

青藏高原高寒湖泊区砂卡岩残积风化壳地球化学 若干特点——以措莫隆锡多金属矿区为例

李洪祥, 林高原

(四川省地质矿产勘查开发局物探队, 四川成都 610072)

摘要:依据措莫隆锡多金属矿区高山稀疏灌丛草甸下, 花岗岩外接带中2个砂卡岩(透辉符山砂卡岩和萤石透辉砂卡岩)残积风化壳垂向剖面系统取样、分析成果, 揭示了高寒湖泊区砂卡岩残积风化壳中元素的表生活动性序列, 探讨了其表生地球化学共性、个性及主要控制因素。在这些砂卡岩风化壳中大量地淋失了CaO和F, 强烈地集聚了K₂O、Na₂O、SiO₂、P₂O₅、Sr、TFe, 和母岩中具有很高含量的Bi、Cu、As; TMn在多数风化层中被淋失; TFe从富有机质风化层中淋出, 在低含有机质风化层中被强烈氧化析出; Al₂O₃、TiO₂、Sn、Be等两性元素表生活动能力很大, Sn被较强烈淋失。Al₂O₃、MgO、Zn、B、Hg等在其含量很高或很低的母岩上覆残积风化壳中分别被淋失或被集聚, 呈现出不同的表生性状。母岩中具有很高含量的Ag、Mo, 在低含有机质的上覆残积风化壳中表生活动能力比富有机质的上覆残积风化壳中表生活动能力小得多。

关键词:表生地球化学; 残积风化壳; 砂卡岩; 高寒湖泊区; 青藏高原

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2009)04-0379-010

高寒湖泊区是青藏高原上广泛分布的重要地球化学景观单元之一, 主要分布于海拔4 500~5 200 m间山脉近顶地域, 山原地貌。年均气温6℃以下, 年降水量700 mm以上, 气候上宜属高山冷湿带气候。暖湿(5~9月)、冷干(10~次年4月)两季交替分明。冷季以降雪为主。地面季节性冻融作用强烈, 并且广覆高山稀疏灌丛草甸和对应土壤。措莫隆锡多金属矿区即为该景观典型。与花岗岩有成因联系的砂卡岩型锡多金属矿床, 是青藏高原上分布

甚广极为重要的一种矿床工业类型。

元素表生活动能力是地球化学勘查的理论基础。为此, “六五”期间我队在该矿区对花岗岩和砂卡岩的残积风化壳开展了以揭示该景观条件下, 这些风化壳中元素风化平衡和各元素表生活动能力为主要目的的取样、分析。笔者仅对砂卡岩风化壳成果加以探讨。有关花岗岩风化壳成果笔者将在另文中探讨。文中如有不妥之处, 请批评指正。

表1 被查砂卡岩残积风化壳垂向剖面自然分层和岩性特征

剖面号	风化层	岩性	深度/cm	厚度/cm	样品编号
SR1	A. 黑灰色腐植土层	内含少量植根及岩屑(植根已被剔除出样品, 下同)	0~6	6	T108
	B. 黄棕色含屑粉砂质黏土层	内含较多半风化母岩石屑	6~13	7	T109
	C. 暗绿色含屑砂质黏土层	内含较多母岩碎块	13~16	3	T110
	D. 风化基岩: 风化了的黄褐色透辉符山砂卡岩	厚而稳定, 与下部新鲜基岩之间呈渐变过渡关系	16~35	19	K115
	E. 新鲜基岩: 暗绿色透辉符山砂卡岩	半自形柱粒变晶结构, 条带状构造。主要由符山石(87%)、透辉石(10%)、方解石(3%)组成(依据薄片镜下测定, 下同)。标本中可见磁铁矿(1%~2%)	35~55		K116
SR3	A. 黑灰色腐植土层	内含少量植根	0~5	5	T114
	B. 绿褐色砂质碎石层	碎石、砂约各占50%	5~46	41	T115
	C. 黄褐—褐色含砂碎石层	含棱角状碎石60%左右, 砂粒40%左右	46~51	5	T116
	D. 风化基岩: 褐铁矿化萤石透辉砂卡岩	块状—多孔状构造、土状结构、风化残余结构, 主要组成矿物为褐铁矿, 其次为赤铁矿、锈染透辉石、萤石等	51~55	4	K118
	E. 新鲜基岩: 暗绿—灰绿色萤石透辉砂卡岩	半自形粒状变晶结构, 斑杂状构造。主要由透辉石(73%)、萤石(25%)及少量阳起石(1%)组成。偶见细脉状石英、磁铁矿、锡石、黄铜矿等	55~64		K119

1 被查矽卡岩残积风化壳的地质特点

共采集地面海拔高程分别为 4776、4789.7 m，下伏基岩分别为透辉符山矽卡岩、萤石透辉矽卡岩两个残积风化壳垂向剖面样品。这两个风化壳剖面均位于某燕山期岩株相细粒似斑状花岗岩同一外接触带上，同一古剥夷面中分布单一岩石的两个残丘顶部。因此它们风化成壳起始时间相近。地面排水较通畅。用垂向挖坑分层连续拣块取样法，系统采取各风化壳从下部包括新鲜基岩在内，向上直至地表各天然风化层样品。各风化壳中下伏母岩矿物组成，风化层层序、组合，各层深度、厚度、岩性特征、样品编号见表 1。

从该表中可见，高寒湖泊区中矽卡岩残积风化壳具有如下特点：①厚度小(35~55 cm)，其中富萤石矽卡岩风化壳厚度较大；②粒组成分中粗粒级(碎石、石屑、砂)占的比例大，前一风化壳中黏土比例稍大；③下部新鲜基岩之上常存在一层尚未剥离母体的风化基岩层(D层)。

2 透辉符山矽卡岩和萤石透辉矽卡岩残积风化壳地球化学特点

被查这两个矽卡岩残积风化壳下伏成壳母岩中主元素(造岩元素)和微量元素含量(表 2、表 3)显示：主要由钙、铝、镁的硅酸盐矿物组成的母岩主要由 CaO、SiO₂ 组成，前一母岩中还富含 Al₂O₃，后一母岩中富 F(11.80%)，并含较高的 MgO。两个母岩中还含有含量明显高于世界碳酸岩中平均含量，且主要由花岗岩迁入的许多微量元素：Sn、Be、Bi、Mo、Ag、Zr、F、As，前一母岩中 B、Zn、Hg、La，后一母岩中 Cu。被稀疏灌丛草甸植被覆盖，存在上述化学组成特点和差异的这二矽卡岩风化母岩在高山冷湿气候下长期风化形成的残积风化壳地球化学特点，既有共性又各具个性。

