

☆❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁☆
❁
❁
❁ 我国珠穆朗玛峰地区过渡元素
❁
❁ 的表生地球化学特征
❁
❁
☆❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁❁☆

“珠峰”科考队表生地球化学组

中国科学院地理研究所

一九七二年九月

目 次

序 言

1. 本区概况和研究材料

2. 测 定 方 法

3. 过渡元素在本区某些岩石和风化壳中的含量和分布

4. 过渡元素在本区植物中的含量和分布

5. 过渡元素在本区土壤中的含量和分布

6. 某些过渡元素在本区表生作用带中的迁移规律

7. 小 结

我国珠穆朗瑪峰地区过渡元素的表生地球 地球化学特征 ※¹

珠穆朗瑪峰(以下简称珠峰)是世界最高峰,自第三纪渐新世以来,随喜马拉雅山隆起而强烈上升,至今还在不断增高。雄伟的山体处于独特的地理位置,在珠峰地区特有的水热条件制约下,这里物质的大小循环在复杂的地质背影上构成了十分壮丽的宏观景象,表生作用带的地球化学性状系列较为完整,元素迁移导致物质的分异过程明显,古地理残留余跡较多,并蕴藏着富饶的自然资源。这些为研究表生地球化学的一些关键问题提供了丰富的内容和有利条件,而其研究成果能为今后开发利用提供科学依据。本文试图在完成珠峰地区表生地球化学大量工作的基础上,侧重对过渡元素的表生地球化学特征作一初步探讨。

第一过渡元素系※²(Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn)不论在实践上和理论上都是很有价值的。首先它们是重要的黑色和有色金属的工业原料,其中 Mn、Fe、Co、Zn、Cu 具有明显的生理生化功能, Mn、Co、Zn、Cu 又是目前国际农牧业中常用的微量元素,过渡元素中的某些成员在生命进化的化学进化和生物进化过程中具有不可忽视的作用。在表生地球化学研究中,它们有的常常表现出某些特有的地球化学性质,甚至作为一些地球化学作用强度的指标。

本工作是在伟大的无产阶级文化大革命运动中进行和完成的。在工作中科考队的其他专业组同志曾给予大力帮助,敬致感谢。

¹
※工作人员:章 申、于维新

²
※第一过渡元素系在文献中有不同划分法,本文按徐光宪的分类(78),把 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn 列入第一过渡元素系内。

一、本区概况和研究材料

决定珠峰地区过渡元素表生地球化学特征的外因，最主要是气候的水热因子和地质条件。在科考区——雅鲁藏布江以南，国界以北，东起亚东，西至吉隆——的范围内，气候变化和分异明显，地质较复杂。物质基础主要由各种岩浆岩、变质岩和沉积岩构成。它们在空间上沿东西向呈明显的条带状分布。酸性、中性、基性和超基性的岩浆岩常分布在本区的北部，距我们采样点较远。野外工作收集的样品主要集中在珠峰南翼由各类片岩和片麻岩组成的变质岩系地段，和其北翼以广泛分布中生代、新生代的砂岩、灰岩等沉积岩和冰川沉积物的地区。这些作为本区主要元素来源的物质基础构成了一个海拔4500公尺左右的高原面，和其上矗立着约占大气对流层三分之一的六、七千公尺的群山冰峰。高大的山体阻碍了北下的干寒西风和南上温湿的西南季风相互交流，使水热状况在本区的水平和垂直方向发生显著的差异，导致了珠峰南北坡截然不同的生物气候带：其南翼温暖多雨，北翼干旱寒冷，使内生过程形成的物质基础遭到强烈地改造和分异，从宏观上表现为珠峰南北翼二个不同的气候——生物——土壤分带系列（见表1），并在表生地球化学特征上出现有规律的变化，为了揭示珠峰地区过渡元素的表生地球化学特征，我们收集了具有代表珠峰地区表生作用带和作用层的组成要素：岩石，风化壳（成土母质），土壤，植物等样品，它们的具体名称和一般性质列于下面各分析结果表中，此处不再赘述。

二、测定方法

岩石和风化壳中的Fe、Ti、Mn和V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn由中国科学院地质所分析室，分别用化学分析和光谱半定量法进行测定，其结果取自科考队变质岩组和第四纪组。土壤中V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn的含量由我们和南京土壤所光谱分析室同志采用光谱半定量法进行测定⁽²⁾，

