

天山及其邻近地区土壤某些元素的 地球化学分异初探

黄 标 龚子同 顾国安

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

摘 要

本文在 34 个土壤剖面 181 个样品大量元素和 36 个剖面 176 个样品的 Zn、Ni、Cu、Co、V 等微量元素分析资料的基础上, 讨论了天山及其邻近地区土壤成土的地球化学过程、这些元素的空间分异。认为天山及其邻近地区土壤的形成存在着三个主要的成土地球化学过程, 即脱盐基过程、镁、钙积过程、钠积过程; 随海拔高度的降低、水分减少、温度升高, 元素的空间分异表现为: 盐基自高山淋溶后, 朝着盆地方向, 按它们的盐类溶解度大小, 分别富集钙、镁、钠等的盐类; 微量元素含量自高山至盆地逐渐减少。

关键词 元素, 土壤, 地球化学分异, 天山及其邻近地区

天山及其邻近地区, 由于山地海拔高度变化较大, 引起成土的水热状况差异明显, 因此该地区土壤类型较复杂。前人在该地区进行过大量的工作^[1,2], 但从土壤地球化学观点出发, 探讨土壤元素的地球化学分异则相对较少。本文拟采用聚类分析、主组元分析等数学方法^[3,4]研究天山及其邻近地区土壤在风化—成土过程中某些元素的活动性及其地球化学分异。

一、土壤分布概况和数据搜集、整理

(一) 土壤分布概况

天山及其邻近地区分别分布有垂直地带性土壤和水平地带性土壤。自天山山顶至两侧盆地分别发育永冻薄层土、寒性薄层土、寒冻粘土、寒粘土、寒冻钙土、灰褐土、栗钙土、灰钙土、棕钙土、灰漠土、棕漠土等, 在盆地内沙漠边缘由于极度干旱产生盐渍化, 形成各种类型的盐土。水平方向上, 北坡以栗钙土、灰钙土、灰漠土为主, 而南坡则以棕钙土, 棕漠土为主。成土母岩和母质, 山地土壤为石灰岩、砂岩、页岩等沉积岩、花岗岩和变质岩及其坡积物、冰碛物等; 其余土壤则为各种洪积、冲积物, 黄土及黄土状沉积物。

(二) 原始数据的搜集和整理

本文搜集了我所多次新疆土壤考察采集的样品和已发表的^[5]分析资料, 其中大量元素 34 个剖面 181 个样品, Zn、Ni、Cu、Co、V 等微量元素 36 个剖面 176 个样品。它们分别采自天山南北的不同地区, 包括上述各种不同类型的土壤。

土体大量元素分析结果为 9 个元素的氧化物, 均换算成灼烧土重的百分数, 考虑到干

旱和山地土壤生物、气候条件的特殊性,生物和土壤元素的循环主要在土层内发生,较少涉及母质,也为了便于比较和统计,我们按发生层分层统计元素含量,并以加权平均值代表土壤剖面的元素含量,作为统计的原始数据。

二、土壤元素的活动性与成土地球化学过程

(一) 元素的离散度、相关性与元素的活动性

将该地区各类土壤的元素含量计算平均值后发现(表1),CaO、Na₂O的变异系数较大,分别为52.44%、142%,其余元素变异系数均较小。除Na₂O外,各元素含量明显比热带、亚热带地区集中^[4]。微量元素分布亦较集中,变异系数为19.21—32.53%。以上特征表明,干旱条件下,碱土和碱金属离子中钙、钠等活性较强;同时也表明本区土壤母质

表1 各类土壤大量元素平均值、标准差及变异系数 (%)

Table 1 Means, standard deviation and variation coefficient of major elements of various soils

变 量 Variate	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
平均值 Means	61.67	5.58	14.38	7.33	2.72	0.68	0.11	2.78	4.27
标准差 Standard deviation	5.05	1.23	1.88	3.84	0.49	0.15	0.03	0.41	6.06
变异系数 Variation coefficient	8.19	21.96	13.10	52.44	18.01	21.53	28.99	14.77	142.00