2.1 垂向各层中主元素、微量元素淋失、累积序列及所显示的元素表生地球化学性状

依据元素在风化层(i)中含量 C_i 与其在新鲜母岩(E)层中含量 C_E 百分比率表示的元素表生活动

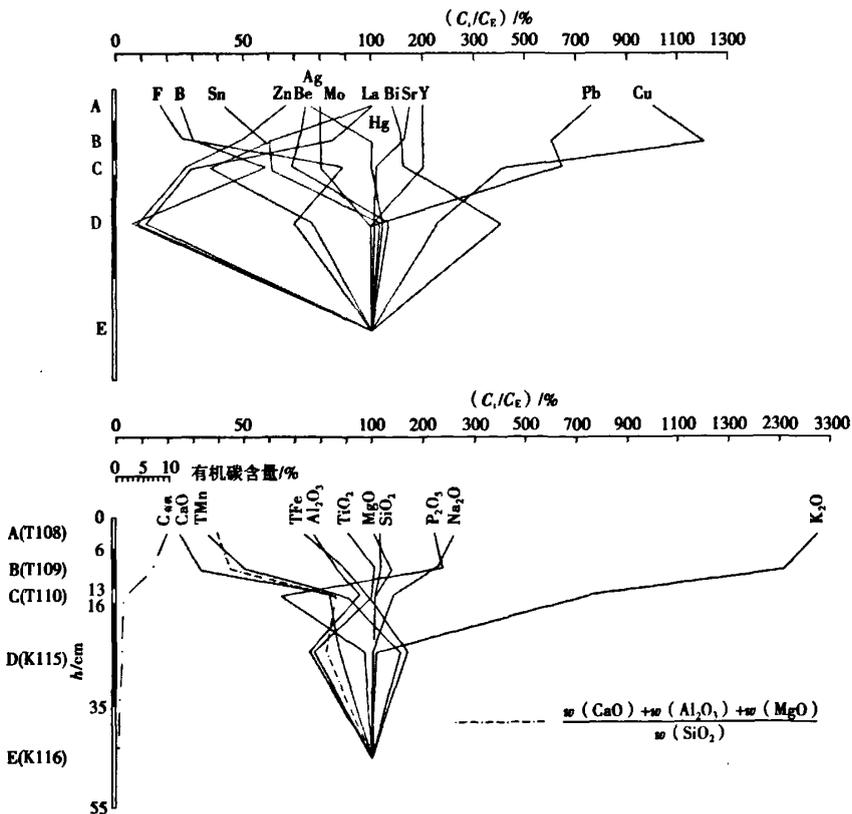


图 1 措莫隆高寒湖泊区透辉符山矽卡岩残积风化壳垂向上元素风化平衡曲线

性指数(以下简称元素 K_i 值)从小到大顺序由左向右排列所得的各层中主元素和微量元素淋失与累积

序列如下,并图示于图 1、图 2。

在透辉符山矽卡岩残积风化壳中,主导元素淋

表2 措莫隆高寒湖泊区被查砂卡岩残积风化壳垂向剖面各层中主导元素含量分布和表生活活性指数变化

剖面号	下伏母岩	风化层(i)	厚度cm	样品	有机碳 ⁽¹⁾ 含量/%	各风化层中主元素含量 C _i ⁽²⁾											各风化层中主元素表生活活性指数 K _i /%											
						K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TFe	TMn	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	F	Σ	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TFe	TMn	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	F
SR1	透明砂卡岩	A	6	T108	9.24	1.51	0.74	7.64	1.92	11.36	4.56	0.156	42.22	0.67	0.284	2920	71.352	3020	255.17	24.18	101.59	77.49	73.43	35.78	112.53	90.54	221.88	16.98
		B	7	T109	6.71	1.18	0.65	10.03	2.53	12.59	5.50	0.217	44.54	0.77	0.293	4525	78.753	2360	224.14	31.74	133.86	85.88	88.57	49.77	118.71	104.05	228.91	26.31
		C	3	T110	1.26	0.37	0.40	26.65	2.02	13.82	6.14	0.390	38.50	0.74	0.082	15300	90.242	740	137.93	83.07	106.88	94.27	98.87	89.45	102.61	100	64.06	88.95
		D	19	K115	0.21	0.052	0.29	27.33	2.05	11.00	10.25	0.669	38.68	0.57	0.124	12000	92.214	104	100	86.49	108.47	75.03	165.06	153.44	103.09	77.03	96.88	69.77
		E		K116	0.15	0.05	0.29	31.60	1.89	14.66	6.21	0.436	37.52	0.74	0.128	17200	95.244	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SR3	萤石透明砂卡岩	A	5	T114	4.37	1.79	0.96	5.39	3.47	8.83	8.22	0.213	52.72	0.52	0.183	2760	82.572	325.45	290.91	15.77	51.79	218.02	140.27	75.80	166.73	140.54	181.19	2.34
		B	41	T115	0.85	0.64	0.33	23.35	5.12	3.80	12.04	0.227	33.12	0.29	0.110	92000	88.187	116.36	100	68.31	76.42	93.83	205.46	80.78	104.74	78.38	108.91	77.97
		C	5	T116	1.04	1.00	0.60	17.06	5.46	5.47	8.95	0.231	47.00	0.33	0.105	56000	91.866	181.82	181.82	49.91	81.49	135.06	152.73	82.21	148.64	89.19	103.96	47.46
		D	4	K118	0.16	0.67	0.26	33.33	5.19	2.45	9.50	0.214	19.74	0.17	0.050	169000	88.434	121.82	78.79	97.51	77.46	60.49	162.12	76.12	62.43	45.95	49.50	143.22
		E		K119	0.12	0.55	0.33	34.18	6.70	4.05	5.86	0.281	31.62	0.37	0.101	118000	95.842	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

注:(1)有机碳含量由重庆市地矿局中心实验室定量测定;(2)主元素含量由四川省地矿局中心实验室用化学定量法测定,其中F含量用离子选择法测定,C_i(F)/10⁻⁶,C_i(其他元素)/%。