图1. 珠峰地区自然分带示意图

(根据科考队自然地理组资料)

南侧

北侧

高山冰雪带

7000

6000

高山寒冻—
地衣、苔藓带

高山寒冻—
草甸、垫状带

高山寒冻—
草甸、垫状带

高山寒冻—
草甸、垫状带

-4--10

-4--10

3.0--4.0

300--500

300--500

200--300

<0.4

<0.4

0.4--1.0

水热系数* 年降水量(mm)

年均温(°C)

<-6.0

400--600

-2.0--6.0

高山寒冻—
地衣、苔藓带

高山寒冻—
草甸、垫状带

0.4--0.6

350--600

2.5--2.0

高山寒冻—
草甸、垫状带

4000

0.2--0.4

700--1500

7--2.5

山地寒温—
针叶林带

3000

0.2--0.3

1800--2500

10--7

山地暖温—
针阔混交林带

0.2--0.3

2000--2500

15--10

山地亚热—
常绿阔叶林带

2000(米)

* 水热系数 = $\frac{0.16 \times \sum t}{r}$

式中 $\sum t$ 为日温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 持续
期间之总温度总和, r 为
同期之降水量。

Fe、Ti、Mn的含量数据由科考队土壤组提供，是按土壤常规分析法进行测定⁽³⁾。植物中 Mn、Fe、Zn是采用比色法测定^(4,5)，Cu 的测定是植物在 500℃灰化后，制备得试样溶液用比色法测定⁽³⁾。

三、过渡元素在本区某些岩石和 风化壳中的含量

珠峰表生地球化学作用带中过渡元素的主要来源是基岩，可能极小的一部分来自陨石和宇宙尘埃。现在的科学资料表明，过渡元素可能作为固定成分存在于陨石和太阳系的星体内（见表 2），与地壳中它们的分布进行比较，除在量上有一定的差别外，在分布顺序上基本一致（见表 2）。珠峰南北翼地段广泛分布着变质岩、沉积岩和花岗岩等岩体。

表 2

月球玄武岩 ⁽⁹⁾	Fe > Ti > Cr ≥ Mn >> Ni > V > Zn > Co > Cu
	15.67 3.29 0.19 0.15 7.9 4.4 2.4 2.1 1.9
月球岩屑土质 ⁽⁹⁾	Fe > Ti > Cr ≥ Mn >> Ni > V > Co ≥ Cu ≥ Zn
	12.94 2.01 0.18 0.15 18 68 4.1 3.7 3.3
石陨石—球陨石 ⁽¹¹⁾ (硅酸盐相)	Fe > Cr > Mn > Ti > Ni > Co > V > Zn > Cu
	(15.64) 0.39 0.30 0.17 100 45 7 n 0.15
地壳岩石圈 ⁽¹¹⁾	Fe > Ti > Mn > Cr > V > Cu ≥ Ni > Zn ≥ Co
	5.1 0.6 0.09 9.02 15 10 8 5 3
	$\frac{\%}{\%}$ $\frac{\%}{10^{-3}\%}$

从已有的一些测定结果中可以看到（见表 3），过渡元素含量均低于超基性和基性岩，接近于酸性岩和沉积岩中它们的含量。显然第一过渡元素^的系绝大多数元素是基性和超基性岩的典型元素。这些元素在岩浆岩中通常处于低价状态。但过渡元素的价键具有明显的多变性和易变性。这主要是它们（Sc ~ Ni）的电子结构内有 $s^2 d^x$ 电子， $x = 1$ 至 8，

表3 珠峰地区某些岩石中过渡元素的含量与

基本岩石类型成分的比较

岩石类型和岩石	Ti	Mn	Fe	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn
	占%			占 $n \cdot 10^{-3} \%$					
珠峰地区变质岩 (19个岩样平均)	0.22	0.34	3.32						
※ ¹ 珠峰地区花岗岩	0.3	0.03- 0.05	3-5	10-30	1-3~1		3	1-3	—
※ ² 超基性岩(纯橄岩、 橄辉岩、辉石)	0.3	0.13	9.85	200	14	20	120(3)		5
※ ² 基性岩(玄武岩、辉 长岩、苏长岩、辉绿 岩)	0.9	0.22	8.56	30	20	4.5	16	14	13
※ ² 中性岩(闪长岩、安 山岩)	0.8	0.12	5.85	5.6	10	2	5.5	3.5	7.2
※ ² 酸性岩(花岗岩、流 纹岩)	0.23	0.06	2.70	2.5	4	0.5	0.8	3	6
※ ² 沉积岩(粘土、页岩)	0.45	0.067	3.33	16	13	2.3	9.5	5.7	8

