

我国热带、亚热带土壤地球化学类型的主组元分析*

吴志东 龚子同

(中国科学院南京土壤所)

我国热带、亚热带的土壤资源丰富,类型繁多。土壤工作者对此作了大量的研究工作。关于运用数学手段进行土壤物质分类方面的研究,近年来也已发表过多篇文章^[1,2,6,7,10,11]。本文拟从土壤地球化学观点出发,采用数理统计学方法,对热带、亚热带土壤的地球化学类型进行物质分类。

物质分类的依据是根据土壤中各主要元素的含量状况,可以大致判断土壤发育的程度,了解土壤在地球化学发生过程中现阶段元素迁移、富集的特征。从而确定土壤的地球化学类型。

文中采用主组元分析方法,对我国热带、亚热带65个土壤剖面的十个主要元素含量进行计算,从而分辨土壤地球化学类型。

一、待算土壤剖面情况及原始数据的整理

参加统计的65个剖面共256个标本,分别采自湖南、江西、广东、广西、贵州和云南等六个省(区),有些分析结果已经发表过,部分土壤标本是新近采集和分析的^[9]。这些土壤分别发育于玄武岩、花岗岩、石灰岩、砂页岩、第四纪红色粘土等25种岩石和风化壳上,属于砖红壤、红壤、黄壤、黄棕壤、紫色土、石灰土等多种土壤类型,也包括一部分水稻土。

上述65个土壤全剖面的土体全量分析结果,共10个元素,均以其氧化物占灼烧土重

表1 65个土壤剖面各指标的均值(\bar{X}_j)、标准差(S_j)及变差系数(CV)

Table 1 Means(\bar{X}_j), Standard Deviation (S_j) and Variational Coefficient (CV) of each Index for the 65 Soil Profiles

统计项目 Statistical item	占灼烧土重% (全剖面1米土层内加权平均) % by ignited soil (Weighted means in soil profile in depth of 1m.)									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
\bar{X}_j	64.95	8.84	20.23	1.46	0.95	1.21	0.13	1.63	0.34	0.13
S_j	14.49	6.07	7.96	4.81	0.63	1.03	0.16	0.97	0.27	0.15
CV	0.22	0.69	0.39	3.29	0.66	0.85	1.23	0.60	0.79	1.15

* 本文在数理统计方面得到刘多森同志的帮助,特此致谢。

的百分数表示。考虑到生物循环主要在土壤层内发生,而元素的地球化学行为远远超出了土壤层的范围,为了比较一致地进行统计,我们规定了1米厚的土体内元素的各自加权平均含量作为统计的原始数据。这样做的缺点是不能反映土壤的剖面分异,但对于分辨土壤地球化学类型则是可以参照的。

从表1可以看出各元素分布的离散程度。其中离散程度最大的是CaO,其次是MnO,而SiO₂的含量分布相对地比较集中。

原始数据用标准差标准化处理后列成矩阵,送入本所微处理机进行计算¹⁾。

二、关于土壤指标的相关阵

65个土壤剖面各指标的相关阵(表2),所揭示的各元素之间相关性的规律,有些是早已被人们所认识的,如硅与铁、铝、钛、锰、磷之间的负相关;铁、铝、钛、锰、磷之间的正相关等等。它说明在热带、亚热带生物气候条件下,这些元素之间在迁移和富集方面的必然联系。但是出现了如磷与锰有极显著的相关性这样一些现象,这可能是两者在土体内的地球化学行为有某些相似性。磷在土壤发生风化过程中的意义已见报道^[13],而有关磷锰之间关系的报道不多。CaO除了与MgO有较显著的正相关外,与其他八个元素几乎均无明显相关。

表2 土壤指标的相关阵 (n = 65)

