

# 南亚热带地带性森林土壤元素 含量及风化特征\*

欧阳学军 周国逸 黄忠良 张德强 张倩媚

(中科院华南植物研究所鼎湖山森林生态  
系统定位研究站 广东肇庆 526070)

**摘要:** 分析了鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤元素含量及在剖面的分布规律。结果发现: (1) 该土壤具有 K 含量较高而 Zn、Mn、P 及 Ca、Mg 含量较低的特点; (2) Ca、Zn 在土壤中表现富集, Al、Sc、Cu 表现为淋失, Fe 在土壤表层淋失而在底层富集, P、Si 在表层富集而在底层淋失; 其他元素迁移不明显。(3) 土壤的化学风化指数 ( $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ )、 $K_2O/Na_2O$ 、 $K_2O/CaO$ 、 $Al_2O_3/Na_2O$ 、 $Fe_2O_3/SiO_2$ 、硅铝比、退碱系数 ( $(CaO + Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ ) 和硅铝铁率分别为 83、39.8、31.5、207.4、0.2、3.3、0.2 和 2.2, 在剖面间差异不大, 显示该土壤风化过程处于中后期阶段。

**关键词:** 鼎湖山; 土壤; 元素含量; 风化特征

## The Element Concentrations and Weathering Feature of Zonal Soil in South Subtropic Zonal Forest

OU-YANG Xue-Jun ZHOU Guo-Yi HUANG Zhong-Liang  
ZHANG De-Qiang ZHANG Qian-Mei

(Dinghushan Forest Ecosystem Research Station, South China Institute of  
Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangdong, Zhaoqing, 526070, China)

**Abstract:** Element concentrations and their distribution in soil profile of monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan were studied. It indicated that: (1) Compared with other climatic soil types in China, the soil in Dinghushan showed a higher content of element K and lower of Zn, Mn, P, Ca and Mg. (2) In the soil profile, the element transfer had such a tendency that Ca and Zn accumulating, while Al, Sc and Cu leaching, together with a leaching from the soil surface to the lower layers for the element Fe and an accumulation of P and Si at the surface layer, leaching in the lower layers as well. While the other elements changed little with the soil profile. (3) The mean indexes of CIA ( $= [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ ),  $K_2O/Na_2O$ ,  $K_2O/CaO$ ,  $Al_2O_3/Na_2O$ ,  $Fe_2O_3/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $(CaO + Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$  and  $SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$  were 83, 39.8, 31.5, 207.4, 0.2, 3.3, 0.2, 2.2, respectively, which suggested that the soil weathering was in the late metaphase.

**Keyword:** Dinghushan; Soil; Element content; Weathering feature

\* 基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (39899370), 广州地区科学仪器协作公用网管理委员会办公室。此外, 野外工作得到莫定升和张佑昌等, 室内化学分析得到中科院广州地球化学研究所刘颖、胡光黔、曾文、涂湘琳等的帮助, 一并致谢!

土壤是土壤-植被-大气连续系统的重要组成部分。土壤中营养元素的含量反映了土壤营养供给的潜力,并通过化学风化过程不断地提供给植物利用,同时,植物通过生态系统营养物质的内循环影响土壤的风化过程和元素含量。土壤剖面的元素含量分布记录了土壤在植被、气候共同作用下的风化过程。研究森林土壤元素含量及其风化状况,是理解系统生物地球化学特征的基础,有助于探明生态系统存在、发展和维持过程中与地质背景的关系。鼎湖山南亚热带常绿阔叶林是地带性的植被类型<sup>[1]</sup>,研究该森林生态系统土壤的元素含量分布及风化特征,对了解本区域的生物地球化学循环过程和机理具有重要意义。

## 1 供试剖面与分析方法

研究点在鼎湖山自然保护区内,位于广东肇庆东北郊,即东经 112°30'09"~112°33'21",北纬 23°09'21"~23°11'30"。年平均气温 21℃,年降雨量 1929mm,干湿季明显,4~9月为雨季,11月到第二年1月为旱季,属南亚热带季风气候<sup>[2]</sup>。全区分布众多低山和丘陵,岩性主要为泥盆纪砂页岩。森林土壤为赤红壤,pH值在 4.5~5.0之间,腐殖质丰富。赤红壤为南亚热带代表性土壤<sup>[3]</sup>。南亚热带常绿阔叶林为热带亚热带地带性植被。