※¹ 半定量光谱测定结果 ※² 取自文献(10)

当它们从内生条件下的低价状态而转入珠峰表生的富氧环境，在氧化电位增高和其它表生的因子作用下，岩石遭到风化破坏的同时，它们电离失去 ~~电子~~ ^{S-40} 不等数目的 d -电子(从1至8)，它们之中不少元素变成高价离子的化合物，离子半径也相应改变，继而引起各自不同的迁移途径，造成了新的分散和浓集。这从珠峰岩石的风化过程中可明显地表现出来，表4的光谱分析结果表明，在珠峰南坡年均温 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ 和年降水量 $2000 \sim 2500$ 毫米的亚热带条件下，发育的兰

表4 珠峰南翼亚热带变质岩风化壳中过渡元素含量

风化壳 名称	采样地点	采样深度米	Ti	Mn	Fe	V	Cr	Co	Ni	Cu
			%			$10^{-3} \%$				
兰晶石片岩风化壳	樟木	3	~0.3	0.03~0.05	3~5	1-3	10	1	3-5	3
兰晶石片岩风化壳	同上	17.5	~0.1	~0.05	1~3	10-30	/	/	/	0.1

晶石片岩风化壳深厚，约20多公尺。随着兰晶石的风化，水迁移系数极大的Cl、S、P和碱族与碱土族元素随着降水遭到淋失，发育和形成富铁——铁风化壳。铁、钛、钒、铜、钼等过渡元素在机械组成粗轻的和排水通气良好的兰晶石片岩风化壳中，由低价变成高价： $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ ； $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ ； $V^{2+} \rightarrow V^{5+}$ ，使它们大部分形成 Fe^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Mn^{4+} 稳定的氧化物和铜化合物富集原处，同时它们也或多或少和 V^{5+} 的阴离子化合物（钒酸根）淋出风化壳进入地质大循环。显然 $V^{3+} \rightarrow V^{5+}$ 只有该风化壳处于高温和高度好气的氧化环境时才能实现。

关于珠峰地区沉积岩风化壳中过渡元素的含量，收集了聂聂雄拉附近海拔约5000公尺的砂岩风化壳，取样深度约2公尺。其过渡元素含量（光谱半定量法测定）如下：

元素： $Fe > Ti > Mn = Ni > V = Cr > Co > Cu$
 $\%$ 3-5 0.1-0.3 ~0.01 ~0.01 $3-5 \cdot 10^3$ $3-5 \cdot 10^3$ $1-3 \cdot 10^3$ $5-7 \cdot 10^{-4}$

很明显，砂岩风化壳是贫乏 V、Cr、Co、Cu 等过渡元素的。

四、过渡元素在本区植物中的含量和分布

珠峰植物有机体对过渡元素在本区表生作用带中的转移、富集和分散起着很大作用。它们不仅直接从表生作用带中吸取过渡元素，以金属——有机化合物通过生物迁移途径归还给地表腐殖质壳，而且它们在生命活动过程中不断地向表生作用带内分泌 CO_2 、 O_2 有机酸等化合物，使表生作用带的介质 pH 和氧化还原电位等一系列物理化学效应发生强烈变化，从而影响过渡元素在表生作用带内的再分布。珠峰地区的植物灰分成分中或多或少地存在着过渡元素。表 5 表明本区草本植物（地上部）和木本植物（主要叶子）都比较强烈地吸收 Mn、Fe、Cu、Zn 元素。它们的平均含量接近或稍高于世界植物中的平均值。但草本植物的绿色地上部分和木本植物的绿色器官叶子对过渡元

表 5 珠峰地区主要植物中 Mn、Fe、Cu、Zn 的含量
与全球植物的比较 ($\frac{\text{最低值} \sim \text{最高值}}{\text{平均值}}$, 占干重 105°C)