表2 土壤大量和微量元素的相关阵

Table 2 Correlation matrix of major and trace elements of soils

大量元素 Major elements	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
SiO ₂		0.25	0.57	-0.54	-0.16	0.38	0.23	0.38	-0.76
Fe ₂ O ₃			0.85	-0.39	0.55	0.91	0.84	0.46	-0.55
Al ₂ O ₃	**	**		-0.60	0.31	0.83	0.65	0.57	-0.69
CaO	**	*	**		0.38	-0.45	-0.34	-0.26	0.11
MgO		**		*		0.43	0.40	0.41	-0.43
TiO ₂	*	**	**	**	**		0.80	0.52	-0.59
MnO		**	**	*	*	**		0.44	-0.44
K ₂ O	*	**	**		*	**	**		-0.55
Na ₂ O	**	**	**		**	**	**	**	

微量元素 Trace elements	Zn	Ni	Cu	Co	V
Zn		0.82	0.58	0.86	0.74
Ni	**		0.50	0.80	0.55
Cu	**	**		0.67	0.60
Co	**	**	**		0.82
V	**	**	**	**	

注: 大量元素 $n = 34$, 微量元素 $n = 36$ 。

成分变化不大。

表 2 为各元素的相关阵,正如以上所述,由于大部分元素活动性较弱,因此分异不明显, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 、 K_2O 等元素间的相关性大部分达到显著和极显著正相关。而 CaO 除与 K_2O 无显著相关、与 MgO 显著正相关外; Na_2O 除与 CaO 无显著相关外,它们与其它元素均呈显著或极显著负相关。 CaO 、 Na_2O 显示了较强的活动性。值得注意的是 CaO 与 MgO 之间达到显著的正相关,表明该地区 MgO 和 CaO 相似也有一定的活动性。微量元素间相关性均达极显著相关,元素间亦无明显分异。

(二) 成土地球化学过程分析

土壤元素的活动性受成土过程诸因素影响。在天山及其邻近地区特殊的成土条件下,主要的成土地球化学过程怎样?这是解决该地区土壤元素分异所必须回答的问题。根据土壤剖面的元素含量,采用主组元分析方法可较好地区别出成土过程中主要的地球化学过程。

从主组元分析的前三个主组元看(表 3),其累计贡献率已达到 87%,利用前三个主组元的权系数和综合指标已能对该地区土壤形成过程中元素的活动性进行区分。现根据前三个主组元的权系数及综合指标,从土壤地球化学观点出发,试对三个主组元分别赋予其物理意义。

表 3 土壤大量元素主组元分析结果

Table 3 Principal component analyses of major elements of soils

主组元 Component	F ₁	F ₂	F ₃
特征值 Eigenvalue	5.02	1.72	1.10
累计贡献率(%) Cumulative variance	56	75	87
SiO_2	0.5819	-0.6183	-0.4818
Fe_2O_3	0.9015	0.2200	0.3001
Al_2O_3	0.9313	-0.1533	0.0555
CaO	-0.4978	0.7281	-0.3834
MgO	0.4545	0.8266	-0.1661
TiO_2	0.9181	0.0882	0.2227
MnO	0.8023	0.1862	0.3575
K_2O	0.6807	0.0900	-0.2864
Na_2O	-0.7723	0.0009	0.5874

第一主组元 (F_1) 实际是脱钙钠过程的量度,其负向指标为 CaO 、 Na_2O , 这些元素含量低时,脱钙钠作用愈强。其余元素均为正向指标,表明由于盐基淋失,其余元素含量相对增加。新疆地区基本为高山环绕盆地的地形,水系自高山流入盆地,无外来水系存在,土壤盐分主要来源于山地。从这一点看,脱盐基化作用是天山及其邻近地区土壤元素循环的重要过程。

第二主组元 (F_2) 为成土过程中镁、钙积过程的量度,正向指标较高的为 CaO 、 MgO , 表明 MgO 、 CaO 含量愈高,镁、钙积过程愈强烈。负向指标权系数较大的为 SiO_2 , 土壤

SiO_2 含量低时,表示有脱硅作用存在。从所搜集的实际各土壤剖面成分看,无论在空间上还是成土过程中,镁的富集程度并不太明显,只是由于镁与钙之间有着密切的正相关性(表 2),使得 MgO 的权系数较高。看来镁富集的地带性不甚明显,而只显示其微域性^[9]。

第三主组元(F_3)则是积钠过程的量度, Na_2O 的权系数较大。随着水分逐渐减少、气温升高,蒸发作用加强,自高山淋溶出的组分在土壤中明显富集,直至在盆地低洼处形成各种类型的盐土。

