

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)5 - 698 - 11

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000269

海螺沟冰川退缩区土壤元素分布特征及影响因素

何清清^{1,2}, 邴海健¹, 吴艳宏^{1*}, 王吉鹏¹, 周俊¹, 孙宏洋¹, 祝贺^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤形成和发育过程中, 元素的赋存特征对陆地生态系统的健康发育至关重要。本研究选择海螺沟冰川退缩区, 按照土壤年龄设置了 6 个采样点(0, 30, 40, 52, 80 和 120 年), 调查了 18 种元素在 O 层(有机层)、A 层(矿物质层)和 C 层(母质层)的分布特征, 并分析了主要影响因素。结果显示, 在海螺沟冰川退缩区 C 层土壤中所有元素的浓度变化不大, 反映了母岩基质相对单一; 在表层土壤(O 层和 A 层)中, Al、Ba、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、Sr、Ti、V 发生明显亏损, P 和 Zn 次之, 而 Cd 和 Pb 存在明显富集。随土壤发育和植被演替, 大多数元素的亏损程度增加, 特别在针叶林阶段明显高于植被演替前期。土壤风化、植物吸收和径流损失对大多数元素的亏损具有重要影响, 而 Cd 和 Pb 的高度富集主要归因于大气沉降和植物的归还作用。

关键词: 元素; 土壤发育; 元素分布特征; 冰川退缩区; 贡嘎山

中图分类号: K903

文献标志码: A

高山地区是响应全球变暖和人类活动非常敏感的区域^[1], 随着全球变暖, 山地冰川退缩留下冰川退缩迹地。随着时间推移, 在冰川退缩迹地上的堆积物经历风化作用、成土作用, 形成具有不同成土时间的土壤序列; 同时, 植被逐步建立, 形成由裸地-苔藓-草本-灌木-乔木的植被原生演替序列, 成为研究早期土壤和生态系统发育的理想场所^[2-4]。

土壤发育和植被演替过程中, 冰川退缩迹地上发生了土壤元素组成的显著变化。在贡嘎山海螺沟冰川退缩区, He 和 Tang^[5] 发现土壤有机碳和氮的累积随时间增加明显, 而且具有较高的累积量; Bing 等^[6] 研究了土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 等微量元素随土壤发育的变化, 发现 Cd 和 Pb 在土壤有机层明显富集, Cd 呈现出较高的潜在生态风险; Prietzel 等^[7] 对

土壤中 P 形态组成变化的研究发现, 随土壤发育有机 P 持续增加, 而钙、铝结合态的 P 持续减少。类似的情形同样发生在瑞士阿尔卑斯山的 Damma 冰川。Bernasconi 等^[8] 的研究发现, 在瑞士的 Damma 冰川退缩区 150 年的土壤序列中, 土壤有机碳和总氮的含量也随时间增加而出现指数性增加的趋势, 而且他们也发现了某些微量金属元素(如 Cu、Pb 等)也随时间显著增加, 并把这种现象归因于大气沉降的影响; Hindshaw 等^[9] 对 Damma 冰川退缩区土壤 Ca 的同位素研究表明, 在整个退缩区土壤中 Ca 的同位素没有出现明显的差异, 而植物中明显富集轻的 Ca 同位素。以上研究增进了我们对成土早期元素赋存特征和影响因素的认识, 然而当前研究多针对冰川退缩区内一种或几种元素在不同成土阶

收稿日期(Received date): 2017 - 06 - 20; 改回日期(Accepted date): 2017 - 09 - 30

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41630751; 41402313); 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室开放基金项目; 中科院青年创新促进会人才项目[National Nature Science Foundation of China (41630751; 41402313); Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences; Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Science.]

作者简介(Biography): 何清清(1993 -), 女, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事生物地球化学研究 [He Qingqing, (1993 -), female, born in Chengdu, Sichuan province, Ph. D candidate, interested in biogeochemistry] E-mail: hqq@imde. ac. cn

* 通讯作者(Corresponding author): 吴艳宏(1969 -), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为生物地球化学 [Wu Yanhong (1969 -), male, Ph. D., professor, specialized in biogeochemistry] E-mail: yhwu@imde. ac. cn

段的分布特征,而缺乏多种元素的系统性研究与对比。

自小冰期结束(1880s)以来,贡嘎山海螺沟冰川退缩区发育了典型的土壤年代序列和完整的植被演替序列,这为研究土壤发育过程中元素的迁移和赋存特征、土壤元素变化与植被演替过程的关系提供了理想场所。本研究选择海螺沟冰川退缩迹地120年的土壤序列和较为完整的植被演替序列,以空间代替时间,重点调查土壤剖面中与成土过程、植物生长密切相关或者受人类活动影响的18种常量元素和重金属元素(Al、Ba、Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Pb、Sr、Ti、V、Zn)随土壤发育和植被演替的累积特征,并探讨影响元素分布和累积差异的关键因素。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

贡嘎山(101°30′~102°15′E,29°20′~30°20′N)位于青藏高原东缘,是四川盆地与青藏高原的过渡地带,面积约10000 km²,主峰海拔7556 m,居青藏高原东缘山峰之首。区内新构造运动强烈,地貌上为高山峡谷类型,贡嘎山四周发育数十条亚洲最大的现代海洋性冰川。海螺沟冰川退缩区位于贡嘎山东坡海拔2800~2950 m,年均温4.2℃,年均降水量1947 mm^[10]。

小冰期以来,随着全球气温不断上升,海螺沟冰川退缩明显,留下多道终碛和侧碛,在距冰川末端水平距离2 km左右的冰川退缩迹地上,土壤和植被逐渐发育,经历了裸地-草本地被-柳-沙棘-水冬瓜、水冬瓜、云冷杉-桦-杜鹃、云冷杉五个阶段的植被原生演替,形成较为清晰的植被带谱^[11]。海螺沟冰川退缩区土壤年代序列的土壤母质以硅酸盐矿物为主,并有少量碳酸盐和磷酸盐矿物^[12],土壤类型为粗骨土^[3]。

1.2 样品采集与分析

2012年11月在冰川退缩年龄约为0、30、40、52、80和120年的冰碛垄上设置6个采样点,每个样点挖掘6个土壤剖面。按照野外土壤发育性状,将土壤按以下层次采集:O层,棕黑色,完全分解的腐殖质层;A层,暗棕色,为腐殖质积累的矿质土表层;C层,青灰色,母质层,其中根据不同点位C层的