供试土壤剖面位于鼎湖山南亚热带常绿阔叶林内。该剖面处在山麓平缓地带,土层深厚,发生层次明显,能代表该林土壤的特性。采样按沈承德等<sup>[4]</sup>的取样方式取样,深度延伸到 190cm。

取风干土剔除可见的植物体和碎石,用木棍在木板上初步研磨后四分法取少量土用玛瑙研钵研磨,过 200 目筛。样品先在马福炉中 650℃烧 3h,再测定元素含量。Si、Ca 用碱溶法测。其他元素在 Teflon 密闭溶样器溶样后,用 ICP-AES 测主量元素(表 1),ICP-MS 测微量元素(误差 < 10%) (表 2)。以 GSS-4 和 GSS-5 为标准。整个实验在地化所超净实验室进行。

表 1 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤元素的含量 (g/kg)

Table 1 Major elements concentration in different soil layers in Dinghushan

土壤深度 (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Ti	Si
0~5	79.525	2.101	54.808	27.225	4.202	0.070	0.658	0.307	6.354	285.528
5~10	83.653	1.203	56.462	28.028	4.360	0.065	0.656	0.288	6.563	288.384
10~15	87.146	1.008	56.623	28.708	4.260	0.144	0.630	0.269	6.335	289.468
15~20	87.046	0.976	54.522	27.334	4.211	0.081	0.624	0.250	6.295	291.404
20~25	88.930	0.885	56.844	27.797	4.296	0.069	0.609	0.240	6.461	292.549
25~30	91.587	0.836	58.456	28.383	4.315	0.182	0.624	0.195	6.635	291.095
30~35	94.561	0.697	64.108	29.820	4.556	0.070	0.653	0.219	6.954	280.073
35~40	97.250	0.857	63.539	29.050	4.562	0.077	0.627	0.217	6.932	275.913
40~50	100.612	0.889	65.442	28.438	4.670	0.081	0.862	0.231	7.059	274.861
50~60	101.846	0.829	67.732	29.086	4.786	0.114	0.672	0.202	7.002	271.832
60~70	101.021	0.813	67.905	30.135	4.685	0.098	0.646	0.222	6.929	271.846
70~80	100.944	0.504	65.161	27.661	3.099	0.094	0.643	0.219	6.741	270.205
80~100	102.997	0.543	66.363	27.939	3.770	0.103	0.632	0.230	6.523	270.238
100~120	101.182	0.913	66.998	30.746	4.670	0.131	0.642	0.238	6.741	270.799
120~140	103.813	0.892	72.678	33.521	4.857	0.107	0.662	0.253	6.847	268.967
140~160	109.116	0.730	71.475	28.608	3.155	0.085	0.691	0.250	7.125	267.635
160~180	101.611	0.577	66.578	31.399	4.409	0.108	0.631	0.246	6.652	272.416

土壤深度 (cm)	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Ti	Si
180~190	104.442	0.582	62.738	28.317	1.771	0.066	0.628	0.236	6.508	274.941
平均	96.516	0.880	63.246	29.011	4.146	0.097	0.655	0.240	6.703	278.231
热带砖 表层	115.419	4.931	4.931	1.743	1.779	1.540	1.781	1.004	17.146	158.229
红壤* 底层	136.534	1.001	124.641	1.577	1.245	1.177	0.668	0.872	15.827	318.413
中亚热带 表层	93.933	2.287	30.004	21.500	4.922	0.220	2.077	0.393	3.777	270.312
红壤* 底层	109.862	0.715	47.259	18.096	4.804	0.147	4.822	0.305	5.096	282.606
世界土壤*	71.300	13.700	38.000	13.600	6.300	0.850	6.300	0.800	4.600	330.000

\*引自夏增禄等<sup>[5]</sup>;表2同。

表2 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤微量元素含量 ( $10^{-6}g/g$ )