(三) 干旱地区元素活动的特点

上述三个主组元同时也反映了该地区元素活动的特点。与热带亚热带地区元素的活动性相比^[9],本地区有两个显著的特点:(1)由于水热状况不同,导致两地区元素淋溶的程度不同。在热带亚热带地区元素淋溶程度较深,盐基离子强烈淋失,热带地区硅也强烈淋失。而干旱地区虽在山地也有脱盐基作用,但程度和规模明显要小,相反主要表现为积盐过程。(2)受气候和地貌的共同影响,元素迁移的距离也有明显不同。热带亚热带地区水分较充足,地表径流发育,且为开放的地形地貌,元素大部分迁移至海洋而流失。而干旱地区水分较少,蒸发快,元素无法远程迁移,加之特殊的封闭地形,使元素在盆地内按地球化学的分异规律积累。

三、土壤的地球化学分类和元素的空间分异

(一) 数据处理方法的选择

将土壤按地球化学性质进行分类是探讨元素空间分异的基础。对样品进行合理的分类则需要选择一个较好的数据处理方法。Q 型聚类分析方法是多元分析的方法之一。主要是在处理多变量的情况下,综合考虑诸变量的异同,定量描述样品间相似程度,以便对样品进行分类的一种数理统计方法。采用这种方法可使样品分类更客观和合理。

Q 型聚类分析有距离系数、相似系数、离差平方和等方法。前两种方法要求各指标间必须相互独立,这实际上是很难满足的,因土壤为一连续的自然体,互相之间既有区别又有联系。而离差平方和法是以组内离差平方和为出发点的系统聚类分析法。它首先计算出样品点群的重心,进而计算每个点群中各样品点到重心的离差平方和,每次取离差平方和增量最小的两群归为一类,直至全部样品合为一群。该方法仅要求各样品间相对独立。

(二) 土壤的地球化学分类

大量元素聚类分析结果见图 1。若取离差平方和增量 4.0 为界限,则所有土壤样品可分成四大类,各类土壤的基本特征及元素含量的平均值列入表 4。第 I 组主要由寒冻粘土、寒毡土、黑钙土,高山潜育土和寒性薄层土等组成。元素含量中 CaO 、 Na_2O 低于上部地壳平均值^[7], SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 则高于上部地壳平均值,表明 CaO 、 Na_2O 为淋出。该组土壤元素以富 Si、Al 为特征,即为硅铝土;第 II 组为发育于较干旱条件下的寒毡土、灰褐土、棕钙土等,元素含量以富钙为特征,镁也有轻微富集, Na_2O 含量仍较低。表明气候已趋干旱,出现钙积现象,而钠为淋出。该土壤以富 CaCO_3 为特征,称碳酸盐土;第 III 组主要为灰漠土、灰钙土、棕漠土等。形成的气候更趋干旱, CaO 含量亦较高,但