植 物	植物的部位	Mn	Fe	Cu	Zn
		$n \cdot 10^{-1} \%$		$n \cdot 10^{-3} \%$	
草 本 植 物	地上部	$\frac{\text{痕跡}-0.16}{0.09}$	$\frac{0.4-3.57}{1.92}$	$\frac{0.15-1.16}{0.55}$	$\frac{0.43-1.29}{0.76}$
木 本 植 物	主要是叶, 少量小枝	$\frac{0.13-0.48}{0.29}$	$\frac{0.09-0.48}{0.26}$	$\frac{0.18-1.48}{0.61}$	$\frac{0.15-1.25}{0.75}$
世 界 植 物		0.01	0.2	0.2	0.3

素的生物循环有明显的不同，除表现在一年生和多年生这个循环速度上有差别外，主要是在它们的含量上，如表 6 和图 1 指出，草本植物

表6 珠峯植被帶的優勢植物中某些過渡元素含量(佔烘至105°C)

植被帶	植物名稱	取樣地點和海拔(米)	取樣部位	Mn $n \cdot 10^{-1}\%$	Fe $n \cdot 10^{-1}\%$	Cu $n \cdot 10^{-3}\%$	Zn $n \cdot 10^{-3}\%$
高山草甸 和墊狀 植被	墊狀棘豆	中絲帶第三 段1830-5320	地上部	痕跡	0.85	0.15	—
	苔草	同上	同上	0.04	1.76	0.35	—
	蚤綴	同上	同上	0.09	1.86	0.87	1.02
	薄草	同上	同上	0.09	3.57	1.16	—
高山草甸 草甸植被	点地梅	黑馬雄拉 5100	地上部	痕跡	2.13	0.23	0.43
	蚤綴	黑馬雄拉 5100	同上	0.15	3.25	0.60	1.29
	風毛菊	同上	同上	0.16	1.70	0.96	0.77
高原草甸 植被	固沙草	蘇昨 4370	地上部	0.04	0.4	0.15	—
	蒿子	同上	同上	—	—	0.81	0.64
高山草甸 常綠灌叢	嵩草	黑地木 4510	地上部	痕跡	2.13	0.23	0.43
	杜鵑	德唐堂 3700	新鮮葉	0.20	0.17	0.43	0.60
暗針葉林 植被	冷杉	樟木 3040	新鮮葉小枝	0.13	0.20	0.54	0.77
	杜鵑	同上	新鮮葉	0.43	0.20	0.27	0.32
針闊混 交林植 被	鉄杉	樟木 2760	新鮮葉小枝	—	0.09	0.18	0.15
	高山櫟	同上	同上	0.49	0.25	0.64	0.38
	花楸	同上	新鮮葉	—	0.18	1.48	1.25
常綠闊 葉林植 被	樺木	樟木 2030	新鮮葉	—	0.36	0.65	0.98
	槲櫟	同上	同上	0.24	0.48	—	1.36
	含笑花	同上	同上	—	0.36	0.81	0.91
	野扇花	同上	同上	—	0.27	0.50	0.73

分析者：王鳳珍、尹潤娥、燕曉芬。

表7.

植物灰分中过渡元素的含量和生物吸收系数

分析者: 燕晓芬、王丽珍、严润娥

植物名称	朴树	楨楠	含笑花	野扇花	高山栎	铁杉	花楸	杜鹃	冷杉	杜鹃	蒿草	蒿子	固沙草	凤毛菊	蚤缀	点地梅	薄三草	蚤缀	苔草	垫状棘豆
植物部位	叶	叶	叶	叶	叶、小枝	叶、小枝	叶	叶	叶、小枝	叶	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部	地上部
氧化物总量 %	9.23	4.47	6.94	6.48	3.57	2.75	5.19	2.53	2.56	2.60	6.71	11.26	3.62	7.97	9.55	12.22	26.41	15.48	10.19	6.71
Mn %	—	0.54	—	—	1.37	—	—	1.66	0.51	0.77	痕跡	—	0.11	0.20	0.16	痕跡	0.034	0.058	0.039	痕跡
Fe %	0.39	1.07	0.52	0.42	0.70	0.033	0.35	0.79	0.78	0.35	0.30	—	1.1	2.13	3.40	1.72	1.35	1.20	1.73	1.27
Cu $\times 10^{-3}\%$	7.0	—	12	7.7	18.0	6.5	28.1	10.7	21.1	16	19.0	7.2	4.1	12	6.3	1.9	4.4	5.6	3.4	2.2
Zn $\times 10^{-3}\%$	11	30	13	11	11	5.5	24.1	12.6	30.1	23	痕跡	5.7	—	9.7	14	3.5	—	6.6	—	—