Table 2 Correlation matrix of soil index

指 标 Index	SiO ₂ 1	Fe ₂ O ₃ 2	Al ₂ O ₃ 3	CaO 4	MgO 5	TiO ₂ 6	MnO 7	K ₂ O 8	Na ₂ O 9	P ₂ O ₅ 10
1	1									
2	-0.928**	1								
3	-0.905**	0.891**	1							
4	-0.242*	-0.079	-0.135	1						
5	-0.118	-0.023	-0.120	0.328**	1					
6	-0.846**	0.961**	0.788**	-0.093	-0.091	1				
7	-0.612**	0.560**	0.540**	0.072	0.229	0.494**	1			
8	0.323**	-0.449**	-0.395**	0.044	0.434**	-0.477*	-0.174	1		
9	0.090	-0.156	-0.176	0.030	0.418**	-0.133	0.182	0.421**	1	
10	-0.568**	0.495**	0.448**	0.191	0.212	0.470**	0.896**	-0.204	0.154	1

* $P(|r| > r_{\alpha}) = \alpha$, $\alpha = 0.05$; ** $\alpha = 0.01$.

三、土壤剖面地球化学过程的分辨

从表3中前三个主组元来看,其累计贡献率已经超过70%。因此利用前三个主组元的权系数和主要指标组合,就可以对上述土壤的主要地球化学过程进行区分。

表4列出了前三个主组元的权系数及其主要指标组合,从土壤地球化学观点出发,可

1) 计算程序和计算结果均由本所唐万龙同志编制和核校,在此表示感谢。

表 3 土壤指标相关阵的特征值及其贡献率

Table 3 Eigenvalue and explained variance of correlation matrix of soil index

主组元 Components	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}
特征值 Eigenvalue	4.655	2.121	1.073	0.848	0.522	0.426	0.227	0.099	0.027	0.002
贡献率 Explained variance (%)	46.55	21.21	10.73	8.48	5.22	4.26	2.27	0.99	0.27	0.02
累计贡献率 Cumulative variance (%)	46.55	67.76	78.49	86.97	92.19	96.45	98.72	99.71	99.98	100

表 4 前三个主组元的权系数及主要指标组合

Table 4 Eigenvectors and combination of major index for the first three principal components

主组元 Components	Y_1	Y_2	Y_3
1. SiO_2	-0.433	0.0750	0.142
2. Fe_2O_3	0.440	0.0727	0.0777
3. Al_2O_3	0.415	0.104	0.124
4. CaO	0.0126	-0.302	-0.828
5. MgO	-0.00589	-0.557	-0.0723
6. TiO_2	0.417	0.103	0.0894
7. MnO	0.338	-0.304	0.112
8. K_2O	-0.230	-0.385	0.245
9. Na_2O	-0.0603	-0.478	0.432
10. P_2O_5	0.320	-0.312	-0.0209
主要指标组合 Combination of major index	正向 plus	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$	Na_2O
	逆向 inverse	SiO_2	$\text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$ CaO

分别赋予物理意义。

第一主组元的物理意义是土壤在风化—成土过程中脱硅富铝化作用的量度。其正向指标是铁、铝、钛, 这些元素含量高时, 表示脱硅富铝化作用愈强; 而逆向指标是硅, 显然, 土壤硅含量高时, 则表示脱硅富铝化作用愈弱。在热带、亚热带地区, 硅的淋失总的来说比较强烈, 但其淋溶强度可因各剖面物质基础的差异、外营力作用的强弱以及风化—成土过程的相对年龄的长短而有所变化, 致使各剖面由第一主组元表达的脱硅富铝化作用的强度亦有所不同。由于铁的富集强度与铝的富集强度在一定条件下有密切的联系 (两者的相关系数为 0.891**), 因此, 脱硅富铝化作用也可以称为脱硅富铁铝化作用。

第二主组元是在第一主组元所代表的土壤脱硅富铝化强度大体一致的情况下, 镁、钠、钾等易移动元素淋溶作用的量度, 也即脱盐基作用强度的衡量。其逆向指标主要是镁、钠、钾, 其次还有磷、锰、钙。这些元素对其淋溶过程的负荷是逆向的, 也即当其含量高时, 表示易移动元素淋溶的强度愈小, 反之亦然。

