增加,从而进一步促进土壤汞的富集。



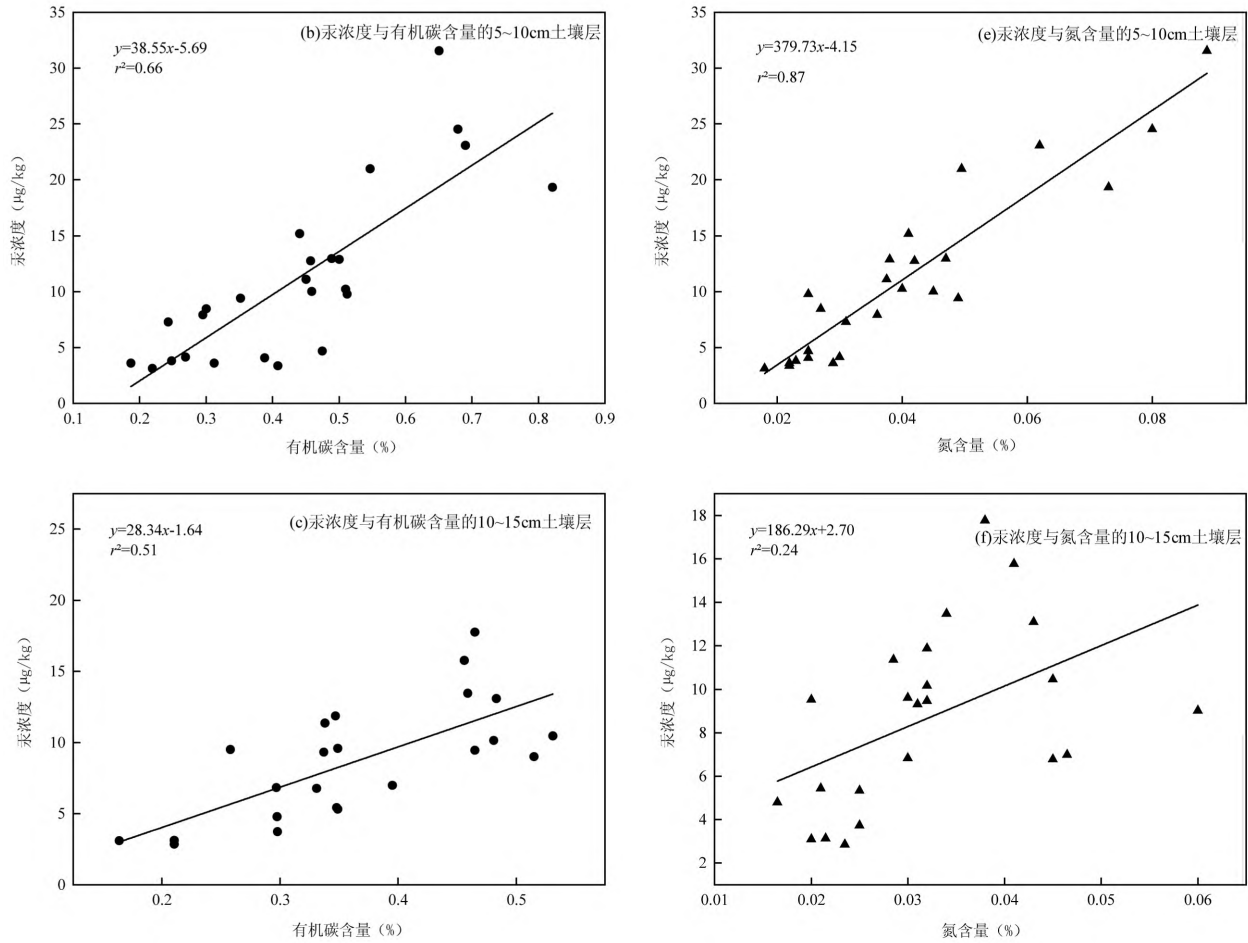


图 6 天山一号冰川退缩区土壤汞浓度与有机碳及氮含量的线性关系

Fig.6 Linear relationship between soil mercury concentration and organic carbon content or nitrogen content of the No.1 Glacier retreated area in Tianshan Mountains