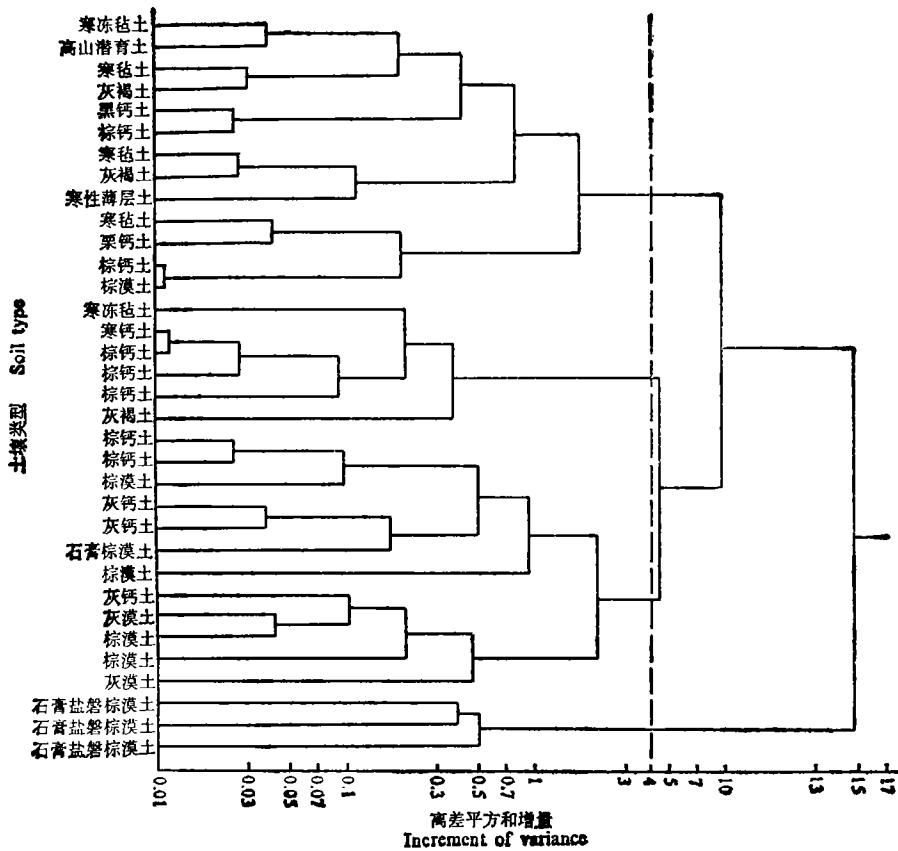


图 1 土壤大量元素 Q 型聚类分析枝状图

Fig. 1 Dendrogram of major elements of soils according to Q-type cluster analysis

较多以石膏的形式存在。与第 II 组不同的是 Na_2O 出现了轻微富集, 土壤中 $Na_2O/K_2O > 1$, 为盐渍石膏土; 第 IV 组主要为极度干旱条件下形成的石膏盐磐棕漠土, 以富钠为特征, $Na_2O/K_2O \gg 1$, CaO 含量仍较高, 为石膏盐渍土。

从微量元素聚类分析结果(图 2) 看, 由于微量元素之间分异不明显。因此, 各样品或样品群之间的离差平方和增量较小, 分组比大量元素地球化学分组(表 4) 也稍简单。尽管这样, 我们仍可看出两者有着明显的相似之处。以离差平方和增量为 2.0 作界限, 可分为三组, 第一组以各种高山、亚高山土壤和山地土壤为主, 相当于大量元素分组中的低钙、钠组; 第二组为各种山地土壤和灰漠土、棕漠土, 相当于高钙的地球化学类型; 第三组则为富钠的石膏盐磐棕漠土和各种盐土。两种地球化学分组的相似性也暗示了微量元素的活动受控于上述几个主要的成土地球化学过程。

(三) 土壤元素的空间分异

根据以上的分类, 天山及其邻近地区土壤地球化学类型的空间分布自高山至盆地大致呈硅铝土→碳酸盐土→盐渍石膏土→石膏盐渍土→盐渍土的次序(图 3)。元素也是按地形分别显示其分异特征。在高山地带, 水分充足。因此, 发生盐基淋溶作用, 活动性元

表 4 土壤地球化学类型的大量元素平均含量 (%)
 Table 4 Means contents of major elements of soil geochemical types (%)

分组 Group	样品数 Number of samples	土壤类型 Soil type	地球化学特征 Geochemical characteristics	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	$\frac{Na_2O}{K_2O}$
I	11	寒冻黏土、寒毡土、高山潜育土、寒性薄层土和黑钙土等	低 CaO, Na ₂ O, 高 SiO ₂ , Al ₂ O ₃	64.37 ±1.63	6.64 ±0.64	16.14 ±0.89	3.62 ±1.57	2.69 ±0.24	0.82 ±0.06	0.13 ±0.03	2.93 ±0.2	2.12 ±0.42	0.72
II	6	较干旱条件下形成的寒毡土、灰褐土、棕钙土等	高 CaO, MgO	58.76 ±1.99	5.74 ±0.41	14.27 ±0.52	11.34 ±2.00	3.41 ±0.23	0.70 ±0.02	0.11 ±0.02	3.00 ±0.23	2.34 ±0.67	0.78
III	12	灰钙土、灰漠土和棕漠土等	中等 CaO, Na ₂ O	64.02 ±3.01	4.69 ±0.58	13.59 ±1.12	8.37 ±3.49	2.46 ±0.38	0.58 ±0.0	0.09 ±0.01	2.66 ±0.43	3.01 ±0.56	1.13
IV	3	石膏盐磐棕漠土	高 Na ₂ O	48.97 ±2.67	3.98 ±1.59	10.71 ±2.00	9.09 ±3.42	2.28 ±0.58	0.43 ±0.15	0.07 ±0.04	2.17 ±0.45	22.07 ±8.07	10.17
上部地壳平均值 ¹⁾				61.94	8.49	14.87	5.08	2.33	0.58	0.10	3.11	2.84	0.91

1) 据 A. B. Ронов и A. A. Дрошевский, 1969.