Table 2 Trace elements concentration in different soil layers in Dinghushan

土壤深度 (cm)	Cu	Zn	Ni	Nd	Pb	Th	Zr	Nb	La	Y	Sr	Ba	Cr	Rb
0~5	17.6	29.8	10.8	26.2	18, 4	20.4	262.3	16.6	31.9	28.7	22.4	435.1	91.8	133.3
5~10	10.5	24.4	11.4	25.2	14.8	21.1	246.8	17.0	31.3	29.1	22.7	444.3	94.0	133.9
10~15	10.6	19.3	11.9	26.9	13.7	21.8	280.1	17.2	32.9	29.5	22.2	475.7	95.0	136.3
15~20	11.2	23.1	11.5	26.3	13.2	21.6	250.3	17.1	32.3	29.2	22.5	454.2	94.3	136.5
20~25	10.4	17.2	10.9	23.2	11.7	20.3	271.0	16.8	30.0	29.0	22.0	439.1	93.1	137.6
25~30	11.5	30.5	12.4	24.8	13.1	22.5	262.5	18.6	30.8	28.2	24.2	479.9	102.0	148.5
30~35	12.2	42.5	14.7	23.8	11.2	22.8	245.8	18.0	29.0	28.4	24.3	487.2	105.9	152.6
35~40	13.1	32.2	13.1	23.8	12.1	22.9	268.4	19.0	29.4	28.3	25.0	494.3	107.6	157.4
40~50	16.4	28.3	14.1	18.9	12.8	21.0	205.0	16.8	23.4	24.8	24.3	458.0	100.8	147.8
50~60	17.8	26.9	16.3	24.1	12.7	23.9	247.9	19.2	30.4	29.6	25.4	498.0	111.6	158.5
60~70	15.6	27.8	14.8	22.6	13.3	23.7	204.7	18.7	28.5	26.6	25.9	497.1	109.6	158.6
70~80	16.0	28.0	14.3	18.8	12.6	20.6	242.5	18.2	23.2	22.3	23.1	474.6	110.3	142.9
80~100	18.9	27.4	15.8	23.2	14.5	24.1	252.4	19.9	27.9	26.5	26.7	534.0	115.1	159.0
100~120	19.2	29.2	15.4	23.5	13.6	23.9	227.6	18.3	29.1	27.4	24.8	516.2	106.2	153.8
120~140	18.6	23.7	18.9	23.4	12.6	23.8	235.0	17.3	29.2	27.6	22.4	541.7	108.3	151.0
140~160	22.8	22.0	18.0	12.5	10.0	16.4	310.8	21.5	16.0	18.9	16.2	398.7	127.4	128.3
160~180	19.3	17.2	15.2	19.7	11.3	22.6	268.6	17.2	25.1	29.8	22.0	502.8	102.6	140.4
180~190	21.6	16.2	14.6	21.1	11.8	24.2	260.7	18.0	26.0	27.3	22.2	524.5	108.8	144.5
平均	15.7	25.9	14.1	22.7	13.0	22.1	252.4	18.1	28.1	27.3	23.2	480.9	104.7	145.6
热带砖 表层	98	128	144	—	13.3	—	274	57	25	35	52	198	—	—
红壤 底层	102	118	147	—	10.2	—	279	47	32	42	26	263	—	—
中亚热 表层	19	62	32	—	49.3	—	229	20	39	20	48	474	—	—
带红壤 底层	29	79	47	—	53.1	—	258	27	56	28	46	458	—	—
世界土壤	20	50	40	—	10	—	300	—	—	—	300	500	—	—

## 2 结果与分析

### 2.1 主要元素的组成和排序

表1,表2是鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤不同层次元素含量分析结果。从土壤表层与底层比较,绝大多数元素表层低于底层,未见表层异常高含量元素出现,说明所取剖

面土壤未受到人为污染,属自然含量范围。

与中亚热带湖南衡山花岗岩上的红壤、热带广东海康玄武岩上的砖红壤及世界土壤<sup>[5]</sup>比较发现,本土壤 Al、Si、Ca 和微量元素 Ba 及稀土元素含量与红壤比较接近,Fe、Ti、K 含量比红壤高,而 Na、Mg、Mn、P、Zn、Sr、Pb、Cu 等含量要低于红壤;比热带砖红壤表层 Fe、Si 含量高,而底层则含量低,本土壤 K、Mg、Ba 含量比热带砖红壤高,而其他元素都低;除 Al、K、Ti 含量比世界土壤高外,而其他元素都低于世界土壤。