深度又将其划分为C1、C2或C3。由于土壤发育时间较短,土壤剖面均未发育B层。此外,在0年样点尚未有土壤发育,所以采集表层0~15 cm的细粒物质。每个剖面采集的土壤用聚氯乙烯塑料袋带回实验室风干后过2 mm筛备用。

将土壤样品经1 mol/L的稀盐酸去除无机C后,利用元素分析仪测定土壤有机碳(SOC)。土壤pH采用玻璃电极法测定,其中O层土水比(质量:体积)为1:10,A层和C层为1:2.5。用于元素浓度分析的样品用玛瑙研钵研磨,过100目筛。用于元素浓度分析的样品用HCl-HNO₃-HF-HClO₄法消解,消解液中Al、Ba、Ca、Fe、K、Mg、Mn、Na、P、Sr、Ti、V、Zn的浓度使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb的浓度使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。分析过程中,使用GSD-9和GSD-11(中国)作为标准物质,回收率为90%~110%。采用美国SPEXTM标准溶液分析测试误差,经多次分析相对标准偏差小于5%。

1.3 数据分析

通过计算土壤元素的平均值、标准误和变异系数等,比较元素浓度变化特征和变异程度。变异系数(CV)可以用来描述区域化变量空间变异程度,根据变异系数可将元素变异性进行分级(CV<10%为弱变异性;CV=10%~100%为中等变异性;CV>100%为强变异性)^[13]。

土壤元素储量指一定厚度土层中单位面积元素的总量,根据土壤元素含量、土壤容重、土层厚度来计算,计算公式为:

$$Stock = C \times BD \times D \times 10^{-1}$$

其中,Stock表示各元素在土层里的储量(kg/ha);C表示各元素在土层中的浓度(mg/kg);BD表示土层的容重(g/cm³);D表示土层厚度(cm);10⁻¹为单位系数。

因子分析是用较少的综合指标概括存在于大量数据中的各类信息,这些综合指标之间彼此不相关,代替的信息不重叠,并且它可以对原始变量进行分类和综合评价,具有广泛的应用^[14]。本文在进行因子分析过程中,选用主成分提取法、Kaiser标准化的正交旋转法进行分析,求出因子载荷矩阵。本研究中的数据使用SPSS 19.0和Origin 9.0软件完成。

2 结果

2.1 土壤基本属性

海螺沟冰川退缩区土壤理化属性见表 1。随冰川退缩时间增加,土壤 O 层和 A 层的深度逐渐增加。土壤 O 层和 A 层的容重随土壤发育逐渐降低,而 C 层土壤容重变化不大。各土层 pH 整体随土壤发育呈下降趋势,由冰川末端的碱性(pH = 8.54)转变为 120 年处的偏酸性(pH:4.84 ~ 6.73);其中,A 层下降趋势最为显著,到针叶林阶段(样点 S5 和 S6)已降至 5.0 以下。随着土壤发育,O 层和 A 层中 SOC 除在样点 S3 处较低外,整体呈上升趋势,而 C 层 SOC 的含量整体上均较低。

2.2 土壤元素浓度特征

土壤元素浓度的垂直剖面分布见表 2。Cd 和 Pb 的浓度随深度增加而降低,P 和 Zn 随土壤深度增加先降低再升高,其它元素的浓度均呈现出随深

度增加而增加的趋势。除 Al 在 C 层为弱变异(CV = 0.05),其余元素在 3 个土层均呈现中等变异。随土层深度增加,Cu 的变异系数增大,Ca 和 Ni 的变异系数先减小后增大,P 在 A 层变异系数最大,其它元素的变异系数均随土层深度增加而减小。

随土壤的逐渐发育,元素浓度的空间分布发生了明显变化(图 1)。O 层中 Al、Ba、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Sr、Ti、V 在样点 S3 处浓度最高,Cd 和 Zn 在样点 S2 最高,Pb 在样点 S6 显著高于其它样点。A 层中 Al、Ba、Cr、K、Mn、Na、P、Sr 的浓度在样点 S3 出现最高值,Ca、Cu、Fe、Mg、Ni、Ti、V、Zn 的浓度在样点 S2 处最高,Cd、Pb 在各样点间浓度变化不大。C 层中 Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、Ti、V、Zn 的浓度在样点 S1 和 S2 出现较高值,在 S6 出现较低值,而 Al、Ba、K、Na、P、Pb、Sr 的浓度则呈现出相反的趋势。

2.3 土壤元素的储量特征

土壤元素的储量变化见表 3。在垂直分布上,

表 1 海螺沟冰川退缩区土壤理化属性特征(均值 ± 标准误)

Tab. 1 Physicochemical properties of the surface soil in the foreland of the Hailuoguo Glacier (mean ± SE)

样点	年龄(年)	海拔(m)	土层	深度(cm)	容重(g/cm ³)	pH	SOC(mg/g)
S1	0	2960	表层	0-15	1.80	8.54 ± 0.01	1.90 ± 0.06
S2	30	2940	O	0-3	0.34	6.17 ± 0.14	242.90 ± 50.74
			A	3-4	0.75	5.61 ± 0.19	57.21 ± 14.06
			C1	4-14	1.37	8.22 ± 0.26	6.38 ± 0.76
			C2	>46	1.39	8.41 ± 0.06	4.40 ± 0.39
S3	40	2920	O	0-6	0.31	6.56 ± 0.19	163.30 ± 13.40
			A	6-9	0.66	6.42 ± 0.14	47.15 ± 7.39
			C1	9-19	1.44	6.95 ± 0.35	5.25 ± 0.93
			C2	>47	1.13	7.88 ± 0.22	4.45 ± 1.06
S4	52	2910	O	0-5	0.24	6.18 ± 0.13	211.52 ± 36.78
			A	5-7	0.60	5.47 ± 0.09	86.57 ± 32.65
			C1	7-17	1.26	5.92 ± 0.14	3.20 ± 0.38
			C2	>49	1.18	7.20 ± 0.36	2.32 ± 0.34
S5	80	2890	O	0-12	0.20	4.74 ± 0.30	277.29 ± 31.72
			A	12-19	0.59	4.44 ± 0.19	117.41 ± 20.33
			C1	19-29	1.27	6.03 ± 0.13	3.25 ± 0.23
			C2	29-49	1.44	6.45 ± 0.19	2.22 ± 0.13
			C3	>62	1.57	7.64 ± 0.26	1.43 ± 0.13
S6	120	2850	O	0-12	0.17	5.59 ± 0.13	348.04 ± 6.30
			A	12-22	0.60	4.84 ± 0.16	137.11 ± 24.17
			C1	22-32	1.33	5.89 ± 0.18	4.05 ± 0.35
			C2	32-52	1.39	6.49 ± 0.08	2.45 ± 0.41
			C3	>60	1.44	6.73 ± 0.19	2.38 ± 0.34