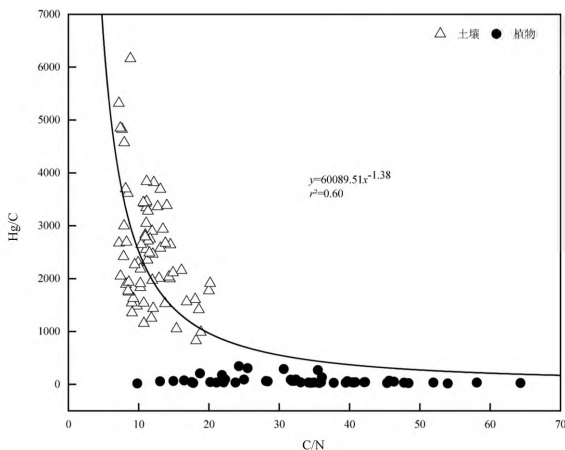


图 7 植物与土壤样品的 Hg/C 与 C/N 的关系

Fig.7 Relationship between Hg/C and C/N of plant and soil samples

### 2.4 土壤汞储量分布及汞累积速率

随着冰川退缩时间的推移,土壤汞储量呈现出增加的趋势(图 8).冰川退缩区各层土壤汞储量依次

为:0~5cm $[(480.56\pm 269.28)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ >5~10cm $[(362.80\pm 264.80)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ >10~15cm $[(284.28\pm 165.81)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ .其中 1871 年样地的土壤汞储量最高,为  $2080\mu\text{g}/\text{m}^2$ .成熟草甸各层土壤汞储量依次为:0~5cm $[(1139.2\pm 90.58)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ >5~10cm $[(986.82\pm 86.06)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ >10~15cm $[(852.88\pm 85.84)\mu\text{g}/\text{m}^2]$ .成熟草甸各层土壤汞储量均显著大于冰川退缩区( $P<0.05$ ).

土壤 0~5cm 层的汞储量 $(480.56\pm 269.28)\mu\text{g}/\text{m}^2$ 约为 10~15cm 层 $(284.28\pm 165.81)\mu\text{g}/\text{m}^2$ 的 2 倍,且土壤汞储量随深度增加逐渐降低,表明退缩区土壤汞的分布可能受地质来源的影响较小,外源 Hg 输入可能是影响土壤汞分布的关键因素.赵井东等<sup>[30]</sup>对天山一号冰川的冰碛地貌研究表明,天山一号冰川的岩性较为单一,以火成岩和变质岩为主,其汞含量与沉积岩相比较低,这可能是地质 Hg 来源占比较小的原因.而外源 Hg 不断输入,例如植被吸收大气 Hg<sup>0</sup>后形成凋落物输入到土壤环境中的“归还作用”等,

使得外源输入 Hg 成为土壤汞库的重要组成部分<sup>[31]</sup>.

随着冰川退缩时间的推移,土壤汞储量呈现出增加的趋势(图 8),且成熟草甸各层土壤汞储量均显著大于冰川退缩区( $P<0.05$ ),植被在其间扮演着举足轻重的作用.Wang 等<sup>[14]</sup>研究表明,海螺沟冰川退缩区植被演替过程中,植被为大气  $Hg^0$  的“泵”,使大气  $Hg^0$  不断向土壤沉降累积,从而使冰川退缩区成为重要的大气  $Hg^0$  汇.Obrist 等<sup>[32]</sup>利用汞稳定同位素对北极苔原土壤汞来源进行解析,证实了大气  $Hg^0$  沉降是土壤汞的主要来源.而天山冰川退缩区植被生物量同样随演替时间增加而增加,因此土壤汞库的变化可能与植被介导的大气  $Hg^0$  沉降有关.