元素含量的差异是由区域自然地理带的差异、土壤类型的不同以及非地域性因素如母质不同等引起的<sup>[5]</sup>。本土壤比热带砖红壤表层 Fe、Si 含量高,而底层则含量低,说明本土壤表层 Fe、Si 淋溶不如热带土壤强烈,风化作用程度弱于热带土壤,反映了区域自然地理带的差异;本土壤 Al、Si、Ca 和微量元素 Ba 及稀土元素含量与红壤比较接近,又反映了土壤类型的近似。由于中亚热带的湖南和热带广东海康与本地区处在临近的自然地理带上,因此,非地域性因素如母质的差异可能是造成本壤与中亚热带红壤和热带砖红壤众多元素含量差异的主要原因。

本土壤元素的排列顺序为: Si>Al>Fe>K>Ti>Mg>Ca>Na>Ba>Zr>P>Rb>Cr>V>Mn>Ce>La>Y>Zn>Nd>Th>Sr>Ga>Nb>Cu>Ni>Pb>, 与前人测定的结果一致<sup>[6]</sup>。与临近地域的中亚热带红壤和热带砖红壤的元素含量排序也基本相似<sup>[5]</sup>,但本土壤中 K、Mg、Ba 的位置比较靠前, Ca、Na、Sr 比较靠后,这与母质差异造成元素含量差异基本是一致。

总体来讲,鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤具有 K 含量较高而 Zn、Mn、P 含量较低的特点。与中国其它地带的土壤<sup>[5]</sup>比较,还表现 Ca、Mg 含量低的特点。这主要是由砂岩和砂页岩母质特性决定的。

## 2.2 森林土壤元素的迁移

土壤风化的过程是元素在剖面迁移的过程。元素绝对含量的变化并不能真实的反映风化过程元素的地球化学行为,因为在化学风化过程中,活动性元素的淋失或剖面体积缩小会直接造成样品中稳定性元素的浓度增加(残留富集),从而掩盖了这一过程中元素迁移或富集的真实面目。为了消除这种影响,目前多用相对某一稳定元素如  $T_i$ <sup>[7]</sup> 等的变化率来反映元素在风化过程中的化学行为。元素的变化率为:

$$\Delta(\%) = 100 \times [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \quad (1)$$

式中  $X_s$ 、 $I_s$  代表样品中元素 X 和稳定参照元素的含量;  $X_p$ 、 $I_p$  为上述元素在原始母质中的含量。显然,当  $\Delta < 0$  时,反映元素 X 相对于稳定参照元素迁出;若  $\Delta > 0$ ,反映元素 X 相对富集。本文以  $T_i$  为稳定参照元素,以最下层土壤层为母质,计算各层中元素的含量变化率百分数。

计算结果表明(图 1),鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤各层主要元素含量的变化率以元素的不同而表现出不同的变化。生命大量元素 Ca 在整个土壤剖面显著的  $> 0$ , 表现为极大的富集; Al 在整个剖面  $< 0$ , 在表层远离 0, 在下层接近 0, 表明 Al 在土壤剖面由下往上迁出增加; Fe 元素在土壤表层  $< 0$ , 而 Fe 在下层  $> 0$ , 表现为在表层迁出, 在下层富集。Si 和 P 在表层富集, 在下层迁出。K、Mg 和 Na 在整个剖面接近 0, 说明元素迁移不明显。微量元素(图 2)和稀土元素(图 3)剖面平均含量的迁移变化率计算显示, Zn、Pb 富集明显, Cu、Sc 有迁出, 其它元素基本沿着 0 波动。