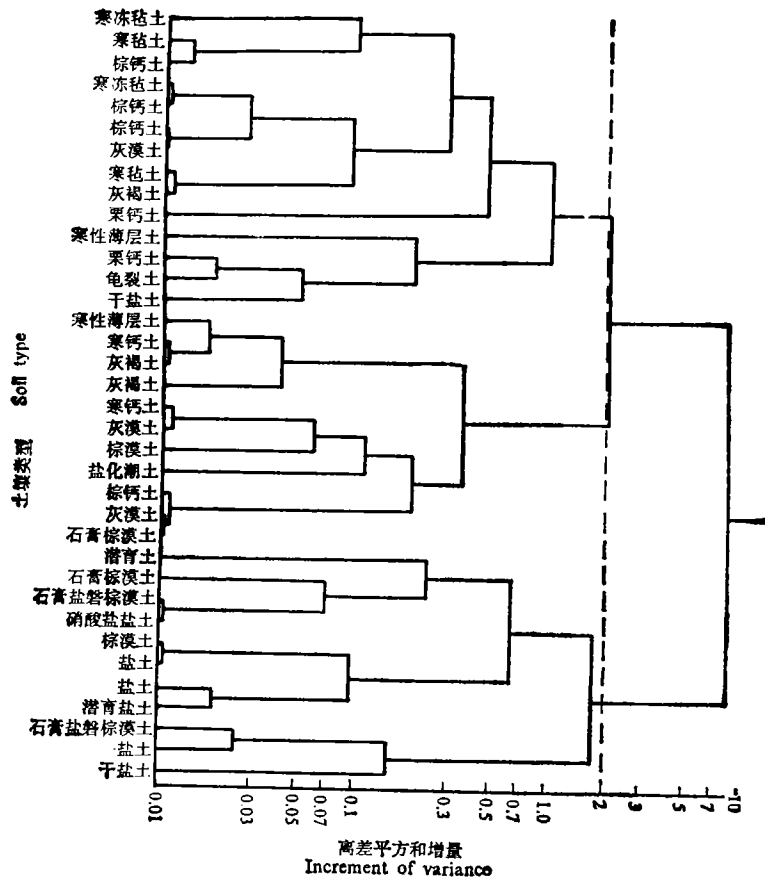


图2 土壤微量元素Q型聚类分析枝状图

Fig. 2 Dendrogram of trace elements in soils according to Q-type cluster analysis

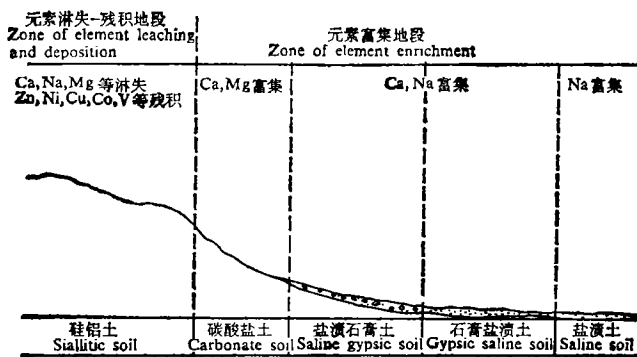


图3 天山及其邻近地区土壤中元素地球化学分异略图

Fig. 3 Sketch map of elemental geochemical differentiation of soils in the Tianshan Mountains and the neighboring regions

素钙、钠和少量镁自高山地带淋出。当淋出的盐基运移至较干旱的山麓地带，由于钙、镁的碳酸盐溶解度较小，产生镁钙积作用，使钙、镁沉淀富集。元素继续运移至山前地带，干

旱程度加剧,开始发育积钠作用,钠盐出现富集,钙积作用仍存在,但以钙的硫酸盐形式沉淀。至极度干旱的地区时,钠大量富集,成土以积钠的地球化学过程占主导地位。天山地区元素的空间分异规律在干旱地区有一定代表性^[6]。