第三主组元是在第一主组元所代表的脱硅富铝化强度和第二主组元所代表的脱盐基作用强度大体相同条件下脱钙作用的量度。钙元素对第三主组元的逆向负荷极大, 启示

钙元素在土壤地球化学过程中往往较之其它易移动元素更活跃而率先活动。

以上三个主组元代表了热带、亚热带地区土壤的主要地球化学过程及土壤发生发育的阶段,即脱钙、脱盐基和脱硅富铝化,它们是既相互联系又有区别的三个阶段。因此在使用其中的两个主组元作二维平面图时,都会出现少数剖面分辨不清的现象。考虑到在这一地区土壤中尚处于脱钙阶段的土壤剖面较少,大部分都处在脱盐基作用和脱硅富铝化作用阶段,所以采用第一和第二主组元作图可以获得较高的分辨程度。

四、土壤中 10 个元素的地球化学行为的比较

元素在土壤中的地球化学行为与元素的性质、赋存形态以及所处的生物气候条件有关。把表 4 所列的三个主组元的权系数 (ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3) 作为指标,对土壤中 10 个主要元素进行聚类分析(图 1),结果表明,在热带、亚热带生物气候条件下,元素的运动有特定的规律性。硅、镁、钾、钠四个元素聚在一起,表现出淋溶的特性;铁、铝、钛、锰和磷聚在一起,反映出在土壤中富集的特点;钙的情况比较特殊,它受生物和人为作用(在水稻土中大量施用石灰等)影响较大。进一步区分,在淋溶型的元素中,又可以把硅和镁、钠、钾区分出来;在积聚型的元素中可以把铁、铝、钛和锰、磷区分开。反映了迁移和富集的程度不同。