注:土壤 O 层的 pH 采用 1:10 的土水比(重量·体积),土壤 A 和 C 层则采用 1:2.5 的土水比。

表2 海螺沟冰川退缩区土壤元素浓度
Tab. 2 Elemental concentrations in the foreland soil of the Hailuoguo Glacier

土层	Al mg/g	Ba mg/kg	Ca mg/g	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/g	K mg/g	Mg mg/g	Mn mg/kg	Na mg/g	Ni mg/kg	P mg/kg	Pb mg/kg	Sr mg/kg	Ti mg/g	V mg/kg	Zn mg/kg	
0	均值	32.79	410	26.19	2.40	52.01	18.50	17.98	10.88	8.89	458	7.31	20.44	994	50.61	218	2.23	56.55	109
	标准误差	16.06	204	7.09	1.33	27.36	8.90	8.95	5.24	4.79	152	4.12	10.03	202	15.31	117	1.09	28.90	52.65
	变异系数	0.49	0.50	0.27	0.55	0.53	0.48	0.50	0.48	0.54	0.33	0.56	0.49	0.20	0.30	0.53	0.49	0.51	0.48
A	均值	56.08	653	34.10	0.58	93.86	19.83	30.37	17.59	15.66	567	13.11	29.12	912	26.97	361	4.08	102	66.76
	标准误差	7.92	161	4.47	0.26	20.98	10.46	6.76	3.41	3.71	123	2.42	11.80	240	5.18	91.28	0.80	23.55	18.05
	变异系数	0.14	0.25	0.13	0.45	0.22	0.53	0.22	0.19	0.24	0.22	0.18	0.41	0.26	0.19	0.25	0.20	0.23	0.27
C	均值	68.23	827	44.95	0.17	105	22.98	35.33	21.57	18.63	686	17.36	31.21	1113	19.95	490	4.93	124	69.00
	标准误差	3.30	204	7.18	0.08	15.25	14.29	4.61	2.54	2.29	74.78	2.58	13.00	188	2.47	114	0.72	18.80	12.98
	变异系数	0.05	0.25	0.16	0.43	0.15	0.62	0.13	0.12	0.12	0.11	0.15	0.42	0.17	0.12	0.23	0.15	0.15	0.19

表3 海螺沟冰川退缩区土壤元素的储量分布 (kg/ha)
Tab. 3 The stocks of soil elements in the foreland soil of the Hailuoguo Glacier (kg/ha)

年龄(年)	土层	厚度(cm)	Al	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Zn
0	表层	30	349209	2785	291607	1.32	671	186	237429	94352	118234	4554	80155	244	4822	83	1848	33232	907	463
30	O	3	5453	40.63	3859	0.09	10.65	3.21	3682	1437	1873	64.35	1065	4.52	84.50	3.29	23.35	481	12.53	11.91
	A	1	4317	31.08	3010	0.05	8.32	2.75	2869	1125	1478	51.85	869	3.45	64.60	2.00	18.68	387	10.15	8.54
	C	29	244329	1751	235155	1.30	496	194	164780	67719	85210	3047	50215	225	3435	60.76	1119	21773	604	376
	总	33	254099	1822	242024	1.44	515	200	171330	70281	88560	3163	52148	233	3584	66.04	1161	22641	626	397
40	O	6	9702	125	5709	0.26	13.99	3.14	4683	3156	2397	91.64	2325	4.85	186	7.92	67.76	545	14.68	17.63
	A	3	12307	157	7074	0.08	20.41	6.69	6974	4152	3601	135	2829	9.64	231	5.43	80.38	788	21.39	15.50
	C	27	244743	3096	177182	0.70	387	100	135045	85405	69758	2466	59666	125	4389	74.87	1678	17955	455	265
	总	36	266752	3378	189965	1.04	422	110	146702	92713	75756	2693	64819	140	4806	88.22	1826	19288	491	298
52	O	5	5429	69.92	3864	0.20	7.25	1.67	2619	1807	1331	61.82	1352	2.46	129	4.92	40.24	327	8.60	12.10
	A	2	7506	93.72	4519	0.05	11.71	1.97	4180	2516	2186	81.49	1808	3.35	146	3.60	51.37	516	13.77	8.84
	C	28	228297	2782	145050	0.51	318	51.97	114788	70164	59933	2288	59744	80.13	3773	66.80	1693	16886	406	215
	总	35	241232	2946	153433	0.76	337	55.61	121588	74487	63450	2431	62904	85.94	4049	75.32	1785	17729	428	226
80	O	12	4762	62.53	5366	0.48	6.98	3.92	2575	1750	1363	96.30	960	3.32	213	15.62	32.50	318	7.87	18.88
	A	7	18998	258	12353	0.33	26.20	4.68	8505	5924	4342	180	4850	6.67	232	10.90	148	1236	27.92	16.98
	C	23	232800	3197	130971	0.45	318	50.86	104438	76973	55491	2053	63225	77.41	3554	69.76	1885	14279	360	210
	总	42	256559	3518	148689	1.26	351	59.47	115518	84647	61195	2329	69035	87.40	3999	96.28	2066	15833	396	246
120	O	12	3083	36.23	3140	0.68	4.65	2.60	1783	1167	783	42.15	535	2.14	167	15.50	16.83	213	5.33	23.72
	A	10	30064	348	17556	0.44	44.04	6.68	14607	9454	7418	261	6994	11.37	467	15.50	194	1977	49.12	35.48
	C	20	195598	2530	122091	0.34	261	36.76	90573	60826	48769	1786	52367	63.18	3400	55.73	1535	13243	318	186
	总	42	228745	2915	142788	1.45	310	46.04	106963	71448	56970	2089	59897	76.69	4033	86.73	1746	15433	373	246

