

# 南极半岛海洋气候区的土壤 矿物学特性

陈 杰 龚子同

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008)

**摘 要** 南极海洋气候区岩石风化和土壤形成过程中有明显的原生矿物蚀变作用和自生矿物成矿作用。本文以粗骨寒冻灰化土和石灰性扰动冻土两种有代表性的土壤类型为例,阐述了本区土壤矿物学特征。指出铝氧化物、绿泥石、碳酸盐是本区玄武岩类风化物质上发育土壤中的主要自生矿物类型,蒙脱石、特别是绿泥-蒙脱石混层矿物是南极海洋气候区土壤粘粒部分的特征矿物。不同土壤由于成土环境、成土过程、成土历史的差异,其土壤物质的矿物学组成、含量、形态、分布具有明显不同。土壤发生性铁氧化物与成土作用和土壤过程密切相关,其矿物类型、含量、形态特征、分布模式在不同的土壤中明显不同,是表征土壤发育程度与剖面形态表达的有效指标。

**关键词** 南极; 风化作用; 土壤矿物学; 粘土矿物; 铁铝氧化物

**中图分类号** S153

化学风化与成土作用的强度和速率随与赤道地区的距离增大而逐渐下降,在南、北方向上的高纬度地区,特别是南极地区,以岩石崩解和风化物重新分配为主要形式的物理风化过程主导风化作用,成土作用相对微弱,土壤发生、发育程度较低,土壤在物质组成上与母质、母岩关系紧密,表现出高度相似的矿物学特征。南极土壤的矿物学研究相当薄弱,不仅表现在已有的土壤矿物学数据少而凌乱,而且尚未在土壤矿物的形成与转化与土壤发育过程之间建立起系统的发生学联系。

南极海洋气候区相对较高的气温、较为丰沛的自由水分以及生物活动的参与,导致土壤形成与发育过程与南极其他地区有明显差别,表现出与北极地区更为相似的特点。本区以寒冻风化(frost weathering)和冻-融作用(freeze-thaw action)为主要形式的冰缘地貌过程强烈,地表高度不稳定,土壤扰动剧烈,剖面形态发育微弱,据此有学者认为,本区土壤中的化学风化作用微弱,土壤物质与其母质、母岩相比,风化程度不应存在明显差异<sup>[1-3]</sup>。另一方面,由于本区土壤各种形式的冻扰现象(cryoturbation phenomena)导致剖面内部土壤物质高度的异源性和不均质性(heterogeneousness),给

土壤矿物来源鉴别以及形成与转化方面的研究造成极大困难。鉴于以上原因,尽管南极海洋气候区的土壤研究比南极其他地区较为深入,但本区土壤的矿物学研究却一直未能取得较大进展。

## 1 主要土壤类型的矿物学特征

土壤矿物的蚀变、溶解过程以及新的成矿作用开始于岩石和地表风化壳的化学风化作用。在南极海洋气候区,化学风化作用导致的岩石沾色(staining)现象相当普遍。通过对玄武岩表面铁锈状膜(rust-color coating)扫描电镜观察和电子探针分析,证实由铁锰矿物风化产物无定形的铁锰氧化物与二氧化硅构成<sup>[4]</sup>。大量证据表明,以石生地衣为主的低等植物参与了岩石的风化作用。由地衣诱发的玄武岩类岩石生物-化学风化大多数情况下以原生矿物中Fe、Mg的移动与Ca、Al的释放,以及含水氧化铁胶膜和无定形物质的形成为特征<sup>[5-7]</sup>。地衣生物风化作用下,这些岩石表层中的原生矿物严重的溶蚀,尤其是其中的FeMg矿物(ferromagnesian minerals)及富Ca的斜长石(plagioclase);原来存在于新鲜玄武岩中的含Fe粘土矿物(ferruginous clays)部分甚至完全消失,游离态凝胶状的二氧化

硅在地衣-岩石交互作用层形成。而无定形的 3 价铁含水氧化物胶膜在岩石表面的出现，使生物风化层表现出明显区别于岩石内部的外观颜色，表明矿物释放出的 Fe 离子在沉淀成氧化物之前发生了迁移<sup>[8]</sup>（图 1）。而花岗岩等酸性岩石表面则较多地产生类似结壳的表层，分析表明，某些花岗岩风化碎屑表