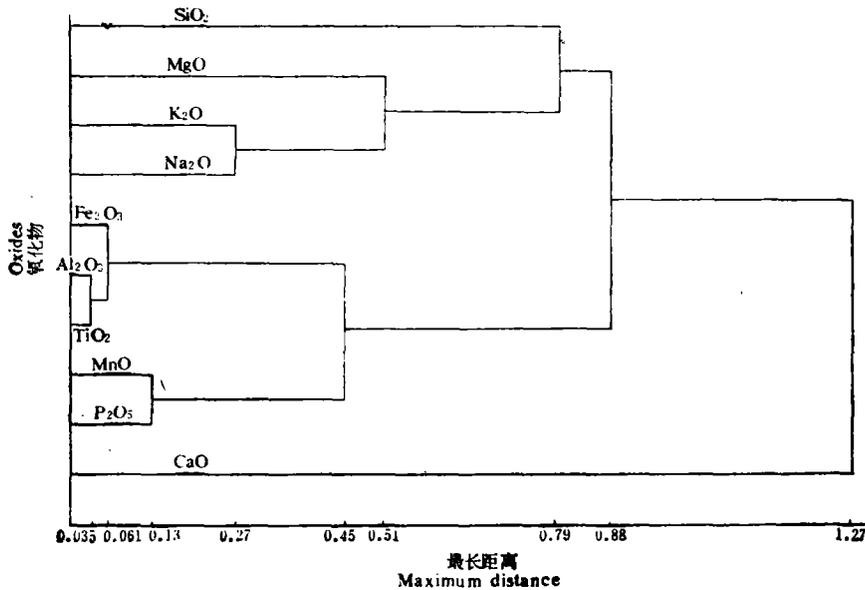


图 1 土壤中 10 个元素地球化学行为的相似性比较

Fig. 1 Resemblance of geochemical behaviour of the 10 elements in soil

五、土壤地球化学类型划分

热带、亚热带土壤地球化学类型划分,已有多篇报道^[4,5,8,11]。他们根据风化壳,或者土

1) 龚子同:我国红色风化壳的生物地球化学,中国红壤。待出版。

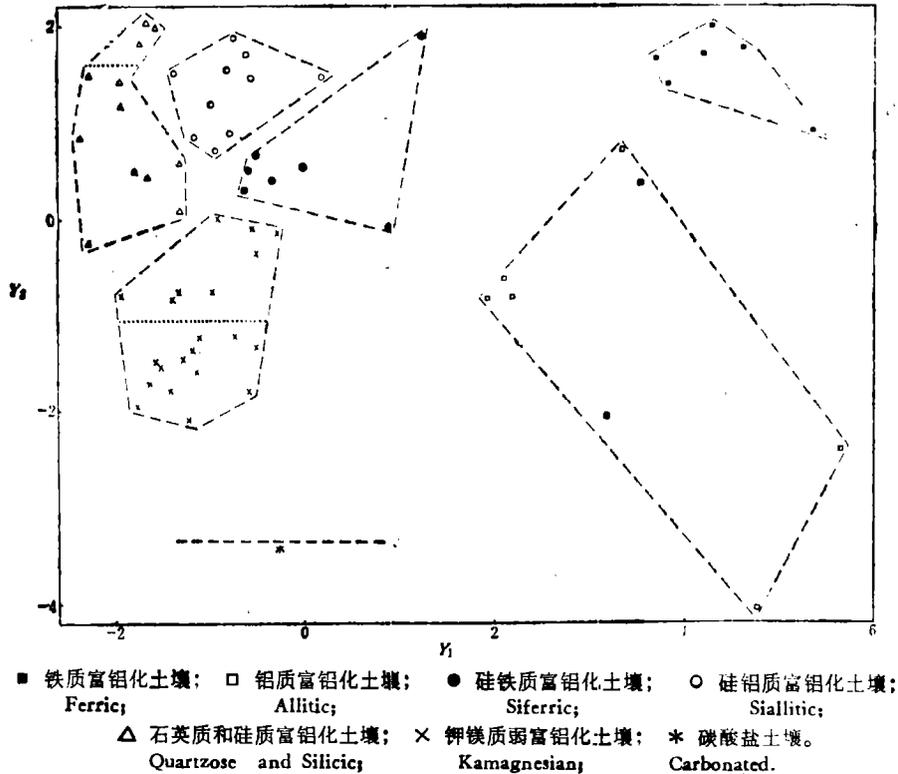
图2 我国热带、亚热带土壤地球化学类型在 Y_1 , Y_2 主组元坐标上的分布

Fig. 2 Distribution of soil geochemical types in tropical and subtropical China on the coordinate of first and second principal components

表5 我国热带、亚热带主要土壤地球化学类型的化学组成
(占灼烧土重%, 1米土层内加权平均)

Table 5 Chemical composition of major soil geochemical types in the tropical and subtropical of China (% by ignited soil, weighted means in soil profile in depth of 1m.)

土壤地球化学类型 Soil geochemical types	剖面数 Number of profile	$\bar{x} \pm s$									
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
铁质富铝化土壤 Ferric	6	35.57± 4.18	23.44± 2.29	36.00± 3.14	0.30± 0.36	0.51± 0.21	3.76± 0.98	0.21± 0.06	0.34± 0.26	0.15± 0.11	0.17± 0.05
铝质富铝化土壤 Allitic	8	46.01± 3.93	15.69± 2.59	30.19± 2.04	2.20± 1.40	1.39± 0.46	2.11± 0.75	0.45± 0.26	0.92± 0.49	0.39± 0.22	0.42± 0.29
硅铁质富铝化土壤 Siferric	7	64.99± 3.88	9.72± 2.06	20.60± 2.69	0.38± 0.14	0.73± 0.34	1.26± 0.45	0.11± 0.08	1.62± 0.67	0.20± 0.12	0.10± 0.05
硅铝质富铝化土壤 Siallitic	10	69.53± 4.10	5.61± 1.59	22.04± 3.48	1.14± 0.13	0.31± 0.19	0.67± 0.29	0.03± 0.04	1.42± 0.81	0.18± 0.11	0.06± 0.02
石英质和硅质富铝化土壤 Quartzose and Silicic	12	82.04± 3.42	3.74± 1.03	11.02± 1.99	0.38± 0.24	0.56± 0.31	0.59± 0.21	0.04± 0.03	1.12± 0.75	0.22± 0.15	0.06± 0.05
钾镁质弱富铝化土壤 Kamagnesian	21	69.71± 3.84	6.45± 1.47	16.67± 2.78	1.33± 1.34	1.45± 0.58	0.77± 0.15	0.10± 0.04	2.64± 0.45	0.56± 0.33	0.10± 0.04
碳酸盐土壤 Carbonated	1	41.52	4.16	10.88	38.92	1.91	0.39	0.09	1.71	0.21	0.23