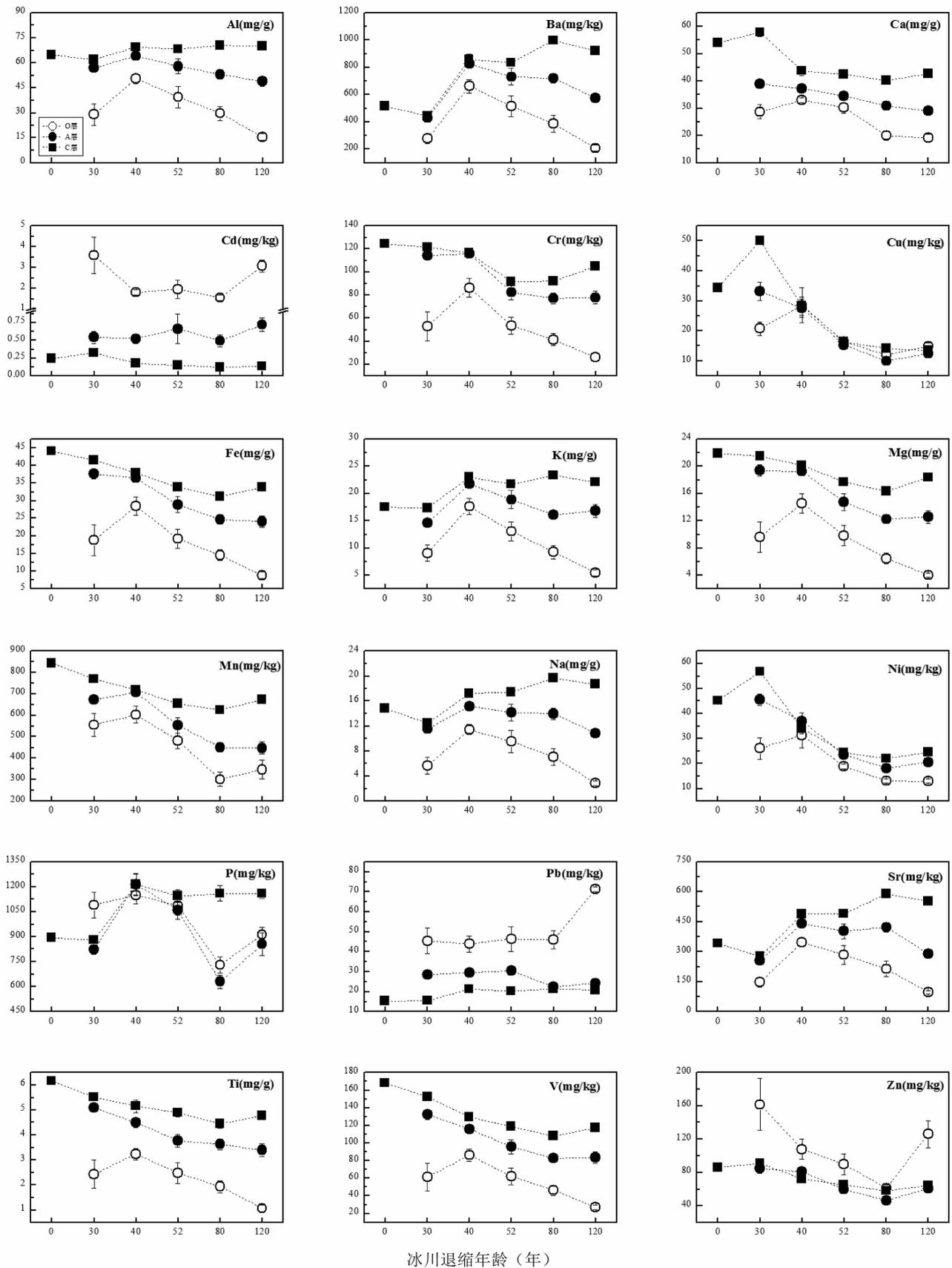


图 1 海螺沟冰川退缩区各土层中元素浓度随时间的变化特征

Fig. 1 Variation of elemental concentration over time in soil layers in the foreland of the Hailuoguo Glacier

除样点 S2 土壤 A 层的元素储量略低于 O 层,绝大部分元素(Al、Ca、Cr、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Ti、V、Zn)的储量均呈现随土层深度增加而增加的趋势;Cd 和 Pb 的储量则表现为 C 层 > O 层 > A 层。

随土壤发育,大部分元素(Al、Ca、Cr、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Ti、V、Zn)的总储量在样点 S1 最高,Cu 在 S2 处达到最高,以上元素整体呈下降趋势;Ba、Sr 和 Pb 在样点 S5 最高,Cd 在 S6 最高,以上 4 个元素的总储量在样点间无明显的变化趋势。O 层土壤中,大多数元素的储量在样点 S3 处达到最高值,然后随土壤发育呈下降趋势;Cd 和 Zn 在样点 S4 略微下降,整体随土壤发育而增加;Pb 在样点 S4 和 S6 略微降低,但总体呈升高趋势;Ca、Cu、Mn 的波动较大。A 层的土层厚度随土壤发育呈增大趋势,土壤元素储量总体与土层厚度呈正相关,而与容重变化趋势不一致,表现为仅在样点 S4 处略微下降,整体呈上升趋势,在样点 S6 达到最高值。C 层容重变化较小,Ca、Cd、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、Ti、V、Zn 随土壤发育储量一直减少;Al、Ba、K、P、Pb 在样

点 S3 最高;而 Na 和 Sr 在样点 S5 达到最高。

2.4 土壤元素的统计学特征

对土壤元素浓度进行因子分析,结果显示(表 4),O 层中解析出的 2 个因子共保留了原变量 86.31% 的信息,满足因子分析的原则。因子一的方差占总方差的 61.61%,包括 Al、Ba、Ca、Cd、Cr、Fe、K、Mg、Na、Ni、Pb、Sr、Ti、V,其中 Cd 和 Pb 载荷为负;因子二占总方差的 24.70%,包括 Ca、Cd、Cu、Mn、Ni、P、Zn。A 层中累积方差为 90.29%,因子一的方差占总方差的 52.80%,包括 Al、Ca、Cr、Cu、Fe、Mg、Mn、Ni、Ti、V、Zn;因子二占总方差的 26.19%,包括 Al、Ba、K、Na、Sr;因子三占总方差的 11.30%,包括 Cd、Pb 和 P。C 层中累积方差达 93.43%,因子一的方差占总方差的 42.82%,因子二占总方差的 22.52%,因子三占总方差的 20.14%;除 Cr、Fe、Mg、Mn 在因子一载荷较高,Al、K、Pb 在因子二载荷较高且均为负值,P 在因子三载荷较高外,其余元素均在因子一和因子二同时占有较高载荷。