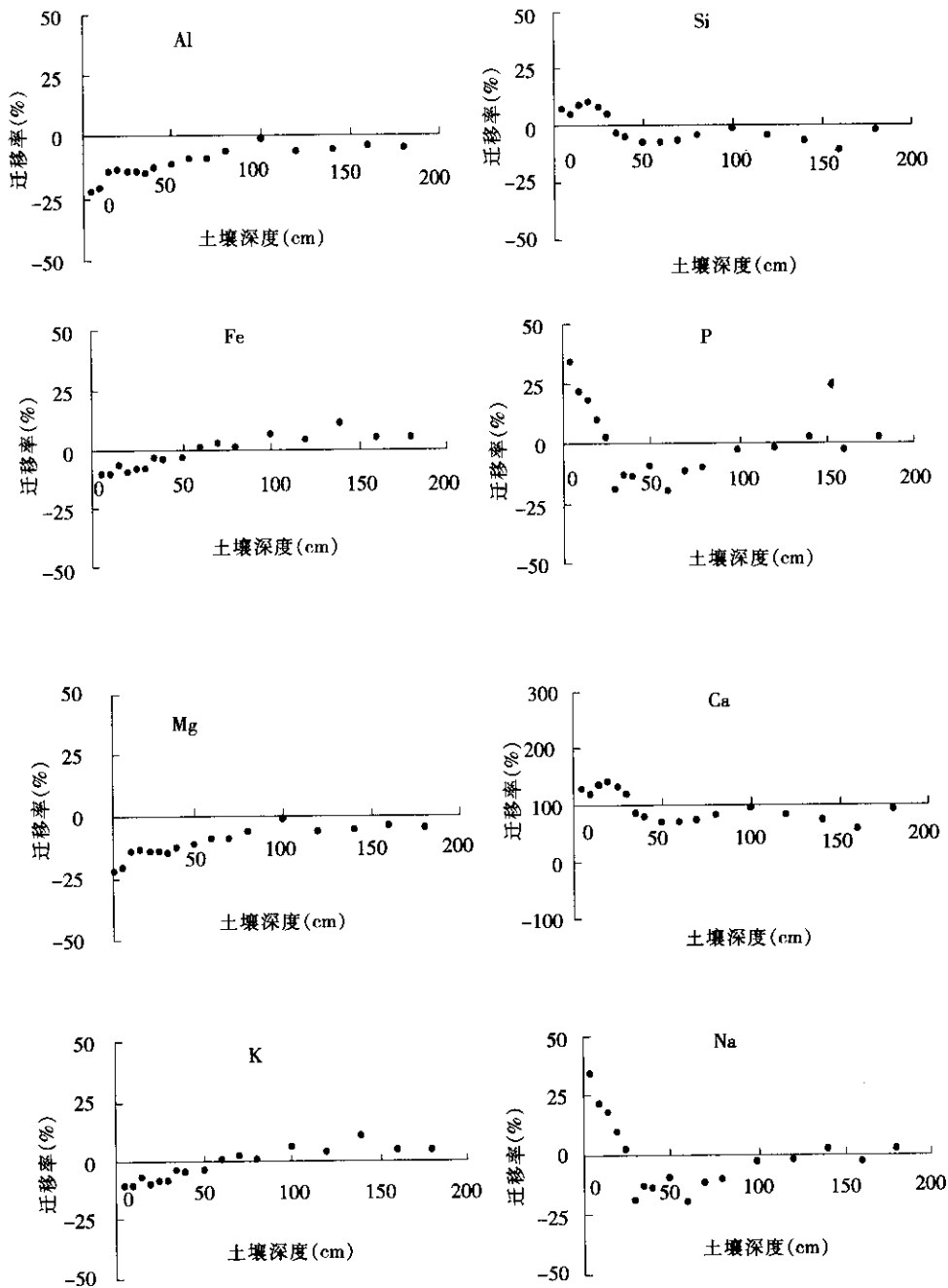


图 1 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤主要元素含量变化率 (%) 随深度 (cm) 的分布  
 Fig. 1 Major element concentration change rate in different soil layers in Dinghushan