层的化学成分发生显著变化，易风化的绿泥石、角闪石等矿物已经完全分解消失，在不易风化的长石颗粒表面，可发现次生氧化铁和粘土矿物形成的薄膜。

在南极海洋气候区，岩石风化阶段一般难以产生新成的结晶矿物。但也有在地衣-岩石交互作用层

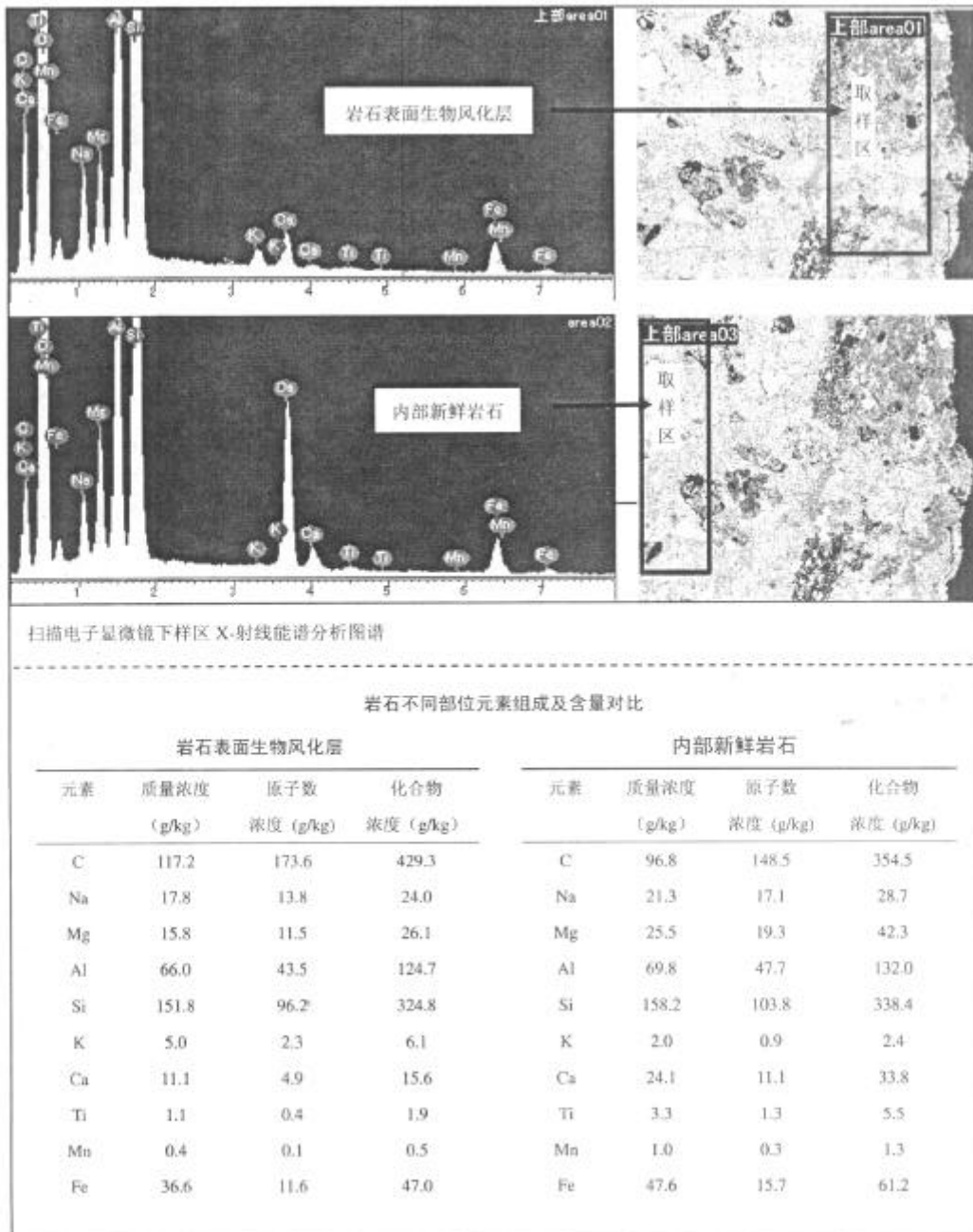


图 1 岩石生物风化层与原岩元素构成及含量比较（安山岩）

Fig. 1 Comparison between surface bio-weathering zone of the rock and its fresh interior in chemical composition and element content (andesite)

内发现新成二水草酸钙 ( weddellite ) 和方解石的研究报道<sup>[9]</sup>。化学风化作用下发生蚀变的原生矿物以及新成矿物随风化碎屑进入土壤, 在成土过程中遭受进一步的风化作用。由于不同土壤母质、母岩类型不同、土壤年龄与成土过程各异, 其矿物学特性

存在很大差异。本文以南极海洋气候区有代表性的两种土壤类型粗骨寒冻灰化土 ( skeleti-gelic podzol ) 和石灰性扰动冻土 ( calcari-turbic cryosol ) 为例, 论述本区土壤矿物的基本组成特点和可能发生、演变过程。