表 4 海螺沟冰川退缩区土壤元素的因子载荷

Tab.4 Factor loading of soil elements in the foreland soil of the Hailuoguo Glacier

元素	O 层		A 层			C 层		
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
Al	0.98	0.17	0.65	0.73	-0.03	-0.35	-0.90	0.17
Ba	0.92	0.08	-0.16	0.97	0.09	-0.51	-0.83	0.20
Ca	0.71	0.58	0.89	0.18	0.05	0.56	0.71	-0.14
Cd	-0.76	0.50	-0.39	-0.45	0.74	0.61	0.65	-0.38
Cr	0.90	0.39	0.94	0.23	0.05	0.90	0.14	-0.01
Cu	0.38	0.71	0.88	-0.23	0.20	0.72	0.52	-0.37
Fe	0.90	0.40	0.97	0.19	0.05	0.88	0.43	0.01
K	0.93	0.27	0.26	0.85	0.25	-0.26	-0.93	0.06
Mg	0.88	0.46	0.97	0.21	0.09	0.92	0.34	0.06
Mn	0.43	0.82	0.90	0.22	0.25	0.81	0.45	0.20
Na	0.97	0.04	0.19	0.94	-0.17	-0.62	-0.73	0.19
Ni	0.60	0.69	0.93	-0.20	0.12	0.74	0.56	-0.35
P	0.04	0.86	0.38	0.45	0.69	-0.01	-0.34	0.88
Pb	-0.77	0.00	0.24	0.02	0.81	-0.32	-0.90	0.14
Sr	0.94	0.01	-0.13	0.94	-0.11	-0.58	-0.75	0.22
Ti	0.92	0.31	0.94	0.12	-0.14	0.59	0.57	0.54
V	0.91	0.35	0.98	0.08	-0.06	0.78	0.60	0.00
Zn	-0.44	0.79	0.85	-0.06	0.33	0.79	0.51	-0.20
方差(%)	61.61	24.70	52.80	26.19	11.30	42.82	40.96	9.65
累积方差(%)	61.61	86.31	52.80	78.99	90.29	42.82	83.78	93.43

注:粗体字表示载荷量较高。

3 讨论

3.1 海螺沟冰川退缩区土壤元素的富集/亏损特征

海螺沟冰川退缩区 C 层土壤中元素浓度变异相对较小(表 2),反映了该区域土壤母质相对均一,这与杨子江等^[12]和 Zhou 等^[15]利用 X 射线衍射分析的结果基本一致。此外,C 层中大多数元素在两个因子中均占有较高载荷且差异不大(表 4),说明 C 层中的元素差异性较小,不能进行明显区分。因此,为了判识土壤元素的累积特征,选择 O 层、A 层与 C 层土壤中元素的浓度比值(E_0/E_C 、 E_A/E_C)表征元素的富集和亏损特征(图 2)。大多数元素在 O 层的亏损程度大于 A 层,而 P 和 Zn 则呈现出相反趋势。空间上,Al、Ba、Ca、Cr、Fe、K、Mg、Na、Sr、Ti、V 的 E_0/E_C 比值整体上随土壤发育而呈现出亏损的趋势。 Cu_0/Cu_C 比值小于 1.0,但是呈现出随土壤发育而增加的趋势。 P_0/P_C 在样点 S2 处最高(1.26),其

其次是 S4(1.01),其余点位均小于 1.0。Cd、Pb、Zn 的 E_0/E_C 比值均大于 1.0,空间上没有明显的变化,但是均在 S6 达到最高值。A 层土壤中 Al、Ba、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Sr、Ti、V 的 E_A/E_C 比值整体小于 1.0,并随土壤发育呈现亏损趋势。 Zn_A/Zn_C 在样点 S3 处大于 1.0,其余样点均小于 1.0,在空间上没有明显变化。Cd 和 Pb 的 E_A/E_C 比值在各样点均大于 1.0,Cd 随土壤发育富集程度呈增加趋势,并在 S6 处高达 5.35;Pb 的富集程度随土壤发育整体呈下降趋势。

基于土壤元素的富集或亏损特征,可以将其划分为以下类型:(1)亏损型:Al、Ba、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、Sr、Ti、V,表现为 E_0/E_C 和 E_A/E_C 比值随土壤发育整体上小于 1.0。(2)“过渡”型:P 和 Zn,表现为 P_0/P_C 在样点 S2 和 S4 大于 1.0,其余样点以及 P_A/P_C 比值均小于 1.0; Zn_0/Zn_C 均大于 1.0, Zn_A/Zn_C 比值除在样点 S3 大于 1.0,其余样点小于 1.0。(3)富集型:Cd 和 Pb,表现为 E_0/E_C 和