表3 措莫隆高寒湖泊区被查砂卡岩残积风化壳垂向剖面各层中微量元素含量分布和表生活活性指数变化

风化壳剖面	风化层(i)	样品	地球化学特征值	C _i × 10 ⁻⁶																
				Sn	Be	Mo	Ag	Pb	Hg	Y	La	Zr	Sr	Ni	Co	Cu	Zn	Bi	B	As
SR1	A	T108	C _i	66	2.7	4	0.76	75	0.056	20	40	92	100	10	10	42	200	35	50	<100
	B	T109		93	2.6	4	1	60	0.046	20	≤30	90	95	10	10	49	150	40	60	<100
	C	T110		56	2.5	4	1	64	0.016	20	≤30	105	61	≤10	10	16	80	40	120	100
	D	K115		120	4.7	5	1.2	≤10	0.006	10	46	120	61	≤10	10	9	<50	100	15	100
	E	K116		155	3.6	5	1	≤10	0.054	10	40	100	58	≤10	10	4	300	25	200	≤100
SR3	A	T114	K _i %	94	9.4	5	2.6		0.066	24		120	68	10	36	>3000	<50	100	60	<100
	B	T115		90	8	5	3		0.006	20		40	39	≤10	15	1005	150	100	20	300
	C	T116		92	10.5	5	2		0.022	20		50	45	≤10	10	515	<50	150	≤10	200
	D	K118		80	7.3	8	2		0.022	10		20	39	≤10	10	390	<50	25	15	<100
	E	K119		112	11.5	5	1		0.002	10		40	36	≤10	10	265	<50	100	≤10	150
SR1	A		K _i %	43	75	80	76	750	104	200	100	92	172		100	1050	67	140	25	
	B			60	72	80	100	600	85	200	60	90	164		100	1225	50	160	30	
	C			36	69	80	100	640	30	200	60	105	105		100	400	27	160	60	
	D			77	131	100	120	100	11	100	115	120	105		100	225	8	400	7.5	
	E			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SR3	A		K _i %	84	82	100	260		3300	240		300	189		360	>1132		100	750	
	B			80	70	100	300		300	200		100	108		150	379		100	250	
	C			82	91	100	200		1100	200		125	125		100	194		150	100	
	D			71	63	160	200		1100	100		50	108		100	147		25	188	
	E			100	100	100	100		100	100		100	100		100	100		100	100	

注:从Sn到Cu含量由四川省地矿局中心实验室用近似定量法测定,其中Hg含量用冷原子吸收法测定,其余元素含量用平头电极光谱法测定,Zn、Bi、B、As含量由四川省地矿局物探队实验室用北京光仪器厂生产的中型光谱仪半定量法测定(它们当时尚未被局中心实验室列入测试元素),从应用效果看,其分析误差,尚未掩盖元素的地球化学变差。

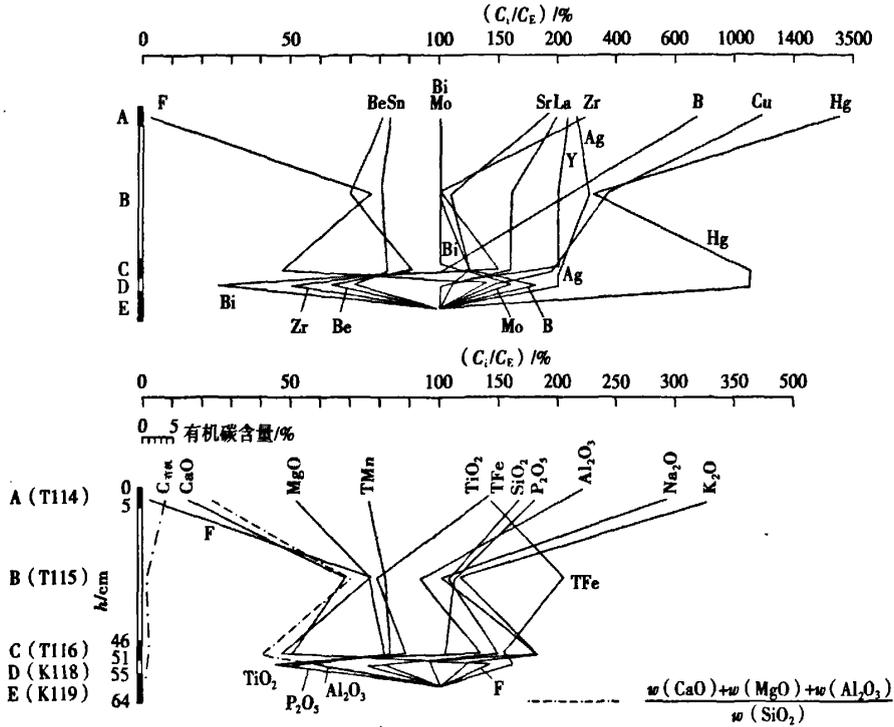


图2 措莫隆高寒湖泊区萤石透辉砂卡岩残积风化壳垂向上元素风化平衡曲线

失与累积序列:

$$\begin{aligned}
 A(T108) & \frac{F}{17.00} < \frac{CaO}{24.18} < \frac{TMn}{35.78} < \frac{TFe}{73.43} < \frac{Al_2O_3}{77.49} < \\
 & \frac{TiO_2}{90.45} < \frac{MgO}{101.59} < \frac{SiO_2}{112.53} < \frac{P_2O_5}{221.88} < \\
 & \frac{Na_2O}{255.17} < \frac{K_2O}{3020.00}; \\
 B(T109) & \frac{F}{26.31} < \frac{CaO}{31.74} < \frac{TMn}{49.71} < \frac{Al_2O_3}{85.88} < \frac{TFe}{88.57} < \\
 & \frac{TiO_2}{104.05} < \frac{SiO_2}{118.71} < \frac{MgO}{133.86} < \frac{Na_2O}{224.14} < \\
 & \frac{P_2O_5}{228.91} < \frac{K_2O}{2360.00}; \\
 C(T110) & \frac{P_2O_5}{64.04} < \frac{CaO}{83.07} < \frac{F}{88.95} < \frac{TMn}{89.45} < \frac{Al_2O_3}{94.27} < \\
 & \frac{TFe}{98.87} < \frac{TiO_2}{100.00} < \frac{SiO_2}{102.61} < \frac{MgO}{106.88} < \\
 & \frac{Na_2O}{137.93} < \frac{K_2O}{740.00}; \\
 D(K115) & \frac{F}{69.77} < \frac{Al_2O_3}{75.03} < \frac{TiO_2}{77.06} < \frac{CaO}{86.49} < \frac{P_2O_5}{96.88} < \\
 & \frac{Na_2O}{100.00} < \frac{SiO_2}{103.09} < \frac{K_2O}{104.00} < \frac{MgO}{108.47} < \\
 & \frac{TMn}{153.44} < \frac{TFe}{165.06}
 \end{aligned}$$