生物吸收系数 A_x $\left(\frac{\text{元素在植物灰分中的含量}}{\text{相应元素在岩石圈中的克拉克值}} \right)^{(1)}$ 或 $\left(\frac{\text{元素在植物灰分中的含量}}{\text{相应元素在土壤表层中的含量}} \right)^{(2)}$

A_x	Mn	(2) (1)	—	21 6	—	—	—	—	5.5 18	1.7 6	— 8.5	痕跡 痕跡	—	2.3 1.2	5.2 2.2	4.2 1.7	痕跡 痕跡	0.66 0.37	1.1 0.64	0.76 0.43	痕跡 痕跡
Fe	(2) (1)	0.22 0.076	0.61 0.21	0.29 0.10	0.24 0.082	0.14 0.13	0.007 0.007	0.074 0.069	0.11 0.15	0.11 0.15	— 0.12	0.094 0.58	—	0.33 0.22	0.83 0.42	1.3 0.67	0.67 0.34	0.45 0.26	0.40 0.24	0.58 0.34	0.43 0.25
Cu	(2) (1)	23 0.7	—	40 1.2	26 0.77	18 1.8	6.5 0.65	28 2.8	36 1.1	70 2.1	— 1.6	25 1.9	3.6 0.7	2.0 0.4	2.4 1.2	1.2 0.6	3.8 0.2	8.8 0.44	11 0.56	6.1 0.34	4.4 0.22
Zn	(2) (1)	36 2.2	100 6.0	43 2.6	36 2.2	11 2.7	5.5 1.1	24 4.8	2.5 5.5	6.0 6.0	— 4.6	痕跡 痕跡	2.3 1.1	— —	4.8 1.9	0.7 2.8	1.7 0.70	— —	14 1.3	— —	— —

註: 1) Mn, Fe, Cu, Zn 佔氧化物总量的百分数。 2) 生物吸收系数雖在表生地球化学中已应用, 但我们认为在計
 算上还有待进一步完善。

地上部比木本植物叶子富含Fe，它们含铁量之比为 $1.92:0.24$ ($n \cdot 10^{-1}\%$)，即草本植物地上部含铁量比木本植物叶子大7倍。但木本植物叶子的含Mn量却比草本植物地上部高3倍多(见表6)，其锰之比为木本植物的 0.29 ：草本植物的 0.09 ($n \cdot 10^{-1}\%$)。铜、锌在本区植物中的含量与分布出现另一种现象，它们在草本和木本植物的绿色器官中的分布趋势基本上是一致的(见表6和图1)。

草本植物以高山区的二个蚤缀(*Arenaria*)样品含Zn最高，约 $1.10-3\%$ ，木本植物是花楸(*Sorbus*)叶子和桤木(*Machilus*)叶子含Zn最高，前者含锌为 $1.25 \cdot 10^{-3}\%$ ，后者为 $1.36 \cdot 10^{-3}\%$ 。对铜元素，草本植物中含铜最高的是薄雪草，为 $1.16 \cdot 10^{-3}\%$ ，木本植物含铜最多的仍是花楸(*Sorbus*)

的叶子，为 $1.46 \cdot 10^{-3}\%$ 。显然植物对过渡元素含量的多寡，是它们在长期生物进化中经过系统发育和个体发育形成的生物学特性所决定的。

植物有机体的生物地球化学作用指标之一，是元素的生物吸收系数⁽¹³⁾。

它能具体表明本区植物对过渡元素以生物途径进行迁移的强弱。从表7和图2中可见到，珠峰地区植物对锰的迁移甚强烈，特别是木本植物的叶子 A_x 一般分布在 $1 \sim 20$ 之间，属生物极强烈聚积或强烈聚积的元素。其次是锌，生物吸收系数 A_x 主要位于 $1 \sim 10$ 范围内，也是生物强烈聚积元素。铜是生物弱聚积或强烈聚积的元素， A_x 在 $0.1 \sim 1$ 之间，而本区植物对Fe的迁移较弱，属生物弱聚积、中等摄取之素， A_x 小于1。