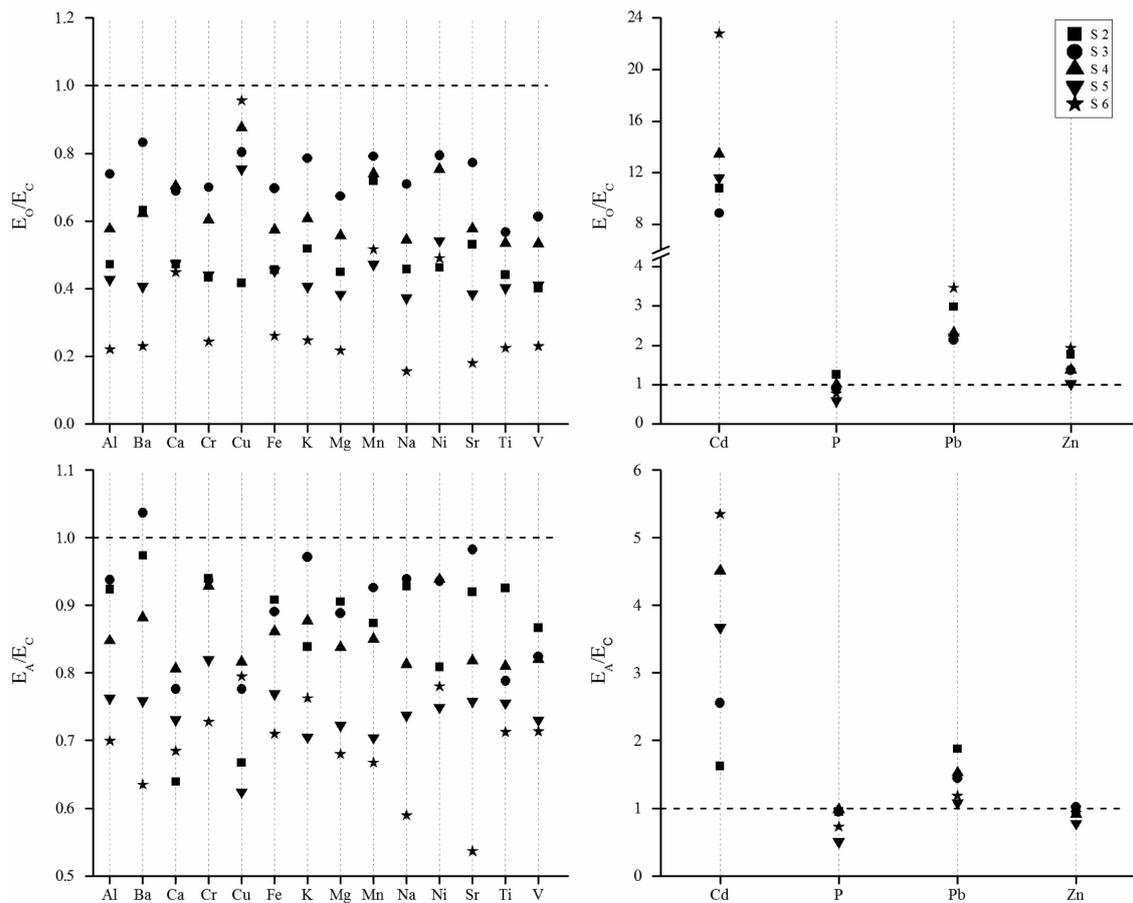


图 2 海螺沟冰川退缩区土壤中元素富集与亏损特征

Fig. 2 Enrichment and depletion of elements in the foreland soil of the Hailuoguo Glacier

E_A/E_C 比值远大于 1.0。

营养元素如 Ca、K、Mg、P 等在海螺沟冰川退缩区表层土壤明显亏损,表明植被可能会随土壤发育发生潜在的营养限制风险。本研究中 P 元素在 A 层土壤中较 O 层亏损更为严重,在土壤发育 80 年左右 P_A/P_C 仅为 0.51,在所有元素中比值最低,并且在土壤发育 120 年后有机层和表层 30 cm 的 P 储量下降 20.9%,这与 Wu 等^[2]利用 Hedley 连续提取方法得到的结果基本一致(土壤发育 120 年后有机层和表层 30 cm 的 P 储量下降 17.6%)。此外,阿尔卑斯山 Damma 冰川的研究也发现土壤发育约 120 年之后表层 5 cm 矿质土壤中 P 的储量下降 45.5%^[16],说明冰川退缩区表层土壤的营养元素储量短期内即发生快速亏损。根据 Walker 和 Syers^[17]的模型,生态系统发育后期 P 的亏损和转化会引起 P 限制和生态系统的退化^[18,19]。本研究发现其它营养元素如 Ca、K、Mg 土壤发育 120 年后有机层和表层 30 cm 的储量也分别下降了 22.0%、21.7% 和 22.1%,它们随成土过程的亏损是否会引起潜在的养分限制风险有待更多研究证实。

另一方面,有毒重金属元素 Cd 和 Pb 在表层土壤的累积可能导致潜在的生态风险。本研究中,Cd 和 Pb 在土壤表层,特别是 O 层发生明显累积,尤其是 Cd 在 S6 的 O 层浓度超过国家土壤环境质量三级标准^[20](一级:0.2 mg/kg;二级 0.3 mg/kg,三级 1.0 mg/kg, pH < 6.5),其 E_O/E_C 指数达 22.8,呈现显著富集,这与 Wu 等^[21]和 Bing 等^[6]在贡嘎山地区的研究结果一致。此外,海螺沟冰川退缩区^[22]和夏威夷火山地区^[23]的研究也发现 Pb 在表层土壤的累积。因受土壤性质和受体种类等多因素影响且开展于亚高山地区的原位研究相对缺乏^[24],海螺沟冰川退缩区土壤 Cd 和 Pb 对植物和土壤微生物产生毒害的阈值尚不明确,但基于 Cd 稳定同位素的研究表明,小麦在 Cd 含量小于 0.5 mg/kg 的情形下即通过络合作用减少 Cd 向籽粒的运输,表现出解毒机制^[25]。在海螺沟冰川退缩区,植物幼苗根系和土壤微生物多分布于 Cd 和 Pb 富集的土壤表层^[4],且该层 pH 随土壤发育和植被演替呈现明显酸性(表 1),因此可以推断在当前人类活动影响的趋势下,土壤 Cd 和 Pb 的累积对植物和微生物的生长发育存在潜在的毒性风险。此外,由于贡嘎山地区降雨量较大,表层土壤重金属向下土层和下游的流失风