微量元素的空间分异表现为,自高山至盆地,土壤中 Zn、Ni、Cu、Co、V 等元素总量逐渐降低(表 5)。造成这种空间分异的原因是较清楚的。一般情况下,这些微量元素的活性远小于 Ca、Mg、Na 等的盐类物质。但在高山地带由于盐基离子的淋溶,对微量元素来说,就相对地起了“浓缩”作用,含量升高。相反在山前,盐类的淀积则起了“稀释”作用,使微量元素含量降低。由此也可看出,微量元素的分异受前述的几个地球化学过程所控制。

表 5 土壤微量元素地球化学分组及其参数

Table 5 Geochemical groups and Ni/Co ratios of trace elements of soils

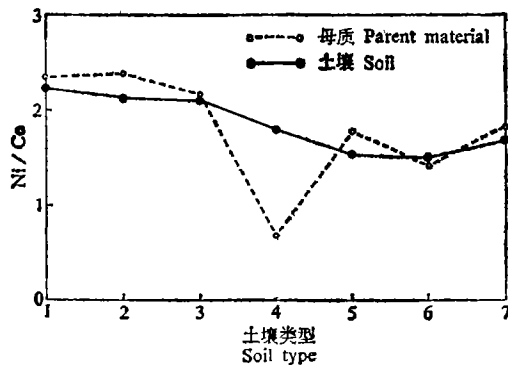
分组 Group	样品数 Number of samples	土壤类型 Soil type	Zn、Ni、Cu、 Co、V 总量 Total (mg/kg)	土壤 Soil Ni/Co	母质 Parent material Ni/Co
一	11	高山—亚高山土壤、山地土壤	325.1	2.24	2.13
二	10	山地土壤、灰漠土、棕漠土等	278.8	2.05	1.90
三	8	石膏盐磐棕漠土、盐土等	180.9	1.86	1.84

干旱区土壤元素的空间分异与热带亚热带土壤相比^[7]亦有显著的特点:(1)干旱区土壤元素空间分异受母质影响较小,因母质不同造成的元素含量差异不明显。而热带亚热带地区土壤元素的分异受母质影响较大,元素含量因母质种类不同而明显变化。(2)在母质相同地形相似条件下,气候对元素分异的影响两者也有明显区别。干旱的气候使活性元素迁移距离较短,自高山淋溶迁移直至盆地内富集,在短距离内构成一个完整的元素地球化学循环(图 3)。热带亚热带地区,充足的水分使元素迁移距离较远,在地形的不同部位均表现为活性元素的强烈迁移,而无明显富集。

(四) 关于土壤中 Ni、Co 分异的讨论

Xing 等(1991)^[10]指出土壤中 Ni/Co 比值主要由成土母质所决定。从本区母质 Ni/Co 比值变化看,亦有与土壤相似的变化规律(表 5),土壤 Ni/Co 比值变化从总体上看似乎受母质控制。但从另一方面看, Ni/Co 又与土壤的形成条件和物理化学性质变化有关,即随土壤形成条件更趋氧化状态、性质更趋碱性, Ni/Co 比值逐渐降低。因 Co 为一变价元素,在母岩中一般都是以 Co^{2+} 存在于硅酸盐或硫化矿物中,但在较氧化的条件下, Co^{2+} 可氧化成 Co^{3+} , Co^{3+} 在碱性条件下水解可沉淀下来。而 Ni^{2+} 则较稳定,不易氧化,可进入溶液而产生迁移。因此,在地势较低、较干旱的条件下, Ni 易于迁移,故土壤中 Ni/Co 比值较低。这一点也可以从我们在哈密的垂直天山断面上分别采样所获得的结果得到验证(图 4)。该断面不同类型土壤剖面 Ni/Co 比值自高至低呈现有规律的降低趋势,但母质 Ni/Co 比的这种趋势不明显,两者相关系数为 0.6109,小于 $p < 0.05$ 的临界值(0.754),无显著相关。因此,土壤中 Ni/Co 比值的除考虑母质的变化外,

还应考虑土壤的形成条件和物理化学性质。



1.寒毡土 2.灰褐土 3.棕钙土 4.棕漠土
5.石膏盐 磐棕漠土 6.干盐土 7.盐土

图4 天山-哈密断面不同类型土壤与母质 Ni/Co 关系

Fig. 4 Relations of Ni/Co ratio between soils and parent materials in various soil types across Tianshan-Hami