壤形成的地球化学特点和元素含量多寡的次序区分土壤地球化学类型。这些划分原则和分类系统,为本文用数理统计方法进行物质分类奠定了基础。

用每一土壤剖面的第一和第二主组元 Y_{11} 、 Y_{12} 在以 Y_2 和 Y_1 为纵横坐标的二维平面上点图,得到土壤地球化学类型聚合的分布图(图 2)。65 个土壤按类型分别聚集于七个围线之内而彼此分开。

根据图 2 的分类,将各围线内土壤的每个元素分别进行算术平均值和标准差统计(表 5),其结果是: 1. 同一围线内的土壤地球化学过程十分一致,其化学组成也比较近似; 2. 同一围线内的土壤中各元素的含量顺序基本一致,元素含量的变差系数普遍变小; 3. 不同围线之间的土壤具有各不相同的元素迁移和富集特点,差异特别显著的元素有硅、铝、铁、钛、钾和镁,它们在迁移和富集强度上表现出阶段性。

从图 2 和表 5 可见,铁质、铝质、硅铝质、硅铁质和钾镁质五个土壤类型在富铝化程度上的差异表现为它们分属于脱硅富铝化过程中的三个分段,即强富铝的(Al_2O_3 含量为 $32.68 \pm 3.86\%$)、铁铝的(Al_2O_3 含量为 $21.45 \pm 3.17\%$)和弱富铝的(钾镁质的, Al_2O_3 含量 $16.67 \pm 2.78\%$)。此外,随着铝的富集,铁的含量也有规律地渐次增加。根据铝、铁氧化物百分含量的比值,又可以将强富铝分段中的土壤划分为铁质的(铝铁比为 1.55 ± 0.25)和铝质的(铝铁比为 1.95 ± 0.23)两个类型;将铁铝分段中的土壤划分为硅铁质的(铝铁比为 2.17 ± 0.34)和硅铝质的(铝铁比为 3.81 ± 1.02)两个类型。

六、从主组元 Y_1 和 Y_2 坐标图看土壤地球化学过程的阶段性和连续性

从图 2 所示,七个土壤地球化学类型的围线是按照一定的方向和顺序邻次排列的。自左至右,脱硅富铝化程度逐渐增强;自下而上,易移动元素的迁移强度逐渐增大。不同的土壤地球化学类型,实质上是总的地球化学过程的不同发育阶段。而相邻两个土壤地球化学类型在元素迁移、富集特点上的相互过渡则反映了土壤地球化学过程的连续性。根据前三个主组元所代表的主要地球化学过程,通过图 2 的启示,以及参照已有的资料^[3,6],可以将我国热带、亚热带各土壤地球化学类型之间的关系,用下列简单的图式表示(图 3)。

热带、亚热带土壤由碳酸盐类风化壳和非碳酸盐类风化壳发育而来,在经历了脱钙、脱盐基和脱硅作用后,逐渐发育为高度富铝化的土壤(强富铝化分段)。这一过程的发展在时间上是连续不断进行的;但在空间分布上,由于成土物质的差异性,风化壳矿物组成的不同,使成土过程的发展速度有快有慢,因而在相同生物气候条件下,可以同时存在各个不同发育阶段的土壤。主组元分析的结果,反映了上述客观存在的事实。

图 3 所示各土壤地球化学类型之间的关系,与 B. A. 柯夫达^[12](1973)的分类相比,所谓酸性高岭化土群、酸性富铝-高岭化土群和酸性富铝化土群均应属于脱硅作用阶段的土壤类型。R. Tavernier(1973)^[6]从土壤学观点出发所划分的新成土、雏形土中的一部分,处于脱钙作用阶段,而淀积粘化和氧化土,似乎已从脱盐基作用阶段进入脱硅作用阶段。