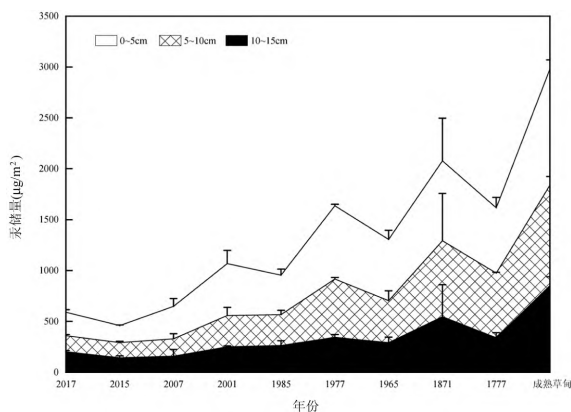


图 8 天山一号冰川退缩区土壤汞储量

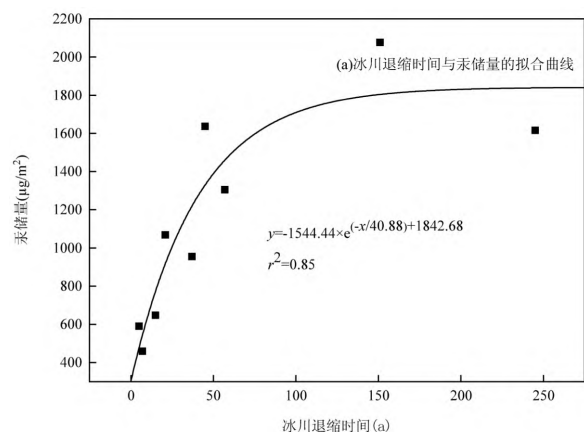
Fig.8 Soil mercury storage in the No.1 Glacier retreated area in Tianshan Mountains

利用冰川退缩时间与土壤总汞储量作散点图(图 9(a)),通过非线性拟合求得曲线方程,将冰川退缩时间代入曲线方程求导得到的导数之中,得到对应的具体退缩年份数的汞累积速率.天山一号冰川退缩区土壤记录的历史汞累积速率为  $0.09\sim 33.43\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (图 9(b)).1777 年( $0.09\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )至 2017 年( $33.43\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )间土壤记录的汞累积速率呈现出逐渐增加的趋势.其中,1777 年( $0.09\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )至 1871 年( $0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ),冰川退缩区的汞累积速率缓慢增加;1871 年( $0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )之后,冰川退缩区的汞累积速率快速增加.

本研究基于冰川退缩时间及土壤汞库估算了历史汞累积速率.与 Wang 等<sup>[14]</sup>对中国的 3 个海洋性冰川退缩区的研究结果对比,天山一号冰川退缩区土壤记录的历史汞累积速率较低( $0.09\sim 33.43\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )(图 9(b)).1777 年~2017 年土壤记录的汞累积速率由

$0.09\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 增加到  $33.43\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,总体呈先缓慢增加后快速增加的趋势.结合天山一号冰川周围环境及历史背景推测其退缩区土壤记录的历史汞累积速率不断增加的原因可能有以下 2 个方面:一是周边人为活动的影响.天山一号冰川是最为临近人类活动区域的冰川之一.人类生产和生活伴随的重金属的开采、冶炼、利用等一系列活动可能会导致大气汞含量的增加.随着乌鲁木齐市经济的快速发展,天山一号冰川周围的工业生产活动(包括焦炭厂、水泥厂、火电厂、电石厂、石灰厂等生产企业)增多可能是导致其土壤记录的汞累积速率增加的关键因素.Kang 等<sup>[33]</sup>对天山雪岭云杉年轮汞的研究发现,1900~1950 年天山区域大气汞浓度显著增加,证实了这一现象与当地人为汞排放密切相关,这与本研究中天山一号冰川退缩区土壤记录的汞累积速率于 1871 年( $0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )后快速增加基本一致.贺春露等<sup>[34]</sup>的研究表明,中亚地区工业发展排放的大气汞会经西风带输送到我国新疆境内.新疆及中亚地区工业发展所带来的共同影响,是导致土壤记录的历史汞累积速率由缓慢增加转为快速增加的重要原因.

二是近几十年来全球背景下大气汞沉积量的增加.UNEP 报告<sup>[35]</sup>显示,自工业革命开始以来,人为排放量一直大于自然排放量.David 等<sup>[36]</sup>的研究表明,目前大气汞沉积量是 1850 年(工业时代的开始)的 3 倍.这与本研究土壤记录的汞累积速率于 1871 年( $0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )后快速增加基本相符.冯新斌等<sup>[37]</sup>的研究显示,尽管全球范围内的人为活动向大气排放的汞含量有所下降,但是土壤与生物的汞含量并没有降低,这也意味着自工业革命以来先前排放的汞仍在当前生态系统中周而复始的循环传输.