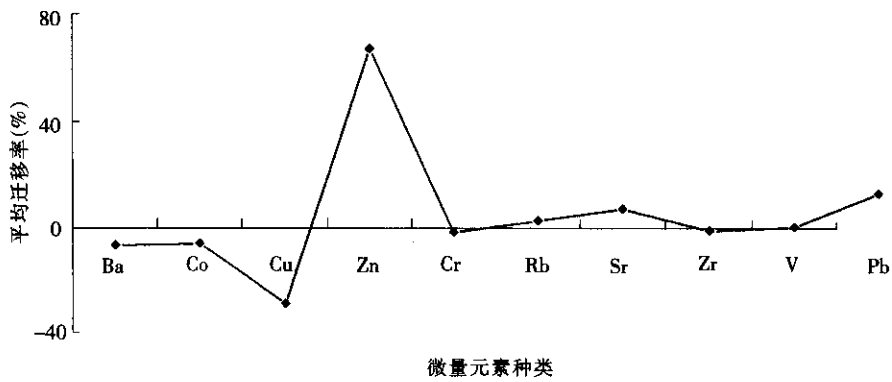


图2 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤剖面微量元素平均含量变化率

Fig.2 Trace element average change rate in different soil layers in Dinghushan

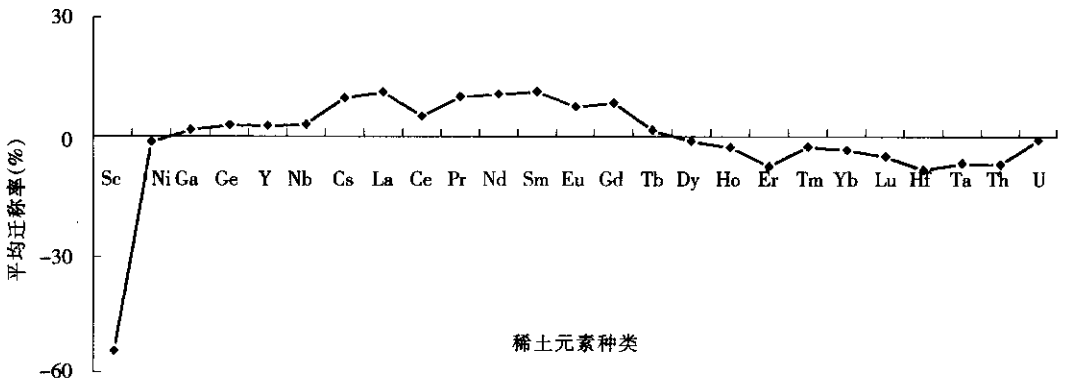


图3 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤剖面稀土元素平均含量变化率

Fig.3 REE average change rate in different soil layers in Dinghushan

由于Ca、Sr、Na、Mg是易迁移元素，在多雨的南亚热带地区，它们已被强烈淋溶，其含量也比其他土壤低，因此，Ca在森林土壤表层的富集说明该元素生物富集效应明显。生物富集也使Si和P在表层富集，因为有机质含量在表层森林土壤最大，随着深度的增加快速递降<sup>[4]</sup>，变化趋势与元素的迁移变化百分率相似。只有Al表现出随风化作用的增强（由土壤下层往上层）淋失率增大的特点，这可能与近年来酸沉降有关。另外，参照样的取样深度可能影响了某些元素迁移性的分析，如Sr、Na、Mg、K等。本次取样的最大深度在1.90m，并没有达到岩基，只达到土壤母质的底层，而本地区的风化作用使这些元素在这样的层次中达到了均一。

以上说明，在较小的土壤空间内，元素的迁移并不十分显著，而森林对元素的富集作用得到了体现。

### 2.3 化学风化程度判别

化学风化程度是影响剖面中的矿物成分、主要和微量元素含量和分布的关键因素<sup>[8]</sup>。在地球化学研究中, 根据元素的活动性顺序将风化过程分成早期去 Ca、Na 阶段, 中期去 K 阶段和晚期去 Si 阶段<sup>[9]</sup>。化学风化时, 碱金属和碱土金属元素容易迁移淋失, 而 Al、Ti 等元素相对稳定而富集, 根据元素含量及相关参数如化学风化指数 (CIA) 及一些氧化物之比, 如:  $K_2O/Na_2O$ 、 $K_2O/CaO$ 、 $Al_2O_3/Na_2O$ 、 $Fe_2O_3/SiO_2$ 、硅铝比、硅铝铁率及  $(CaO + Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$  等能很好反映风化壳化学风化情况, 常用来描述化学风化作用强度<sup>[10~13]</sup>。由表生环境中元素的地球化学行为可知, 化学风化越强, 前五个指标值越大, 后三个指标的值越小。计算土壤剖面风化指标如表 3。