元素表生活活动能力 → 弱。

微量元素淋失与累积序列:

$$\begin{aligned}
 A & \frac{F}{17} < \frac{B}{25} < \frac{Sn}{43} < \frac{Zn}{67} < \frac{Be}{75} < \frac{As}{76} < \frac{Mo}{80} < \frac{Zr}{92} < \frac{La}{100} = \\
 & \frac{Co}{100} < \frac{Hg}{104} < \frac{Bi}{140} < \frac{Sr}{172} < \frac{Y}{200} < \frac{Pb}{750} < \frac{Cu}{1050}; \\
 B & \frac{F}{26} < \frac{B}{30} < \frac{Zn}{50} < \frac{Sn}{60} = \frac{La}{60} < \frac{Be}{72} < \frac{Mo}{80} < \frac{Hg}{85} < \frac{Zr}{90} < \\
 & \frac{Ag}{100} = \frac{Co}{100} < \frac{Bi}{160} < \frac{Sr}{164} < \frac{Y}{200} < \frac{Pb}{600} < \frac{Cu}{1225}; \\
 C & \frac{Zn}{27} < \frac{Hg}{30} < \frac{Sn}{36} < \frac{La}{60} = \frac{B}{60} < \frac{Be}{69} < \frac{Mo}{80} < \frac{F}{85} < \frac{Ag}{100} = \\
 & \frac{Co}{100} < \frac{Sr}{105} = \frac{Zr}{105} < \frac{Bi}{160} < \frac{Y}{200} < \frac{Cu}{400} < \frac{Pb}{640}; \\
 D & \frac{B}{7.5} < \frac{Zn}{8} < \frac{Hg}{11} < \frac{F}{70} < \frac{Sn}{77} < \frac{Co}{100} = \frac{Y}{100} = \frac{Mo}{100} = \\
 & \frac{Pb}{100} < \frac{Sr}{105} < \frac{La}{115} < \frac{Zr}{120} = \frac{Ag}{120} < \frac{Be}{69} < \frac{Cu}{400} < \\
 & \frac{Bi}{400}
 \end{aligned}$$

序列中各项分式横线上、下分别为主元素或微量元素和风化层中该元素表生活活动指数(K_w/%)。下同。

萤石透辉砂卡岩残积风化壳中,主导元素淋失与累积序列:

$$\begin{aligned}
 A(T114) & \frac{F}{2.33} < \frac{CaO}{15.77} < \frac{MgO}{51.79} < \frac{TMn}{75.80} < \frac{TFe}{140.27} < \\
 & \frac{TiO_2}{140.56} < \frac{SiO_2}{166.73} < \frac{P_2O_5}{181.19} < \frac{Al_2O_3}{218.02} < \\
 & \frac{Na_2O}{290.91} < \frac{K_2O}{325.45}; \\
 B(T115) & \frac{CaO}{68.31} < \frac{MgO}{76.02} < \frac{F}{77.97} < \frac{TiO_2}{78.38} < \frac{TMn}{80.78} < \\
 & \frac{Al_2O_3}{93.83} < \frac{Na_2O}{100.00} < \frac{SiO_2}{104.74} < \frac{P_2O_5}{108.91} < \\
 & \frac{K_2O}{116.36} < \frac{TFe}{140.27}; \\
 C(T116) & \frac{F}{47.46} < \frac{CaO}{49.91} < \frac{MgO}{81.49} < \frac{TMn}{82.21} < \frac{TiO_2}{89.19} < \\
 & \frac{P_2O_5}{103.96} < \frac{Al_2O_3}{135.06} < \frac{SiO_2}{148.83} < \frac{TFe}{152.73} < \\
 & \frac{Na_2O}{181.82} = \frac{K_2O}{181.82}; \\
 D(K118) & \frac{TiO_2}{45.95} < \frac{P_2O_5}{49.50} < \frac{Al_2O_3}{60.49} < \frac{SiO_2}{62.43} < \frac{TMn}{76.16} < \\
 & \frac{MgO}{77.46} < \frac{Na_2O}{78.79} < \frac{CaO}{97.51} < \frac{K_2O}{121.81} < \\
 & \frac{F}{143.72} < \frac{TFe}{162.12}^\circ
 \end{aligned}$$

强元素表生活动能力→弱。

微量元素淋失与累积序列

$$\begin{aligned}
 A & \frac{F}{2.33} < \frac{Be}{82} < \frac{Sn}{84} < \frac{Mo}{100} = \frac{Bi}{100} < \frac{Sr}{189} < \frac{Y}{240} < \frac{Ag}{260} < \frac{Zr}{300} < \\
 & \frac{Co}{360} < \frac{B}{750} < \frac{Cu}{1132} < \frac{Hg}{3300}; \\
 B & \frac{Be}{70} < \frac{F}{78} < \frac{Sn}{80} < \frac{Mo}{100} = \frac{Zr}{100} = \frac{Bi}{100} < \frac{Sr}{108} < \frac{Co}{360} < \frac{Y}{200} < \\
 & \frac{B}{250} < \frac{Hg}{300} = \frac{Ag}{300} < \frac{Cu}{1132}; \\
 C & \frac{F}{47} < \frac{Sn}{82} < \frac{Be}{91} < \frac{Co}{100} = \frac{Mo}{100} = \frac{B}{100} < \frac{Zr}{125} = \frac{Sr}{125} < \frac{Bi}{150} < \\
 & \frac{Cu}{194} < \frac{Y}{200} = \frac{Ag}{200} < \frac{Hg}{1100}; \\
 D & \frac{Bi}{150} < \frac{Zr}{50} < \frac{Be}{64} < \frac{Sn}{71} < \frac{Co}{100} = \frac{Y}{100} < \frac{Sr}{108} < \frac{F}{143} < \frac{Cu}{147} < \\
 & \frac{Mo}{160} < \frac{B}{188} < \frac{Ag}{200} < \frac{Hg}{1100}^\circ
 \end{aligned}$$

依据被查两砂卡岩残积风化壳垂向各层中各元素 K_a 值大小及其变化趋势,所显示其表生地球化学性状和所对应的诸多表生环境综述于表 4 中。在该表中可见淋失型元素 ($K_a < 100\%$) 呈现出 4 种性状,集聚型元素 ($K_a \geq 100\%$) 呈现出 6 种性状。