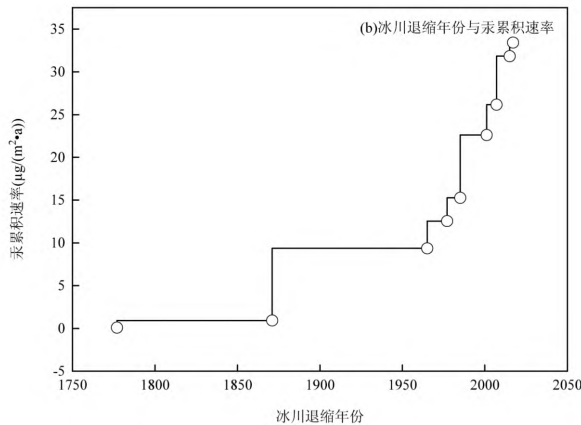


图9 天山一号冰川退缩时间与土壤汞储量及汞累积速率的关系

Fig.9 Relationship between the retreated time and soil mercury storage, accumulation rate of mercury in the No.1 Glacier retreated area of Tianshan Mountains

综上所述,区域背景和全球背景下大气汞含量增加以及植被对土壤汞富集的影响,都可能是导致冰川退缩区土壤记录的汞累积速率增加的原因。

### 3 结论

3.1 退缩区内各层土壤汞浓度与有机碳含量和氮含量呈显著正相关,表明退缩区植被的生长促进了土壤有机碳含量和氮元素的积累,从而促进了土壤汞的富集。

3.2 从土壤剖面上看,土壤汞含量和汞储量随着深度增加逐渐而递减,各层土壤汞含量均显著高于基岩汞含量,表现为:0~5cm $[(12.99\pm 5.50)\mu\text{g}/\text{kg}] > 5\sim 10\text{cm} [(11.78\pm 7.02)\mu\text{g}/\text{kg}] > 10\sim 15\text{cm} [(9.56\pm 5.06)\mu\text{g}/\text{kg}] > 基岩 [(0.28\pm 0.08)\mu\text{g}/\text{kg}]$ 。退缩区土壤汞的分布可能受地质来源的影响较小,外源 Hg 输入可能是影响土壤汞分布的关键因素;从时间尺度上看,随着冰川退缩时间的增加,退缩区各层土壤汞含量和汞储量呈现出增加趋势,可能与植被的数量和类型有关。