险也有待进一步研究。

3.2 海螺沟冰川退缩区土壤元素分布的影响因素

冰川退缩迹地是研究化学风化的热点地区,相对于研究较多的欧洲阿尔卑斯山地区^[8,26-28],海螺沟冰川退缩区植被发育和土壤酸化更为快速,因而也发生了更为快速的风化^[15]。Zhou 等^[15]根据土壤矿物组成和退缩区的水化学数据推断,海螺沟冰川退缩区冰川退缩后 52 年内以碳酸盐风化为主要,而在 80 年和 120 年样点则出现强烈的黑云母、角闪石和磷灰石风化。由于植物吸收和径流损失,一些养分元素或迁移性较强的元素,如 Ca、K、Mg、P 等发生明显亏损(图 2)。在样点 S5 和 S6,由于针叶林的出现,土壤酸化加快,而且对养分元素的需求增加^[12,29],这一阶段的土壤风化相对前期更为严重,A 层元素亏损也更为明显(图 2)。此外,本研究区内岩石碎屑含量高、降水丰富,土层的高渗透性使水和有机酸能够渗透和溶解不透水基岩之上的矿质土壤^[15],使得化学风化和物质迁移的范围较大,也可能是导致 C 层土壤中某些活动性较强的元素如 Ba、K、Na 等的含量随演替阶段发生变化的原因。因此,化学风化和与之伴随的植物吸收和径流流失可能是造成海螺沟冰川退缩区矿质土壤表层(A 层)多数元素出现亏损的主要原因。

土壤有机层(O 层)主要来源于植被凋落物及其分解产物,因而其元素含量可能主要受凋落物性质影响。海螺沟冰川退缩区由裸地经灌丛、阔叶林到针叶林顶级群落,凋落物性质也发生明显改变^[4]。Aert 和 Chapin III^[30]提出落叶树种凋落物质量一般高于常绿树种,这可能是多数元素,如 Al、Ba、Ca、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Ni、P、Sr、Ti、V 的含量在以冬瓜杨为优势种的样点 S3 明显高于其它样点的原因(图 1)。此外,由于植物选择性吸收某些营养元素,因而这些元素在凋落物中含量较高,这在一定程度上解释了 P 和 Zn 这两种元素在 A 层普遍亏损,而在 O 层却出现相对的富集(图 1,图 2)。

土壤中 Cd 和 Pb 的分布特征与其它元素明显不同,表现为在 O 层的高度富集(图 1,图 2)。因子分析的结果也显示,Cd 和 Pb 在 O 层中的因子载荷与其它元素载荷相反(表 4),这可能暗示着它们与其它元素的不同来源。由于过去几十年来中国工业化和城市化进程加快,大量 Cd 和 Pb 被排入大气,随大气远距离传输,并被冠层截留以干湿沉降的方

式进入偏远山地的土壤^[22]。Wu 等^[21]测定了贡嘎山垂直带谱上土壤和降水中的 Cd 浓度,认为该地区土壤表层 Cd 的积累主要来源于大气沉降。Bing 等^[22]通过表层土壤 Pb 的富集系数推断其主要为大气来源,并进一步通过 Pb 的稳定同位素分析和二元混合模型表明人为排放的 Pb 贡献了 O 层土壤 Pb 的 45.2% ~ 61.3%。此外,由于 Cd 和 Pb 是植物非必需的有毒元素,因此植物倾向于将其转移到凋落物归还至土壤,这可能是造成 O 层土壤中 Cd 和 Pb 富集的另一原因。例如,陶宝先等^[31]测定了森林植物中 Pb 等重金属元素的分布特征,发现凋落物层含量均高于灌草层和乔木层各部位,其储量也占据相当比例,而该部分所储存的重金属元素随着凋落物的分解,将重新回归土壤。盛华夏^[32]对红树林凋落物分解研究中发现,凋落物在分解过程中对 Cd 和 Pb 都存在不同程度的吸附与累积效应。以上因素使海螺沟冰川退缩区土壤 Cd 和 Pb 由母质中的低于土壤环境质量一级标准分别达到有机层的严重和中等污染水平(图 1)。在冰川退缩区不同植被演替阶段,森林的截留和归还作用存在差异,例如在演替后期的针叶林阶段由于生物量增加^[29],冠层对大气中重金属的截留作用可能增强,这可能是造成不同演替阶段 Cd 和 Pb 在 O 层富集程度存在差异的原因(图 2)。另外,A 层中同样存在但程度较弱的 Cd 和 Pb 累积,说明大气来源的重金属可能发生了向矿质土层的垂向迁移。

4 结论

(1)在贡嘎山海螺沟冰川退缩区,随着土壤发育和植被演替,Ca、K、Mg、Al、Ba、Fe、Na、Sr、Ti、V、Co、Cr 在表层土壤中严重亏损,P 和 Zn 的亏损状态次之,而 Cd 和 Pb 存在明显的富集。Ca、K、Mg、P 是植物生长所需的主要营养元素,而 Fe、Mn、Ni 是植物必需的微量营养元素,它们的亏损反映出在冰川退缩区植被演替过程中,营养元素将成为对生态系统健康发展的潜在限制因素;而 Cd 和 Pb 的累积则可能导致潜在的生态风险。

(2)土壤风化、植物吸收和径流损失是导致大多数元素亏损的主要因素,而 Cd 和 Pb 的高度富集主要归因于植物的归还作用和大气沉降。

参考文献(References)

- [1] NOGUÉS-BRAVO D, ARAÚJO M B, ERREA M, et al. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century [J]. *Global Environmental Change*, 2007, **17**(3): 420–428.
- [2] WU Y H, ZHOU J, BING H J, et al. Rapid loss of phosphorus during early pedogenesis along a glacier retreat chronosequence, Gongga Mountain (SW China) [J]. *PeerJ*, 2015, **3**: e1377.
- [3] ZHOU J, WU Y H, PRIETZEL J, et al. Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China) [J]. *Geoderma*, 2013, **195**: 251–259.
- [4] WANG J P, WU Y H, ZHOU J, et al. Carbon demand drives microbial mineralization of organic phosphorus during the early stage of soil development [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, **52**(6): 825–839.
- [5] HE L, TANG Y. Soil development along primary succession sequences on moraines of Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain, Sichuan, China [J]. *Catena*, 2008, **72**(2): 259–269.
- [6] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuoguo Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(6): 5721–32.
- [7] PRIETZEL J, DÜMIG A, WU Y H, et al. Synchrotron-based P K-edge XANES spectroscopy reveals rapid changes of phosphorus speciation in the topsoil of two glacier foreland chronosequences [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **108**: 154–171.
- [8] BEMASCONI S M, BAUDER A, BOURDON B, et al. Chemical and biological gradients along the Damma glacier soil chronosequence, Switzerland [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, **10**(3): 867–883.
- [9] HINDSHAW R S, REYNOLDS B C, WIEDERHOLD J G, et al. Calcium isotopes in a proglacial weathering environment: Damma glacier, Switzerland [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(1): 106–118.
- [10] WU Y H, LI W, ZHOU J, et al. Temperature and precipitation variations at two meteorological stations on eastern slope of Gongga Mountain, SW China in the past two decades [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(3): 370–377.
- [11] WU Y H, PRIETZEL J, ZHOU J, et al. Soil phosphorus bioavailability assessed by XANES and Hedley sequential fractionation technique in a glacier foreland chronosequence in Gongga Mountain, Southwestern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(8): 1860–1868.
- [12] 杨子江, 邴海健, 周俊, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 507–516 [YANG ZiJiang, BING HaiJian, ZHOU Jun, et al. Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo glacier foreland of Gongga Mountain [J]. *Mountain Research*, 2015, **3**: 507–516]
- [13] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特