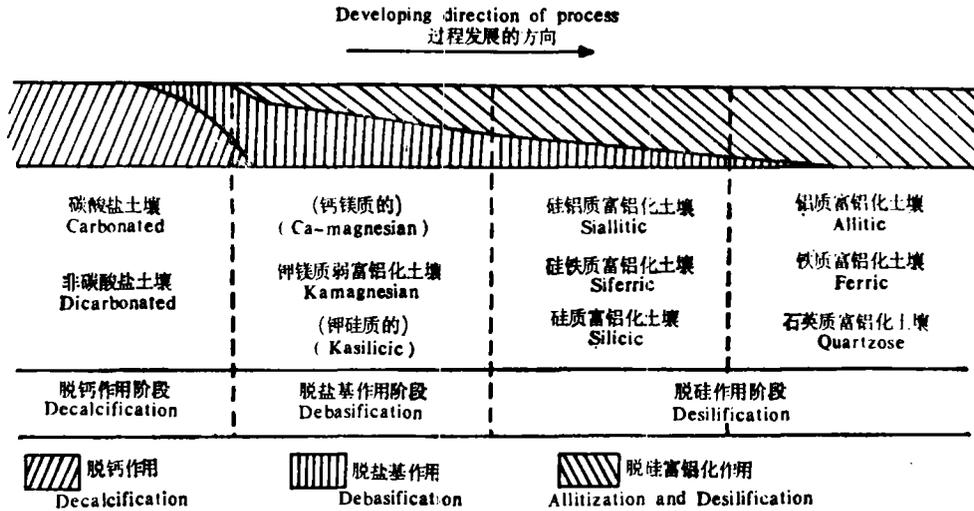


图 3 热带、亚热带土壤地球化学类型关系示意图

Fig. 3 Relationship among different soil geochemical types in tropical and subtropical China

七、对未知土壤地球化学类型的区分

通过对已知类型土壤的主组元分析,可以在此基础上,建立一组计算未知类型的主组元方程。

第一主组元方程为:

$$Y_{i1} = -0.0296X_{i1} + 0.0719X_{i2} + 0.0517X_{i3} + 0.00260X_{i4} \\ - 0.00929X_{i5} + 0.401X_{i6} + 2.09X_{i7} - 0.236X_{i8} \\ - 0.221X_{i9} + 2.09X_{i10} - 0.330;$$

第二主组元方程为:

$$Y_{i2} = -0.00514X_{i1} - 0.0119X_{i2} - 0.0130X_{i3} + 0.0621X_{i4} \\ - 0.879X_{i5} - 0.0993X_{i6} + 1.88X_{i7} + 0.396X_{i8} \\ + 1.75X_{i9} + 2.03X_{i10} - 1.85;$$

式中:

i ——为未知类型剖面编号

X_{i1} —— SiO_2 含量; X_{i2} —— Fe_2O_3 含量;

X_{i3} —— Al_2O_3 含量; X_{i4} —— CaO 含量;

X_{i5} —— MgO 含量; X_{i6} —— TiO_2 含量;

X_{i7} —— MnO 含量; X_{i8} —— K_2O 含量;

X_{i9} —— Na_2O 含量; X_{i10} —— P_2O_5 含量;

将未知类型土壤剖面分析所得的上述 10 个元素氧化物含量结果换算成占灼烧土重的百分数,全剖面(1 米土层内)加权平均后代入方程,便可得到该土壤剖面的第一和第二主组元值。把所得数据作为该剖面的坐标,在图 2 上画出点位。标出的点位如果落在某

一圈线内,即为该围线所代表的土壤地球化学类型;如果点位落在相邻两围线之间,则认为该土壤属于相邻两类型之间的过渡类型。

八、主组元分析对研究土壤地球化学发生、分类的意义

主组元分析中的一项重要工作就是正确地选择指标,科学地赋予前几个主组元以物理意义。

土壤地球化学分类通常以元素迁移积累的阶段性为依据。主组元分析正是采用了土壤中各主要元素的相对含量为指标。从图 2 和表 5 可以看出,用主组元分析方法进行的土壤类型分辨,基本上与龚子同¹⁾对红壤区的土壤地球化学分类相吻合。因此,把主组元分析作为一种手段,用以验证已经进行的土壤地球化学分类,进而建立数学模式,判别未知类型的所属,对于科学的分类逐步走向数值化是有意义的。