3.3 由于植被生物量较小,天山一号冰川退缩区土壤中汞的累积速率较低。土壤记录的汞累积速率呈现出逐渐增加的趋势。其中 1777 年  $0.09\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  至 1871 年  $(0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a}))$  的汞累积速率缓慢增加,1871 年  $(0.94\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a}))$  之后的汞累积速率快速增加。区域背景和全球背景下大气汞含量增加以及植被对土壤汞富集的影响,是导致冰川退缩区土壤记录的汞累积速率增加的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等.汞的环境地球化学研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013,32(5):503-530.  
Feng X B, Chen J B, Fu X W, et al. Progress in environmental geochemistry of mercury [J]. Journal of Mineral and Rock Geochemistry, 2013,32(5):503-530.
- [2] Fitzgerald W F . Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET) [J]. Water Air & Soil Pollution, 1995,80(1-4):245-254.
- [3] Obrist D, Kirk J L, Zhang L, et al. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use [J]. Ambio., 2018,47(2): 116-140.
- [4] Sheu G R , Mason R P .An Examination of Methods for the Measurements of Reactive Gaseous Mercury in the Atmosphere [J]. Environmental Science & Technology, 2001,35(6):1209-1216.
- [5] Fitzgerald W F .Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET) [J]. Water Air & Soil Pollution, 1995,80(1-4):245-254.
- [6] Sommar J, Osterwalder S, Zhu W. Recent advances in understanding and measurement of Hg in the environment: Surface-atmosphere exchange of gaseous elemental mercury ( $\text{Hg}^0$ ) [J]. Science of The Total Environment, 2020,721:137648.
- [7] 冯新斌,史建波,李平,等.我国汞污染研究与履约进展 [J]. 中国科学院院刊, 2020,35(11):7.  
Feng X B, Shi J B, Li P, et al. Progress in mercury pollution research and compliance in China [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2020,35(11):7.
- [8] Li C, Xu Z, Luo K, et al. Biomagnification and trophic transfer of total mercury and methylmercury in a sub-tropical montane forest food web, southwest China [J]. Chemosphere, 2021,277(6):130371.
- [9] Lavoie R A, Jardine T D, Chumchal M M, et al. Biomagnification of Mercury in Aquatic Food Webs: A Worldwide Meta-Analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(23):13385-13394.
- [10] Kasun S. A, Guangle Q, Eben G, et al. Mercury flow through an Asian rice-based food web [J]. Environmental Pollution, 2017,229:219-228.
- [11] Eagles-Smith C A, Silbergeld E K, Basu N, et al. Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change[J]. Ambio, 2018,47(2):170-197.
- [12] Chételat J, Ackerman J T, Eagles-Smith C A, et al. Methylmercury exposure in wildlife: a review of the ecological and physiological processes affecting contaminant concentrations and their interpretation [J]. Science of the Total Environment, 2020,711:135117.
- [13] 苏勃,高学杰,效存德.IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读 [J]. 气候变化研究进展, 2019,15(4):395-404.  
Su B, Gao X J, Xiao C D. Interpretation of changes in the cryosphere and their impacts in the IPCC Special Report on Global 1.5°C Warming [J]. Progress in Climate Change Research, 2019,15(4):395-404.
- [14] Wang X, Luo J, Yuan W, et al. Global warming accelerates uptake of atmospheric mercury in regions experiencing glacier retreat [J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States of America, 2020,117(4):2049-2055.