2.2 共性、个性及其控制因素

2.2.1 共性及其主要制约因素

(1) 在两砂卡岩残积风化壳中均强烈地淋失了母岩中高含量的 CaO、F, 比较强烈地持续淋失了 Sn, 均集聚了 SiO₂, 碱金属和碱土金属元素 K₂O、Na₂O、Sr, 母岩中具有异常含量的 Bi、Cu、(As) 以及母岩中含量甚低, 然而却是上覆植物重要矿质营养元素 P₂O₅、(Ni)、Co。显然上述元素在砂卡岩残积风化壳中上述表生性状与它们在碳酸岩残积风化壳中表生性状完全相同。这与它们均为高含钙的岩石, 风化后大量释出的 Ca²⁺ 离子就近溶入风化壳溶液, 使这种溶液成为钙质强碱性溶液; 正是上述元素从砂卡岩中风化释出后在这种溶液中具有不同的溶解度制约着有关元素的表生性状。从下向上, P₂O₅、Ni、Co 含量或 K_a 值由小增大, 与植被对其选择吸收, 蒸腾上移有关。主要以锡石形式存在于两砂卡岩中含量很高的 Sn [分别为 (155、112) × 10⁻⁶] 在对应的风化壳中其 K_a 变化于 77% ~ 36%、84% ~ 71% 之间, 亦即风化壳各层中原始含 Sn 量的 23% ~ 64%、16% ~ 29% 被淋离, 淋入下侧从属景观中, 其中下伏母岩中含 F 量明显较低, 且中、上部富有机质的风化壳中 Sn 的淋失程度比下伏母岩中富 F, 且中、上部低含有机质的风化壳中 Sn 的淋失程度大得多; 这表明: 锡石在强碱性风化壳溶液长期浸泡环境中不稳定, 在过量 (OH)¹⁻ 或 F¹⁻ 离子作用下, 释出的 Sn 作为两性元素可能转变成 [Sn(OH)₆]²⁻ 或 [SnF₆]²⁻ 形式的可溶性络阴离子, 随溶液侧向迁离风化壳。母岩中较高含量的 Bi [分别为 (25、100) × 10⁻⁶] 在风化壳中氧化后转变为弱碱性的氧化物, 在这里风化壳溶液中极难溶解, 而以泡铋矿形式残留于风化壳中 (依据我队同时开展的残坡积重砂测量成果)。含 As 量均较高的两母岩 [分别为 ≤ (100、150) × 10⁻⁶] 上覆残积风化壳中, 该元素发生迁移再分布, 集聚于铁被氧化沉淀富集的风化层中 (见表 3); 这可能与从共生硫化物中风化释出转变成可溶性络阴离子与附近层位中 Fe³⁺ 结合、生成不溶性沉淀物 Fe[AsO₄] 有关。我队在本区同时开展的渗湿土测量有效性试验成果 (各汇水域渗湿土中 As 异常均位于有关汇水域中锡多金属矿体附近) 相吻合, 显示其在表生带甚为惰性, 不易再迁移。因此, 砂卡岩中共生的 Sn、Bi、Cu、As 等元素在风化壳中发生分离。

(2) 风化壳垂向上绝大多数被淋失元素或被集聚元素均被持续淋失或被持续集聚, 但淋失程度或积聚程度变化大, 且呈现跳跃性, 最上层 A 层和最下

表4 措莫隆高寒湖泊区被查砂卡岩残积风化壳内元素的表生地球化学性状及对应表生环境

风化壳剖面	下伏成壳母岩	成壳母岩主要化学元素组成(依据离子数相对百分比率/%)	成壳母岩中具有异常含量(10 ⁻⁶)级的微量元素	风化壳所处水文地质环境	表生地化环境		风化层中元素的表生地球化学性状								
					有机碳含量水指示的环境	CaO 表动数指环生活动性大小示的环境	A. 淋失型元素			B. 集聚型元素					
							Fe、Mn 表生地化性状匹配关系和对应的氧化电位(E _h /V)变化范围	A ₁ 、从风中各化中不被同程度淋失	A ₂ 、从上层(A、B、C层)中溶出,在D层底部部分再沉淀,总体被淋失	A ₃ 、总体上被淋失(或底中逸层(D)中损毁程度最大,大部分输出物向上运移,在富有机质A层被弱集聚	A ₄ 、总体上被弱淋失。从A、D层中部分溶出,均向中部B、C层中运移、部分再沉淀	B ₁ 、在各风化层中均被不同程度持续残留富集	B ₂ 、从下部D层或D+C层中溶出,向上运移,集聚于中、上部B、A层中	B ₃ 、从D、B层中溶出,在各自上部的C、A层中沉积出	B ₄ 、从富有机质的上、中层(A、B、C层)中溶出,向下运移,在底部D层中析出,总体上被滞留于风化壳中
SR1	透辉符山砂卡岩	Si36, Ca33, Al 16.7, F 5, Mg2.8, (Ti 0.54), (P0.10)	Sn155, Be3.6, Bi25, Mo5, Zn300, Ag1, F17200, B200, Hg0.054	地表排水较通畅,风化壳中,D层为潜水层,其上C层为其毛细管活动层	A—C层,富有机质;D层低含有有机质	钙质强碱性环境	A—C层其弱氧化环境, E _h < 0.77; D层,强氧化环境, E _h > 1.51	CaO, Al ₂ O ₃ , F, B, Zn, Sn, Mo	Hg	TiO ₂	K ₂ O, Na ₂ O, MgO, SiO ₂ , Sr, Bi, Cu, Pb, Y (Co)	P ₂ O ₅ , (Ni)	TFe, TMn, Be, (Zr, ?), Ag	As	
SR3	萤石透辉砂卡岩	F29.4, Ca29, Si25, Mg7.9, Al3.8, (Ti0.22), (P0.07)	F 118000, Sn112, Bi100, Mo5, Be11.5, Cu265, Ag1	同上	A层较富有机质;B—D层,低含有有机质	钙质强碱性环境	全剖面均为较强氧化环境, 0.770 < E _h < 1.51	CaO, MgO, TMn, Sn, Be	F	TiO ₂	TFe, K ₂ O, Sr, Ag, Hg, Mo, Cu, B, Co, Y	P ₂ O ₅ , Na ₂ O, SiO ₂ , Zr	Al ₂ O ₃	Bi	As