表 3 土壤剖面各层化学风化指标

Table 3 Values of evaluating index of soil chemistry weathering

土壤深度 (cm)	CIA	$K_2O/Na_2O$	$K_2O/CaO$	$Al_2O_3/Na_2O$	$Fe_2O_3/SiO_2$	硅铝比	退碱系数	硅铝铁率
0~5	80.4	37.0	11.2	169.5	0.1	4.1	0.2	2.7
5~10	81.3	38.2	20.1	178.7	0.1	3.9	0.2	2.6
10~15	81.7	40.7	24.5	194.0	0.1	3.8	0.2	2.5
15~20	82.4	39.2	24.1	195.6	0.1	3.8	0.2	2.6
20~25	82.5	40.8	27.0	204.7	0.1	3.7	0.2	2.5
25~30	82.7	40.7	29.2	205.8	0.1	3.6	0.2	2.4
30~35	82.5	40.8	36.9	203.0	0.2	3.4	0.2	2.2
35~40	83.2	41.4	29.2	217.2	0.2	3.2	0.2	2.1
40~50	83.8	29.5	27.5	163.7	0.2	3.1	0.2	2.1
50~60	83.8	38.7	30.2	212.4	0.2	3.0	0.2	2.0
60~70	83.3	41.7	31.9	219.2	0.2	3.0	0.2	2.0
70~80	84.5	38.4	47.2	220.0	0.2	3.0	0.2	2.0
80~100	84.7	39.5	44.3	228.5	0.2	3.0	0.2	2.0
100~120	83.0	42.8	29.0	221.0	0.2	3.0	0.2	2.0
120~140	82.2	45.3	32.4	219.9	0.2	2.9	0.2	1.9
140~160	85.0	37.0	33.7	221.2	0.2	2.8	0.2	1.9
160~180	82.9	44.5	46.9	225.8	0.2	3.0	0.2	2.0
180~190	84.7	40.3	41.9	233.0	0.2	3.0	0.2	2.0
平均	83.0	39.8	31.5	207.4	0.2	3.3	0.2	2.2

退碱系数为  $CaO + Na_2O + K_2O / Al_2O_3$ ,  $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ 。

由表 3 看出, 除  $K_2O/CaO$  外, 其它各指标在剖面变化不明显。说明在较小的深度范围内, 土壤风化程度差异不明显。但从较小的差异中会发现, 土壤从表层往下层, 土壤的风化强度在增强, 下层土壤比上层土壤风化程度高。这虽然在有些地区有这种情况<sup>[14]</sup>, 但本土壤并不反映这种情况, 因为没有考虑外源物质对土壤剖面的影响。本土壤中生物富集作用极大的改变了森林土壤元素在剖面的分布, 干扰了对风化程度的判断, 如 Ca 在表层的生物富集, 造成  $K_2O/CaO$  在剖面变异较大。

化学风化程度不同, 形成的矿物也不同, 因此 CIA 值也不一样。未风化的长石的 CIA 值为 50, 伊利石和蒙脱石为 75~85, 高岭石和绿泥石接近 100<sup>[10]</sup>。考虑到外源物质 (生物富集) 对风化程度判断的影响, 我们选用土壤下层 140~190cm 的计算结果作为本森林土壤的风化程度指标。本土壤底层的 CIA 值约为 84, 说明风化形成的粘土矿物主要为伊利石和蒙脱石。

土壤底层 ( $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ )、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的平均含量约为 0.095%、3.5% 和 19.5%，在  $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$  三角图<sup>[15]</sup>上的投点在伊利石-蒙脱石基线以下和斜长石-钾长石以上，接近伊利石-蒙脱石基线，根据 Na、K 在剖面相对于参照元素基本不变，Al 随深度增加而增加，Ca、Na 含量低判断，本土壤脱 Ca、Na 过程显著，脱 K 不明显。风化产物以伊利石和蒙脱石为主，尚未达到以高岭石和三水铝石为主，说明本土壤化学风化过程可能已处于中后期阶段。未来的化学风化趋势将是脱 K、去 Si 富 Al 的过程<sup>[15]</sup>。