- [15] Sormo E G. Mercury in a remote glacier-fed alpine catchment in China [J]. 2014:12-13.
- [16] 吴飞,张福栋,王训,等.青藏高原中汞的分布特征及影响因素——以典型海洋性冰川小流域为例 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(11):4776-4784.  
Wu Fei, Zhang Fudong, Wang Xun, et al. The distribution characteristics and influencing factors of mercury in the Qinghai Tibet Plateau: A case study of a typical marine glacier small watershed [J]. China Environmental Science, 2019,39(11):4776-4784.
- [17] 李开明,陈世峰,康玲芬,等.中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和玉龙雪山白水河 1 号冰川为例 [J]. 干旱区研究, 2018,35(1):12-19.  
Li K M, Chen S F, Kang L F, et al. Comparative analysis of changes in Chinese Mainland glaciers and marine glaciers in China: Taking Glacier 1 at the source of Urumqi River in Tianshan Mountains and Glacier 1 at Baishuihe River in Yulong Snow Mountains as examples [J]. Research on Arid Areas, 2018,35(1):12-19.
- [18] 杨丹丹,罗辑,余佳,等.贡嘎山海螺沟冰川退缩区原生演替序列植被生物量动态 [J]. 生态环境学报, 2015,24(11):1843-1850.  
Yang D D, Luo J, She J, et al. Dynamics of vegetation biomass in the primary succession sequence of Hailuoguo glacier retreat area in Gongga Mountain [J]. Journal of Ecology and Environment, 2015,24(11):1843-1850.
- [19] 刘光琇,李师翁,伍修锬,等.天山乌鲁木齐河源 1 号冰川退缩地植物群落演替规律及机理研究 [J]. 冰川冻土, 2012,34(5):8.  
Liu G X, Li S W, Wu X K, et al. Study on the Succession Law and Mechanism of Plant Communities in the Retracted Land of Glacier No.1 at the Source of the Urumqi River in Tianshan [J]. Glacier permafrost, 2012,34(5):8.
- [20] Yue X, Zhao J, Li Z, et al. Spatial and temporal variations of the surface albedo and other factors influencing Urumqi Glacier No. 1 in Tien Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2017,63(241):899-911.
- [21] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years [J]. Nature Geoscience, 2015,8:716-722.
- [22] Peng J J, Li Z Q, Xu L P, et al. Glacier mass balance and its impacts on streamflow in a typical inland river basin in the Tianshan Mountains, northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2022,14(4):455-472.
- [23] Li Z Q, Li C J, Li Y F, et al. Preliminary results from measurements of selected trace metals in the snow-firn pack on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2007,53(182):368-373.
- [24] 袁祯燕,石岩磊,刘兵,等.天山一号冰川冰缘区 4 种生境苔藓植物群落的生态位分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2022,31(3):26-34.  
Yuan Z Y, Shi Y L, Liu B, et al. Niche analysis of moss plant communities in four habitats of the Tianshan No.1 Glacier periglacial zone [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2022,31(3):26-34.
- [25] Wang J. Ancient glaciers at the head of Urumqi River, Tian Shan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981,3(Special publication):56-63.
- [26] Liu N, Cai X, Jia L, et al. Quantifying Mercury Distribution and Source Contribution in Surface Soil of Qinghai-Tibetan Plateau Using Mercury Isotopes [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(14):5903-5912.
- [27] Schuster E. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes - A review of the literature [J]. Water Air & Soil Pollution, 1991,56(1):667-680.
- [28] 胡娟娟,傅伯杰,靳甜甜,等.黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响 [J]. 应用生态学报, 2009,20(1):45-50.  
Hu Chanjuan, Fu Bojie, Jin Tiantian, et al. The impact of vegetation restoration on soil microbial biomass carbon and nitrogen in loess hilly and gully areas [J]. Journal of Applied Ecology, 2009,20(1):45-50.
- [29] Obrist D, Johnson D W, Lindberg S E, et al. Mercury distribution across 14 U.S. Forests. Part I: spatial patterns of concentrations in biomass, litter, and soils. [J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(9):3974-81.
- [30] 赵井东,施雅风,李忠勤.天山乌鲁木齐河流域冰川地貌与冰期研究的回顾与展望 [J]. 冰川冻土, 2011,33(1):118-125.  
Zhao J D, Shi Y F, Li Z Q. Review and Prospect of Glacier Landform and Ice Age Research in the Urumqi River Basin of Tianshan Mountains [J]. Glacier Frozen Soil, 2011,33(1):118-125.
- [31] Wang X, Yuan W, Feng X, et al. Moss facilitating mercury, lead and cadmium enhanced accumulation in organic soils over glacial erratic at Mt. Gongga, China [J]. Environmental Pollution, 2019,254(Pt A):112974.
- [32] Obrist D, Agnan Y, Jiskra M, et al. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution [J]. Nature, 2017, 547(7662):201-204.
- [33] Kang H, Liu X, Guo J, et al. Increased mercury pollution revealed by tree rings from the China's Tianshan Mountains [J]. Science bulletin, 2018,63(20):1328-1331.
- [34] 贺春露,高源,李瑶,等.天山雪岭云杉树木年轮汞记录对区域大气汞历史演变的重建及其方法验证 [J]. 地球与环境, 2023,51(4):455-464.  
He C L, Gao Y, Li Y, et al. Reconstruction and method validation of regional atmospheric mercury historical evolution using mercury records from spruce tree rings in the Xueling Mountains of Tianshan Mountains [J]. Earth and Environment, 2023,51(4):455-464.
- [35] Programme U N E. Global Mercury Assessment 2013 Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport [J]. 2016.
- [36] Streets D G, Horowitz H M, Jacob D J, et al. Total mercury released to the environment by human activities [J]. Environmental science & technology, 2017,51(11):5969-5977.
- [37] 冯新斌,付学吾, SOMMAR Jonas, 等.地表自然过程排汞研究进展及展望 [J]. 生态学杂志, 2011,30(5):845-856.  
Feng X B, Fu X W, SOMMAR Jonas, et al. Research progress and prospects of mercury emissions from surface natural processes [J]. Journal of Ecology, 2011,30(5):845-856.

**作者简介:** 彭诗雅(1998-),女,广东佛山人,新疆大学生态与环境学院硕士研究生,研究方向为植物生态学.582902365@qq.com.