表5 措莫隆高寒湖泊区中被查砂卡岩风化特征指数垂向变化

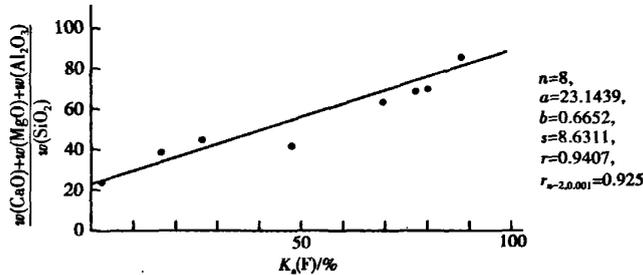
风化壳剖面号	下伏成壳母岩	风化层(i)	样品	有机碳含量/%	w(K ₂ O)/w(Na ₂ O)		w(CaO)/w(MgO)		w(TMn)/w(TFe)		w(SiO ₂)/w(Al ₂ O ₃)		w(CaO) + w(MgO) + w(Al ₂ O ₃)/w(SiO ₂)		K ₁ /%	淋积比
					比值	比率/%	比值	比率/%	比值	比率/%	比值	比率/%	比值	比率/%		
SR1	透辉符山砂卡岩	A	T108	9.24	2.0405	1183.58	3.9792	23.80	0.0342	48.72	3.7165	145.22	0.4955	38.61	16.98	4.3651
		B	T109	6.71	1.8154	1053.02	3.9644	23.71	0.0395	56.20	3.5377	138.22	0.5647	44.00	26.31	2.8628
		C	T110	1.26	0.925	536.54	12.995	77.72	0.0635	90.46	2.7858	108.84	1.0932	85.19	88.95	3.7589
		D	K115	0.21	0.1793	104.00	13.3317	79.74	0.0653	93.02	3.5164	137.40	1.0440	81.35	69.71	1.5864
		E	K116	0.15	0.1724	100.00	16.7196	100	0.0702	100	2.5593	100	1.2833	100	100	厚度加权平均值 2.5043
SR3	萤石透辉砂卡岩	A	T114	4.37	1.8646	111.87	1.5533	30.45	0.0259	53.96	5.9706	76.47	0.3355	23.61	2.33	1.4494
		B	T115	0.85	1.9394	116.36	4.5605	89.40	0.0189	39.38	8.7158	111.64	0.9743	68.57	77.97	1.9796
		C	T116	1.04	1.6667	100.00	3.1245	61.25	0.0258	53.75	8.6033	110.19	0.5948	41.86	47.46	1.1958
		D	K118	0.16	2.5769	154.61	6.4220	125.88	0.0225	46.88	8.0571	103.20	2.0755	(68.46) ^注	143.22	1.8336
		E	K119	0.12	1.6667	100	5.1015	100	0.0480	100	7.8074	100	1.4209	100	100	厚度加权平均值 1.8495

注:该层中SiO₂被强烈溶出,以w(SiO₂)/[w(CaO) + w(MgO) + w(Al₂O₃)]比值为0.4818,相对于母岩中同比值(1.4209)⁻¹ = 0.7038的相对百分比率68.46%,表示该层岩石分解程度。

层D层中被淋失元素淋失程度较大,被集聚元素的集聚程度亦较大,而中间层中,特别是其中带有绿色色调的岩性上更接近母岩的层位,即前、后两风化壳中C、B层中被淋失或被集聚元素的淋失或集聚程度小得多(见图1、图2)。从下向上,主元素总量Σ呈现出由高变低的趋势(变化范围分别为95.24%~71.35%、95.84%~82.57%)(见表2)。主元素中被淋失元素的淋失总量与被集聚元素集聚增量总量之比(淋积比),两风化壳剖面中分别变化于1.5864~4.3651、1.1958~1.9796之间,厚度加权平均值分别为2.5043、1.8495(表5),均大于1。这些特点表明,高寒湖泊区中砂卡岩残积风化壳属于淋溶型风化壳,含F低的透辉符山砂卡岩风化壳淋溶程度大于富F的萤石透辉砂卡岩风化壳的淋溶程度。这可能是经历大致相等成壳时间的后一风

化壳厚度明显大于前一风化壳厚度的原因。

(3)两风化壳各层中元素比值 $[w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{Al}_2\text{O}_3) / w(\text{SiO}_2)]$ (表5计算的是各层值相对于下伏母岩的百分比。下同)及其变化表征:①风化壳中岩石发生了分解,其程度变化总趋势,从下向上,由低增高,但分解程度最低的层位不是下部D层,而是前述中间层位中与母岩颜色最相近的层位;②各风化层中该比值与同层中F的表生活动性指数 $K_a(\text{F})$ 之间,存在紧密的正相关关系,其置信度大于99.9%(图3),表明了砂卡岩中萤石含量高低及其风化释出 F^- 离子转变为氢氟酸HF的程度,是制约砂卡岩风化解及其程度的重要因素。上述风化程度最弱的中间层中,元素被淋失、被集聚的程度亦最小,较多地保留了母岩的原始地球化学信息。



n—样本数; a—常数项系数; b—次项系数; s—方差; r—相关系数; $r_{n-2,0.001}$ —临界数。下同

图3 透辉符山砂卡岩和萤石透辉砂卡岩上覆残积风化壳各层中岩石分解程度指数与F的表生活动性指数之间正相关依赖关系

(4)在下部风化基岩(D)层中元素发生了急剧有序的表生分离,两性元素 Al_2O_3 、 TiO_2 的淋失程度(Al_2O_3 的 K_a 值分别为75.03%、60.49%, TiO_2 的 K_a 值分别为77.03%、45.95%)均大于CaO的淋失程度(K_a 分别为86.49%~97.51%);而其他层位中后者淋失程度均大于前者的淋失程度。各母岩中具有较高含量的铜族元素组合中亲硫性较强的元素(分别为Bi、Ag、Mo;Cu、Ag、Mo)在D层中发生次生富集,而其亲硫性最弱的元素(分别为Zn、Bi)被从D层中溶出。在该层中被淋失的许多可溶性元素,如前一风化壳中B、F、 Al_2O_3 ,后一风化壳中 Al_2O_3 、 MgO 、 TMn 、 SiO_2 、 TiO_2 、 Na_2O 、Bi、Be、Sn等,均在该层之上C层中被相对集聚($K_a^C > K_a^D$, $K_a^C < 100\%$, $K_a^D < 100\%$, K_a^C 、 K_a^D 分别为某元素在C、D层中 K_a 值。下同)或绝对集聚($K_a^C > K_a^D$, $K_a^C > 100\%$, $K_a^D < 100\%$)。这些特点总体上表征了D层风化作用是在这里存在潜水条件下进行的,其中可溶性元素随溶液上升、集聚于属于毛细管活动层的C层中。因此,C层中常持有来自于母岩,而在风化壳中被淋失

的元素较强的地球化学信息。

2.2.2 个性及其主要制约因素

(1)变价元素TFe、TMn在有机质含量显著差异的两风化壳中表现出不同的表生性状:在前一风化壳中,它们从富有机质的上、中部A、B、C层(有机碳含量分别为9.24%、6.71%、1.26%)中溶出(其 K_a 值变化于98.87%~73.43%、89.45%~35.78%之间,且从上向下由小增大,即溶出程度由大变小),向下迁入含有机质甚低(有机碳含量为0.21%)的D层,大量急剧氧化析出,显然该层存在大量铁锰胶体(它们的 K_a 分别为165.06%、153.44%);与该层呈现黄褐色的特征相吻合。有机质普遍较低的后一风化壳中(有机碳含量为4.37%~0.16%),Mn被较强烈地持续淋失(K_a 值为75.80%~82.21%),而Fe则被强烈地持续集聚(K_a 值范围是140.27%~205.46%),与这里存在大量褐铁矿、赤铁矿事实相符合(见表1);它们在这里发生表生分离。这些特点显示了这个两风化壳中有机质含量差异制约着