五、过渡元素在本区土壤中的含量和分布

珠峰地区土壤中过渡元素的含量和分布深受母岩和母质成分的影响，并在极大的程度上受本区二个互相联系又彼此矛盾的地球化学过程

(物质淋溶为主的：地球化学过程及物质累积为主的生物地球化学过程)所控制。表8表明本区各类山地土壤中的过渡元素含量并不丰富，它们远低于世界土壤克拉克值，这除了直接继承了本区母岩和母质（风化壳）较贫乏过渡元素外，主要是本区土壤发育年青，土体骨架粗，一般富含过渡元素的粘粒（ <0.001 毫米）甚少，不到10%，而且与高寒地区土壤——植物间的生物地球化学过程比较微弱有关。同时表8还指出，第一过渡元素系在珠峰土壤中的含量顺序为 $Fe > Ti > Mn > V > Cr > \overset{Ni}{Cu} > Co$ ，基本上与世界土壤中它们的含量顺序相一致，其中Fe在各土类中含量最高，Co含量最少，Ni、Cu、Zn三个元素的含量相差不多，在各土类间的含量顺序不是恒定的。

过渡元素在本区土壤中分布的另一特点是亚高山草甸土除Ti外，其它过渡元素（Mn、Fe、V、Cr、Ni、Co、 $\overset{Zn}{Cu}$ ）普遍增高，为本区含过渡元素最丰富的土壤。高山地灰化土中Ti、Fe、Co、Ni、Cu、Zn最贫乏（见表8，图3）。亚高山草甸土富含过渡元素的原因是很复杂的，除主要受成土母质影响外，它的表层（ $A_s + A_1$ ）含腐殖质10%以上，而这些过渡元素由于d—电子轨道电子不饱和使它成为强烈的内络合物形成体，很易和含有 $-NH_2$ 、 $-SH$ 、 $-OH$ 基团的土壤高聚合物腐殖质形成稳定的内络合物，同时它们也有一部分被土壤有机——无机复合体所吸收，使它们少遭到淋失。灰化土则强烈受生源酸类的作用，使过渡元素随_{土中}下降水淋出灰化层 A_2 ，部分溜出土壤壳。

下面将分别来讨论它们在珠峰地区土壤中的地球化学行为，

(1) Ti, Mn, Fe

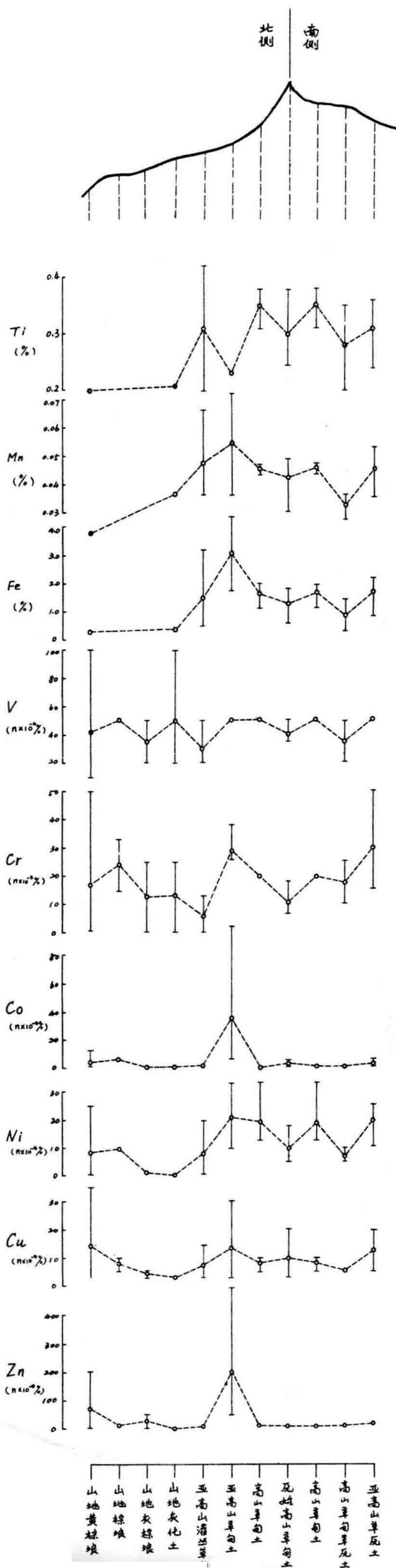
钛（Ti）是在表生作用带内不活泼的元素，从表8和图3中看到，钛在各土类间的分布规律性不明显，大致上是半干旱区的土壤含Ti量比半湿润区的土壤为高（仅限于珠峰南北坡地区）。Ti在高山草甸土