### 3 小结与讨论

鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤具有 K 含量较高而 Zn、Mn、P 含量较低的特点。这主要是由砂岩和砂页岩母质特性决定的。在较小的土壤空间内比较，多数元素的迁移性并不十分显著，而森林对元素的富集作用得到了体现。风化产物以伊利石和蒙脱石为主，尚未达到以高岭石和三水铝石为主，初步判断本土壤处于风化的中后期阶段，未来的化学风化过程将是脱 K、去 Si 富 Al 为主。

土壤中的元素含量反映了土壤营养供应潜在能力。植物体中的营养元素含量是一定条件下植物与环境（土壤、大气等）相互作用的结果。鼎湖山南亚热带常绿阔叶林土壤 K 含量较高，Mg、P 含量较低，也体现在植物体的含量上，这或许可以解释为什么鼎湖山植物叶片中 K 含量高于我国各气候带平均水平，而 P 显著低于各气候带平均水平<sup>[16,17]</sup>。本土壤 Ca 含量比各气候带土壤都低，而植物叶中的 Ca 含量与各气候带总平均相似<sup>[16]</sup>，这可能与本土壤的生物对 Ca 的积累有关。本土壤 Mn 和 Zn 的不足也可能是影响鼎湖山植物叶片营养元素含量平衡关系的重要因素<sup>[16]</sup>。植物生命元素大多在土壤表层的富集，说明了植物在植被-土壤系统中的营养维持机制。

### 参 考 文 献

- [1] Kong G.H., Liang C., Wu H.M., *et al.* Dinghushan Biosphere Reserve—Ecological Research History and Perspective. Beijing, New York: Science Press, 1993, 3~7
- [2] 黄展帆, 范征广. 鼎湖山的气候. 热带亚热带森林生态系统研究, 1982, (1): 11~16
- [3] 李庆远主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社. 1983, 1~24
- [4] 沈承德, 刘东生, 彭少麟等. 鼎湖山自然保护区森林土壤<sup>14</sup>C 测定及<sup>14</sup>C 示踪初步研究. 科学通报, 1998, 43 (16): 1775~1780
- [5] 夏增禄, 穆从如, 李森照等. 中国若干土壤类型剖面中元素的自然含量特征及其相互关系. 中国科学 (B 辑), 1985, 7: 658~667
- [6] 何宜庚. 广东省鼎湖山自然保护区的土壤. 华南师范大学学报 (自然科学版), 1983, (1): 87~96
- [7] Nesbitt H. W. . Mobility and fractionation of rare earth element during weathering of a granodiorite. Nature, 1979, 279: 206~210
- [8] 马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例. 科学通报, 1999, 44 (22): 2433~2437
- [9] Nesbitt H. W., Markovics G., Price R. C. . Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44: 1659~1666
- [10] Nesbitt H.W., and Young G.M., Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite. Nature, 1982, 299: 715~717



- [11] 龚子同. 红色风化壳的生物地球化学. 李庆远. 中国红壤. 北京, 科学出版社, 1983, 24~40
- [12] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿等. 中国南方红色风化壳. 北京, 海洋出版社, 1996.38~304
- [13] 刘本立. 地球化学基础. 北京, 北京大学出版社, 1994, P113
- [14] 王玉贵, 赵济. 东南极拉斯曼丘陵斯托尼斯半岛地区化学元素分布特征. 极地研究, 1997, 9 (4): 273~282
- [15] 杨守业, 李从先, 李徐生等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究. 地球化学, 2001, 30 (4): 402~406
- [16] 莫江明, 张德强, 黄忠良等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究. 热带亚热带植物学报, 2000, 8 (3): 198~206
- [17] 林植芳, 李双顺, 孙谷畴等. 鼎湖山南亚热带地区植物的叶片矿质元素. 生态学报, 1989, 9 (4): 320~324