各自环境中氧化还原电位 E_h (表 4), 从而也制约着各自环境中 Fe、Mn 电价匹配关系和与之对应的表生性状的差异。

(2) 不同含 F 水准母岩上覆风化壳中, F 的表生性状有一定差异; 富 F 母岩的后一风化壳中, 其从上、中部中溶出 (K_a 为 2.34% ~ 77.97%), 大部分淋失, 部分下移至 D 层与这里风化释出的 Ca^{2+} 离子结合后析出 (K_a 为 143.22%), 并且引起这里潜水溶液酸碱度波动, 导致这里 Na_2O 、 SiO_2 、Bi、Zr 等元素风化释出物在风化壳溶液中溶解度增大, 发生活化转移 (它们的 K_a 值分别为 78.79%、62.43%、25%、50%)。低 F 母岩的前一风化壳中, F 被持续淋失 (K_a 为 16.98% ~ 88.95%), 也未发生如上元素复杂变化, 保持了比较稳定的碱性环境。

(3) 前后两母岩中含水量显著不同的元素有: $w(Al_2O_3)$ 为 14.66%、4.05%, $w(MgO)$ 为 1.89%、6.70%, $w(Zn)$ 为 300×10^{-6} 、 $< 50 \times 10^{-6}$, $w(Hg)$ 为 0.054×10^{-6} 、 0.002×10^{-6} , $w(B)$ 为 200×10^{-6} 、 $\leq 10 \times 10^{-6}$, 在各自残积风化壳中表生性状迥然相异; 在母岩中 Al_2O_3 、Zn、Hg、B 含量分别甚高、很低的前、后母岩上覆残积风化壳中这些元素分别表现为被淋失、被集聚, 而 MgO 含量分别很低, 甚高的前后两母岩的残积风化壳中, 该元素表生性状分别表现为被集聚、被淋失。在这些元素被集聚的有关风化壳内, 从下向上 K_a 变化总趋势由小增大, 与对应 C 有机含量由低增高, 呈现同步增长关系, 显示它们的上移集聚与上覆植被对它们的选择吸收、蒸腾关系密切。在这些元素被淋失的有关风化壳中, Zn、Hg 的 K_a 在垂向上也呈现出类似特点。从下向上, Zn 在被淋失的风化壳各层的 K_a 依次为 8、25、50、67%, 显示了它被绝对大幅度淋失, 从下向上又被相对集聚的两重性特点。可能表征了高含 Zn 的母岩风化释出大量的 Zn, 超出了植被生长所需极限, 故被大量淋失, 植被仅吸收其一部分, 并移向上部层中集聚。而母岩中含 Zn 低的风化壳中部 B 层中其含量可达 150×10^{-6} , 可能表征, 母岩风化释出的 Zn 量少, 低于植被生长需求量而将其全部吸收。与其他元素不同, Hg 的 K_a 在这两个风化壳中从下向上均由小急剧增大 (分别为 11%、30%、85%、104%、1100%、1100%、300%、3300%), 这与其具有很强

升华性能, 以汞蒸汽形式向上逸散, 并被吸附剂吸附有关, 在其被逸损的前一风化壳中其含量在向上方向上随着有机碳含量增大而增大, 它们之间有紧密的正向地球化学关联性: $\{w(Hg)\}_{10^{-6}} = 0.002257 + 0.006025 \times \{w(C_{有机})\}_{\%}$; $n=4, s=0.0042 \times 10^{-6}, r=0.9914 > r_{n-2, 0.001} = 0.99$, 置信度大于 99.9%, 表征了残留于风化壳中的 Hg 与有机质胶体对其吸附作用有关。

含 Cu 量较高的且较富 MgO 的萤石透辉矽卡岩风化壳中 MgO 被较强烈淋失 (K_a 值变化于 81.49% ~ 51.79% 之间), 并随溶液补入附近的溪水、湖水等天然水体中。这些 Mg 主要来自于矽卡岩中含 Mg 矿物 (如透辉石), 与同时开展的水化学法找矿有效性试验成果相吻合。在这里矽卡岩型锡多金属矿体附近上述天然水中, 常存在较高含量的 Mg^{2+} 离子, 同时伴有含量多变不稳的 Cu、Pb、Zn 和较高的重金属总量, 随着远离矿体 Mg^{2+} 离子含量由高逐渐稳定降低, 直至正常含量, 与伴生的 Ca^{2+} 离子含量由低逐渐增高的变化特点迥然不同; 途中遇有流经其它矿体异常水补给时, 溪流中 Mg^{2+} 离子含量再次跃升, 并且伴随 Cu、Pb、Zn 等元素含量的增高。这些水中 Cu 含量与伴生的 Mg^{2+} 的当量百分浓度之间成紧密的正相关关系 (图 4)。因此 Mg^{2+} 可作为以水化学法寻找矽卡岩型锡多金属矿产的重要间接指示元素。

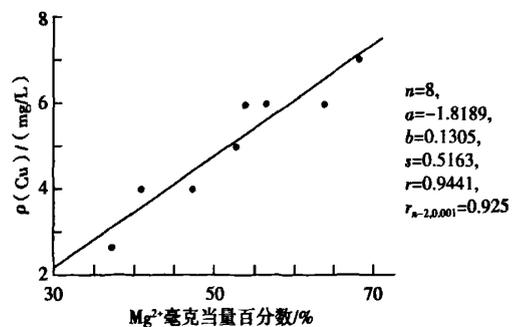


图 4 措莫隆锡多金属矿区溪流异常水中 Cu 含量与 Mg^{2+} 离子浓度正相关关系

(4) 具有如上特点的两风化壳中微量元素表生活动能力方面存在明显差异。前一风化壳中被淋失的元素 (F、B、Zn、Sn、Mo、La、Hg 等) 种类较多, 被集聚滞留的元素 (Bi、Sr、Ag、As、Be、Cu、Pb 等) 种类相对较少。后一风化壳中被淋失的元素种类少, 仅淋

失了F、Sn、Be,其余诸多元素(Cu、Hg、B、Ag、Sr、Mo、Co、Y、Bi、As等)均被滞留其中;这可能与这里存在带正电荷的铁质胶体对风化壳溶液中 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 、 $[\text{MoO}_4]^{2-}$ 、 $[\text{AsO}_4]^{3-}$ 、 $[\text{BO}_3]^{3-}$ 等阴离子的吸附作用,以及因 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 析出引起以其为迁移剂的金属阳离子析出有关。

(5)两风化壳垂向上诸多化学元素对比值对比(表5)表明:在前一风化壳中,从下向上, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 、 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 由小增大, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{TMn})/w(\text{TFe})$ 由大逐渐变小,变化幅度也大,表明在该风化壳中有关元素发生了明显分异,且显示富有机质环境有利于这些元素的分异。后一风化壳垂向上,上述元素对比值变化幅度小,它们的变化趋势虽与前一风化壳中大致相同,但常跳跃多变,分异作用较弱或不明显;表明了有机质少,且普遍存在褐铁矿、赤铁矿等吸附剂环境不利于元素分异。