四、结 语

1. 天山及其邻近地区的成土作用存在着三个主要的地球化学过程,即脱钙、钠过程,积镁钙过程和积钠过程。这些过程受气候、地形、生物等因素影响而表现不一。在它们的作用下,形成了该地区复杂的土壤分布格局。

2. 依据土壤大量元素和某些微量元素含量,通过统计分析,可将天山及其邻近地区土壤分为四种地球化学类型:

(1) 硅铝土类:低钙、钠而富硅、铝,形成于高山和亚高山带, Zn、Ni、Cu、Co、V 等微量元素总量较高, Ni/Co 比

值也较高。

(2) 碳酸盐土类:钙和镁含量较高,形成于较干旱的山麓地带,微量元素总量和 Ni/Co 比值有所降低。

(3) 盐渍石膏土类:钙和钠为中等含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$, 形成于山前的冲积和洪积物上。

(4) 石膏盐渍土类:有高钠和钙含量,形成于极干旱区。微量元素总量、Ni/Co 比值较低。

3. 天山及其邻近地区土壤元素的空间分异是:钙、钠和少量镁自高山淋溶,至山体较低部位和山前,随水分减少、温度升高,按盐类的溶解度大小分别富集钙、镁、钠等的盐类。

4. 土壤 Ni/Co 比值除受母质影响外,还与成土的物理化学条件有关。在天山及其邻近地区随着成土条件更趋氧化、更趋碱性, Ni/Co 比值逐渐减小。

天山地区土壤中元素丰缺明显,土壤类型复杂。掌握元素空间分异规律对因土种植和改良,土地资源的评价和利用,环境保护等都具有重要意义。

参 考 文 献

1. 文振旺等著,1965: 新疆土壤地理。91—412 页,科学出版社。
2. 蒋寒荣等编,1989: 新疆土地资源。新疆人民出版社。
3. 刘多森,1979: 主组元分析在分辨土壤类型及风化—成土过程上的应用(以水稻土为例)。土壤学报,第 16 卷 2 期,172—183 页。
4. 吴志东、龚子同,1983: 我国热带、亚热带土壤地球化学类型的主组元分析。土壤学报,第 20 卷 4 期,431—439 页。
5. 熊毅、李庆远主编,1990: 中国土壤(第二版)。146—163 页,科学出版社。
6. 龚子同,1980: 我国境内成土风化壳的地球化学类型。土壤专报,37 号,1—23 页。
7. 南京大学地质系编,1979: 地球化学。83 页,科学出版社。

8. 陈志诚、赵文君、龚子同,1992: 红壤生态站土壤中元素的空间分异。红壤生态系统研究(第一集)。80—87页, 科学出版社。
9. 李述刚、王周琼著,1988: 荒漠碱土。3—17页,新疆人民出版社。
10. Xing Guangxi, Hou Wenhua and Yang Weng-xing, 1991: Ratios of Closely Related Elements in Soil and Their Implications. *Pedosphere*, Vol. 1, No. 4, pp 333—343.

PRELIMINARY STUDY ON GEOCHEMICAL DIFFERENTIATION OF SOME ELEMENTS IN SOILS OF THE TIANSHAN MOUNTAINS AND THEIR NEIGHBORING REGIONS

Huang Biao, Gong Zitong and Gu Guoan

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008*)

Summary

Based on analyzed results of major elements of 181 samples from 34 profiles and trace elements of 176 samples from 36 profiles, this paper discusses soil geochemical forming processes and the spatial differentiation of major elements and trace elements such as Zn, Cu, Ni, Co and V in soils of the Tianshan Mountains and their neighboring regions. During formation of the soils there are three main geochemical processes which are Ca and Na-leaching process, Mg and Ca-enrichment process and Na-enrichment process. Spatial differentiation of the elements was from the leaching of Ca, Na and Mg in high mountain to the precipitating of salts of Ca, Mg and Na, respectively, according to the increasing of their solubility and gradual decrease of the total content of trace elements from high mountain to basins with lowering of altitude, decreasing of moisture, and increasing of temperature.

Key words Elements, Soils, Geochemical differentiation, Tianshan mountains and their neighboring regions