然而,土壤是一个复杂的多相分散系,在目前情况下,要完全做到指标选择无误是困难的,所以误判和分辨不清的现象仍然存在。例如文中以 10 个主要元素的化学全量为指标,未涉及各元素的赋存形态,因此对石英质和硅质富铝化土壤来说,虽然两者在风化强度上有明显差异,但就土体全量而言,其 SiO_2 的含量都在同一水平线上,这样就很难区分。同样,对水稻土这一还原系列中的土壤类型,也难以分辨。图 2 中石英质和硅质富铝化土壤的围线中有一条分割这一图斑的虚线,是按照脱盐基作用强度的差异划分的,可以作为区分石英质和硅质土壤的参考,前者在脱盐基作用强度上超过后者。

此外,在钾镁质弱富铝化土壤中,除水稻土外,还包括钾硅质的、钙镁质的土壤。这两个类型都处于弱富铝化阶段,大量易移动元素尚未淋失,镁和钾的地球化学行为又比较相近,因此也难区分,在这一围线中也有一条虚线,表示了它们在脱盐基作用的强度上稍有差异,钾硅质弱富铝化土壤的淋溶强度略大于钙镁质弱富铝化土壤。如果将土壤胶体部分的化学组成和其它有关指标参加统计分析,则可能获得更完善的分辨效果。

参 考 文 献

- [1] 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。
- [2] 刘多森等, 1980: 聚类分析在太湖地区水稻土物质分类上的应用。土壤学报,第 17 卷 4 期,374—381 页。
- [3] 李庆远、张效年, 1957: 中国红壤的化学性质。土壤学报,第 5 卷 1 期,78—96 页。
- [4] 陈志诚等, 1981: 试谈湘北主要土壤地球化学特征(以桃源县为例)。土壤学报,第 18 卷 3 期,290—299 页。
- [5] 陈鸿昭, 1981: 我国红色风化壳与铝土矿的关系。轻金属,12 期,1—5 页。
- [6] 罗汝英, 1980: 江西省低山区杉林土壤障碍性条件的判别分析。土壤学报,第 17 卷 2 期,145—155 页。
- [7] 徐彬彬, 1981: 应用光谱资料对土壤和土地利用进行数值分类。土壤学报,第 18 卷 2 期,176—184 页。
- [8] 龚子同, 1980: 我国境内成土风化壳的地球化学类型。土壤专报,第 37 号,1—23 页。
- [9] 龚子同等, 1983: 华中亚热带土壤。湖南科学技术出版社。
- [10] 杨艳生, 1981: 利用土壤胶体硅、铁、铝含量判定红壤和黄壤的类型归属。土壤,13 卷,1 期,23—29 页。
- [11] 熊国炎, 1980: 两组线性判别分析在土壤分类中的应用——以黑龙江省两类森林土壤为例。土壤,5 期,177—181 页。
- [12] B. A. 柯夫达(陆宝树等译, 1981), 1973: 土壤学原理。下册,286—287 页,科学出版社。

1) 同前面 1)。

- [13] Neil E. Smeck, (曹升庚译), 1975: 磷——土壤发生风化过程的一个指标。土壤农化参考资料, 5 期, 20—25 页。
- [14] Tavernier R. et al., 1973: Basic conception of weathering and soil genesis in the humid Tropics. Proceedings of the Second ASEAN Soil Conference Vol. 1, Published by the Research Institute, Bogor, Indonesia.

THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF SOIL GEOCHEMICAL TYPES IN THE TROPICAL AND SUBTROPICAL CHINA

Wu Zhidong and Gong Zirong

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

Summary

The geochemical behaviour of elements in soils is closely related to their properties and soil development, as well as the bioclimatic condition. And the contents of the elements in soil are also related each other. Ten major elements in soils were used for the principal component analysis in order to group the soils geochemically.

On the basis of the principal component analysis, the soils of the tropical and subtropical China were distinguished in seven types: the ferric, allitic, siferric, siallitic, quartzose-silicic, kamagnesian and the carbonated. The equation of principal component analysis was established for distinguishing soil geochemical type of a unknown soil.

更 正

1983 年第 1 期《中国土壤分布与气候条件的联系》一文, 第 63 页图 1 右下方坐标约为 (27, 3400), (32, 4100), (38, 5800) 的三个点, 均属出版时误加点应删去。