4 结束语

所获上述矽卡岩残积风化壳垂向剖面中地质、地球化学资料,对青藏高原高寒湖泊区地质找矿有如下指示意义。

(1)冷湿气候下长期风化形成的厚度不大,但很古老的高寒湖泊区矽卡岩残积风化壳中元素发生急剧的表生分离;被找矿关注的,具有较高含量(或称异常含量)的微量元素中,共同残留集聚了Bi、Cu、As,它们在土壤中异常具有近源指示意义;共同较强烈地淋失了Sn、F,具有较高含量的Zn、Be、B、Hg的矽卡岩上覆残积风化壳中这些元素均被较强烈淋失,Hg则向源体上空逸散,它们均不同程度迁离源体,补入从属景观各种介质中,它们的次生异常,包括土壤中异常,具有追踪源体的意义,其中Hg异常具有近源指示意义。

(2) Mg^{2+} 离子可作为以水化学法寻找矽卡岩型锡多金属矿床的间接指示元素。在花岗岩外接触带矽卡岩(碳酸岩)分布区,不宜依据Sn、(Be)的土壤异常布置揭露工程,特别是槽、井探工程,而宜依据土壤中Bi、Cu、As、Hg综合异常布置揭露工程,方能取得较佳效果。

(3)土壤测量中,不宜将淋溶作用强烈的表层和富有机质风化层作为取样层位,而宜将含有机质少,风化作用相对较弱与母岩性质(如颜色)相近的风化层,和褐色含铁质胶体的风化层作为取样层位,风化基岩面之上3~5cm厚的毛细管活动层(在C层)是最佳取样层位。

致谢:本文撰写过程中得到我队领导和有关部门负责人有力支持,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 四川省气象局. 四川气候图集[M]. 成都:四川人民出版社, 1979.
- [2] 四川植被协作组. 四川植被[M]. 成都:四川人民出版社, 1980.
- [3] 彼列尔曼 А И. 风化壳的地球化学[M]. 陈静生,译. 北京:商务印书馆, 1957.
- [4] 北京地质学院水文地质教研室编. 水文地质学基础[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.
- [5] 南京大学地质学系. 地球化学(修订本)[M]. 北京:科学出版社, 1979.
- [6] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1984.
- [7] 柯夫达 В А. 土壤学原理:上、下册[M]. 陆宝树,译. 北京:科学出版社, 1981.
- [8] 斯米尔诺夫 В И. 矿床地质学[M]. 《矿床地质学》翻译组,译校. 北京:地质出版社, 1981.
- [9] 维诺格拉多夫. 土壤中稀有和扩散化学元素的地球化学[M]. 周启秀,译. 中国科学院出版, 1954.
- [10] Lelong F, Tardy Y, Gradin G, 等. 成土作用、化学风化作用和某些表成矿床的形成过程[C]//岛尔夫 К Н. 层控矿床和层状矿床:第三卷. 北京:地质出版社, 1979:77-143.
- [11] 《无机化学》编写组. 无机化学:下册[M]. 北京:人民教育出版社, 1978.
- [12] 中国科学院贵阳地球化学研究所《简明地球化学手册》编译组. 简明地球化学手册[M]. 北京:科学出版社, 1981.
- [13] 中国科学院数学研究所统计组. 常用数理统计方法[M]. 北京:科学出版社, 1973.
- [14] 中国科学院数学研究所概率统计室. 常用数理统计表[M]. 北京:科学出版社, 1979.
- [15] Хокс Х Е, Узёб Дж С. Геохимические методы поисков минеральных месторождений[M]//Перевод С Английского Н А Титовой. Москва:Изд Мир, 1964.
- [16] Панов Е Н, Хохлов В В, Латикайнен В И. Геохимия современного выветривания гранитоидов в условиях холодного гумидного климата[J]. Геохимия, 1988, (4):532-540.

**GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SKARN ELUVIAL WEATHERING CRUSTS
IN THE HIGH AND COLD LAKE AREA OF THE QINGHAI-TIBET PLATEAU:
A CASE STUDY OF THE CUOMOLONG TIN-POLYMETALLIC ORE DEPOSIT
IN SICHUAN PROVINCE**

LI Hong-xiang, LIN Gao-yuan

(Geophysical and Geochemical Prospecting Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on systematic sampling and analysis along the vertical profiles of two skarn (diopside-vesuvianite skarn and fluorite-diopside skarn) eluvial weathering crusts on the exocontact zone of the granite in the Cuomolong tin-polymetallic ore district with an environment of high mountain and sparse bush meadow, the authors detected the supergene activity sequence of the elements in the skarn eluvial weathering crust of the high and cold lake area and investigated their common and specific supergene geochemical characteristics as well as the major ore-controlling factors. CaO and F have been drastically leached out, whereas K_2O , Na_2O , SiO_2 , P_2O_5 , Sr and TFe are obviously accumulated. Bi, Cu and As, which are very high in parent rocks, have been leached out in most weathering crusts. TFe has been leached out from organic-rich weathering crusts and separated out from organic-low weathering crusts through oxidation. Al_2O_3 , TiO_2 , Sn and Be are very active in the supergene zone, and Sn has been strongly leached out. Al_2O_3 , MgO, Zn, B and Hg have been either leached out or accumulated, assuming different supergene behaviors. Ag and Mo, which are abundant in parent rocks, show much less activity capacity in the organic-low overlying eluvial weathering crust than in the organic-high overlying eluvial weathering crust.

Key words: supergene geochemistry; eluvial weathering crust; skarn; high and cold lake area, Qinghai-Tibet plateau

作者简介:李洪祥(1938-),男,江苏省金坛市人,大学本科毕业,高级工程师,长期从事地球化学专业工作。

上接 378 页

Abstract: This paper describes the contents of Report of The New Round of Research on Aeromagnetic Anomalies in Mountainous Areas of Hebei Province, a funded geoexploration project of Hebei Province, which include the degrees of air-borne geophysical exploration of various scales, researches on aeromagnetic data and verification of aeromagnetic anomalies. An analysis of the aeromagnetic ore-prospecting potential is also given. It is concluded that, as a fairly high degree of research work has been done on the aeromagnetic data obtained in Hebei Province, the ore-prospecting potential of the aeromagnetic data is quite high.

Key words: air-borne geophysical exploration; aeromagnetic anomaly; degree of research; ore-prospecting potential

作者简介:施兴(1961-),男,汉族,河北张家口人,毕业于长春地质学院物探系,高级工程师,长期从事重磁勘查及找矿研究和生产工作,发表数篇论文。