- 征[J]. 地理研究, 2001, **20**(2): 161 - 169 [WANG Shaoqiang, ZHU Songli, ZHOU Chenghu. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. Geographical Research, 2001, **20**(2): 161 - 169]
- [14] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 兰州市城区河道表层沉积物地球化学元素分布特征[J]. 中国沙漠, 2012, **32**(1): 168 - 174 [WANG Bo, XIA Dunsheng, YU Ye, et al. Element characters of river sediment of urban area in Lanzhou city [J]. Journal of desert research, 2012, **32**(1): 168 - 174]
- [15] ZHOU J, BING H J, WU Y H, et al. Rapid weathering processes of a 120-year-old chronosequence in the Hailuoguo Glacier foreland, Mt. Gongga, SW China [J]. Geoderma, 2016, **267**: 78 - 91.
- [16] TAMBURINI F, PFAHLER V, BUENEMANN E K, et al. Oxygen isotopes unravel the role of microorganisms in phosphate cycling in soils [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(11): 5956 - 5962.
- [17] WALKER T, SYERS J. The fate of phosphorus during pedogenesis [J]. Geoderma, 1976, **15**(1): 1 - 19.
- [18] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. Science, 2004, **305**(5683): 509 - 513.
- [19] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, **20**(1): 5 - 15.
- [20] 国家环境保护局. GB 15618 - 1995 土壤环境质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. [Environmental quality standard for soils [S]. Standards Press of China. 1997]
- [21] WU Y H, BING H J, ZHOU J, et al. Atmospheric deposition of Cd accumulated in the montane soil, Gongga Mt., China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, **11**: 940 - 946.
- [22] BING H J, WU Y H, ZHOU J, et al. Atmospheric deposition of lead in remote high mountain of eastern Tibetan Plateau, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 425 - 435.
- [23] NADYA T, YIGAL E, LUDWIK H, et al. The influence of rainfall on metal concentration and behavior in the soil [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, **63**(21): 3499 - 3511.
- [24] VIG K, MEGHARAJ M, SETHUNATHAN N, et al. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. Advances in Environmental Research, 2003, **8**(1), 121 - 135.
- [25] WIGGENHAUSER M, BIGALKE M, IMSENG M, et al. Cadmium isotope fractionation in soil-wheat systems. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9223 - 9231.
- [26] FÖLLMI K B, HOSEIN R, ARN K, et al. Weathering and the mobility of phosphorus in the catchments and forefields of the Rhône and Oberaar glaciers, central Switzerland: implications for the global phosphorus cycle on glacial-interglacial timescales. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, **73**(8): 2252 - 2282.
- [27] WONGFUN N, GÖTZE J, FURRER G, et al. Effect of water regime and vegetation on initial granite weathering in a glacier forefield: Evidences from CL, SEM, and Nomarski DIC microscopy. Geoderma, 2013, **211 - 212**: 116 - 127.
- [28] TIPPER E T, LEMARCHAND E, HINDSHAW R S, et al. Seasonal sensitivity of weathering processes: hints from magnesium isotopes in a glacial stream. Chemical Geology, 2012, **312 - 313**: 80 - 92.
- [29] 罗辑, 程根伟, 李伟, 等. 贡嘎山天然林营养元素生物循环特征[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27**(2): 13 - 17 [LUO Ji, CHENG Genwei, Li Wei, et al. Characteristics of nutrient biocycling of natural forests on the Gongga Mountain [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, **27**(2): 13 - 17]
- [30] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. 1999, **30**: 1 - 67.
- [31] 陶宝先, 张金池, 俞元春. 南京近郊主要森林类型对土壤重金属的吸收与累积规律[J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 448 - 453 [TAO Baoxian, ZHANG Jinchi, YU Yuanchun. Absorption and accumulation of heavy metals by forest plants in the outskirts of Nanjing City [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(2): 448 - 453]
- [32] 盛华夏. 九龙江口红树林湿地凋落物分解与重金属动态研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009 [SHENG Huaxia. Studies on dynamics of heavy metal with decomposition of litter fall in mangrove wetland at Jiulongjiang River Estuary [D]. Xiamen, Xiamen University, 2009]

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Elements in the Retreated Area of Hailuoguo Glacier, SW China

HE Qingqing^{1,2}, BING Haijian¹, WU Yanhong^{1*}, WANG Jipeng¹,
ZHOU Jun¹, SUN Hongyang¹, ZHU He^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute
of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In the processes of soil formation and development, the distribution characteristics of soil elements are essential to the healthy development of terrestrial ecosystems. In this study, six sampling sites (0, 30, 40, 52, 80 and 120 years) were selected according to the soil age in the Hailuoguo glacier retreat area. Eighteen elements in the O horizon (organic horizon), A horizon (material horizon) and C horizon (parent material) were selected to investigate their distribution characteristics, and then the main influencing factors were deciphered. The results showed that the concentrations of all elements in the C horizon of the glacier retreat area did not vary markedly, indicating the homogenous nature of the soil parent materials. In the surface soils (O horizon and A horizon), Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Sr, Ti and V were significantly depleted, P and Zn were moderately depleted, whereas Cd and Pb were prominently enriched. With soil development and vegetation succession, especially when coniferous species dominated, the soil weathering, plant uptake and runoff loss may be the main factors contributing to the loss of the depleted elements. The high enrichment of Cd and Pb was mainly attributed to the atmospheric deposition and the returning of plants.

Key Words: soil elements; soil development; distribution characteristics; glacier retreat area; Gongga Mountain