表 8 过波元素在珠峰地区土壤中的含量与土壤克拉克值对比表 (最大值-最小值)
平均

土壤名称	Ti	Mn	Fe	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	元素含量顺序
(%) 化学分析										
原始高山草甸土	0.24-0.38 0.30	0.030-0.044 0.042	1.57-2.83 2.30	35-50 40	6.5-18 10.8	0.5-2.8 1.3	5-18 10.2	3-20 9	4-15 8	Fe > Ti > Mn > V > Cr = Ni > Cu > Zn > Co
高山草甸土	0.31-0.38 0.35	0.043-0.077 0.045	2.11-3.09 2.69	50-50 50	20-20 20	0.5-0.5 0.5	12.5-33 14.3	5-10 7.1	4-20 13	Fe > Ni > Mn > V > Cr = Ni > Zn > Cu > Co
高山草甸草甸土	0.20-0.35 0.28	0.027-0.036 0.032	1.31-2.41 1.86	20-50 25	10-25 18	0.5-0.5 0.5	5-10 7.5	5-5 5	3-20 12	Fe > Ti > Mn > V > Cr > Zn > Ni > Cu > Co
亚高山草甸土	0.24-0.34 0.30	0.034-0.043 0.044	1.81-3.20 2.71	50-50 50	15-50 30	0.5-0.5 0.5	10-25 20	5-20 12	20-20 20	Fe > Ti > Mn > V > Cr > Zn = Ni > Cu > Co
亚高山草甸土	0.23	0.054	2.73-5.39 4.06	50-50 50	25-38 29	0.5-1.00 0.5	10-33 21	3-30 13	50-100 203	Fe > Ti > Mn > Zn > V > Co > Cr > Ni > Cu
亚高山灌丛草甸土	0.20-0.42 0.31	0.036-0.044 0.047	1.48-4.21 2.50	20-50 30	0.5-12.5 6.0	0.5-2.75 1.25	0.5-20 8.5	3-15 7	3-11.5 4.0	Fe > Ti > Mn > V > Ni = Cu = Cr > Zn > Co
山地灰化土	0.21	0.036	1.36	20-100 50	0.5-2.5 13.5	0.5-0.5 0.5	0.5-0.5 0.5	3-3 2.3	3-3 2.3	Fe > Ti > Mn > V > Cr > Zn = Cu > Ni = Co
山地灰化棕壤				20-50 35	0.5-2.5 13	0.5-0.5 0.5	0.5-3 1.5	3-5 4	3-50 2.7	(Fe, Ti, Mn) > V > Zn > Cr > Cu > Ni > Co
山地棕壤				50-50 50	15-33 24	5-5.5 5.3	10-10 10	5-10 7.5	10-12 11	Fe (Ti, Mn) > V > Cu > Zn > Ni > Cu > Co
山地黄棕壤	0.20	0.023	1.33	10-100 43	0.5-50 17	0.5-12.5 4.5	0.5-25 8.7	3-35 12	3-200 69	Fe > Ti > Mn > Zn > V > Cr > Ni > Cu
土壤克拉克值	0.46	0.085	3.80	100	200	8	40	20	50	Fe > Ti > Mn > Cr > V > Ni > Zn > Cu > Co

※计算时, 取土壤表层, 一般指腐殖质层或耕作层

图3. 过渡元素在珠峰地区土壤中的分布



中含量最高，约 0.35%，森林植被下发育的土壤如山地灰化土和山地黄棕壤含 Ti 最低，仅约 0.20%。显然这种分布现象主要决定成土母质和母岩中 Ti 化合物的多寡。这也可从表 9~17 中看到。本区土体中的钛含量大体上是随成土母质含 Ti 多而多，母质中含 Ti 少而少。这主要是钛的化合物在表生条件下很稳定，典型的含钛矿物如钛铁矿 (FeTiO_3) 等在风化和成土过程中抗风化作用强。它几乎不溶于土壤溶液，很少以离子态在土体中转移，如从表 9—17 中见到，在土壤剖面上一股分布较均匀，有机质多的 A 层含 Ti 略少于无机成分为主的 B 和 C 层，说明 Ti 对生物是惰性之素，很少迁移在表生作用层的土壤——植物根系，钛在酸性环境中，以怎样化合物的形式进行迁移，目前还知道很少，有人报导灰化土非真溶液中存在 $7 \cdot 10^{-6}\%$ 的 Ti⁽¹⁴⁾，从表中也看到本区灰化土 ($\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ 值约为 4) 的 A₂ 层中钛含量比其它各层稍少，说明灰化过程中的酸性下渗水能破坏含钛矿物，使一部分钛淋入 B 层累积起来。

锰 (Mn) 在表生地球化学过程中的迁移是比较复杂的。其一是锰为亲生物元素，其二是价键变化很多，在土壤中它可能出现 2 至 7 价的锰化合物。但 Mn^{6+} 和 Mn^{7+} 由于需有高的氧化环境，并极易还原成 Mn^{2+} 和 Mn^{4+} ，所以它们一般很少存在于土壤中， Mn^{3+} 是过渡态的锰离子，在土壤中最不稳定。锰在土壤中能概括成如下形态：水溶性的或易溶性的锰盐，锰的有机化合物，代换性锰，难溶的和不可溶的锰化合物，并通常处于动平衡状态下：



锰在亚高山草甸土中含量最高，平均值为 0.054%，黄棕壤中含锰最低为 0.023%，锰在各类土壤中的分布见表 8 图 3。本区土壤中的

锰含量受母质影响很大，同时生物地球化学过程对锰在土壤腐殖质中的积累起着一定的作用，除锰在黄棕壤和灰化土中略有下淋趋势外，锰在不少土壤的表层（ A 或 A_1 或 A_1+A_2 层）都有一定的聚积倾向（见表9~17）。虽然本区各种草甸植被含锰量并不高，并低于木本植物（见表6），但木本植被作用下在黄棕壤和灰化土发育过程中，锰从表层下淋的强度大于锰在表层的生物累积，并与剖面上粘粒（ <0.001 毫米）和代换量分布相一致。

铁（Fe）是表生地球化学作用圈中分布最广的元素之一，它在珠峰土类间的分布与锰的分布相同（见表8和图3），铁在土体中的迁移和分布在大多数情况下与锰基本上一致（见表9~17）。

钒（V）和铬（Cr）二元素的化学性质较为相似，但至今钒和铬的土壤地球化学研究很少，其原因之一是它们在农业生产上的意义不大，生理生化功能不明，钒和铬在珠峰地区各土类中的分布规律基本上一致。它们在亚高山灌丛草甸土中含量最低，V为 $3 \cdot 10^{-3}\%$ ，Cr为 $4 \cdot 10^{-4}\%$ 。铬的平均最高值出现在亚高山草原土和亚高山草甸土中，约 $3 \cdot 10^{-3}\%$ ，钒的最高值同时出现在几个土类中，并在各土类间的含量变化幅度较小，为 $5 \cdot 10^{-3}\%$ （见表8和图3）。表18~27指出钒和铬在土壤腐殖质层几乎完全缺乏浓集。这可能是植物对钒和铬需要很少，阻碍它们参与物质的生物小循环，表现出它们生物地球化学作用不明显。它们另一个特点是在土壤剖面上的分布无明显的规律性，甚至在强烈地灰化过程中钒和铬都未在 A_1 层减少，这是和其它过渡元素有显著不同的，这可能是除樟木的个别地方（温度高，排水通气好）外，一般在本区的水热条件下铬、钒不可能形成解溶于水中的高价含氧阴离子，如钒酸根和铬酸根等而受到淋溶。此外，土