表 1 乔治王岛发育在玄武岩冰碛沉积上火山灰相粗骨寒冻灰化土矿学组成<sup>[10]</sup>

Table 1 Mineralogy of a skeleti-gelic podzol with andic phase on moraine of basalt on King George Island, the maritime Antarctic

层次	深度 (cm)	矿物含量 ( 粒径 20 ~ 630 μm 土壤物质, g/kg )							
		火山玻璃	橄榄石	蛇纹石	绿泥石	云母	辉石	强风化矿物	中长石
Ah	0 ~ 2	16.0	68.0	20.0	12.0	44.0	60.0	368.0	20.0
Bhs	15 ~ 18	17.0	14.0	24.0	3.0	17.0	79.0	96.0	116.0
CBw	25 ~ 34	0	0	23.0	0	0	53.0	57.0	197.0
		斜长石	碱长石	风化长石	沸石	石髓	不透明矿物	其他矿物	岩砾
Ah		68.0	56.0	92.0	4.0	32.0	20.0	16.0	108.0
Bhs		17.0	27.0	89.0	2.0	38.0	41.0	3.0	416.0
CBw		10.0	17.0	53.0	37.0	7.0	13.0	3.0	502.0

表 2 乔治王岛发育在石质冰碛沉积的石灰性扰动冻土矿学组成<sup>[10]</sup>

Table 2 Mineralogy of a calcari-turbic cryosol on vegetation-free stony moraine on King George Island, the maritime Antarctic

层次	深度 (cm)	矿物含量 ( 粒径 20 ~ 630 μm 土壤物质, g/kg )							
		火山玻璃	橄榄石	蛇纹石	绿泥石	云母	辉石	强风化矿物	中长石
Aw	0 ~ 4	3.0	0	47.0	0	0	54.0	156.0	224.0
Cw2	10 ~ 30	0	3.0	20.0	0	27.0	52.0	251.0	167.0
Cw4	50 ~ 80	7.0	7.0	13.0	7.0	6.0	53.0	290.0	120.0
		斜长石	碱长石	风化长石	沸石	石髓	不透明矿物	其他矿物	岩砾
Aw		108.0	20.0	43.0	44.0	3.0	17.0	11.0	256.0
Cw2		65.0	17.0	100.0	24.0	7.0	3.0	0	214.0
Cw4		124.0	10.0	120.0	27.0	0	23.0	21.3	171.0

表 1 和 2 中的两种土壤形成于不同的母质类型, 粗骨寒冻灰化土的母质为基岩残积风化物, 石灰性扰动冻土的母质为冰碛沉积, 但都以拉斑玄武岩 ( tholeiite ) 为母岩基础, 因此, 两种土壤的矿物组成具有比较明显的相似性。在粗骨寒冻灰化土剖面中, 土壤物质含有大量强烈风化矿物, 其中的原生矿物已难以识别, 表明强酸性土壤环境下, 自由水参与的化学风化作用相当活跃。土壤物质中长石、云母以及辉石等矿物均表现出强烈的蚀变特征, 土壤发生性 Fe、Al 氧化物 ( pedogenic Fe-、Al-oxides ) 大量出现。从土壤发生层次上看, 原生矿物的风化程度以及新成矿物含量在剖面中有明显的垂直分异特征。譬如, 表层土壤中中等风化强度以上的长石、云母、辉石等原生矿物含量以及强烈风化矿物含量均高于下层土壤。值得注意的是, 表层土壤中含有

火山玻璃与相对易于风化的橄榄石, 表明该土壤受火山灰覆盖的影响。火山玻璃从其形态特征上看, 其风化程度不高。值得注意的是, 表层土壤发现了绿泥石, 它是风化与成土过程中由火山玻璃和角闪石转化而来的自生矿物, 因此可以初步推断寒冻灰化土中火山灰物质遭受了一定程度的风化作用。与粗骨寒冻灰化土相比, 石灰性扰动冻土剖面土壤物质中强烈风化矿物含量明显较低, 表层土壤中长石、云母的风化程度很低, 而中等风化程度以上的辉石几乎没有, 但剖面中亦有相当数量的土壤发生性 Fe、Al 氧化物形成。与粗骨寒冻灰化土一样, 土壤有火山灰物质侵入, 但上部土壤没有绿泥石矿物形成。显然, 石灰性扰动冻土的化学风化程度弱于粗骨寒冻灰化土, 这主要因为前者冻-融作用强烈、冻扰过程导致剖面内部土壤物质翻卷、移动明显、土壤物

质缺乏稳定的风化环境。这可以从石灰性扰动冻土风化蚀变矿物和自生矿物含量在剖面明显没有垂直分异的特点上得到证实。

自生粘土矿物 ( authigenic clay minerals ) 是岩石和土壤化学风化作用的产物, 其矿物构成与含量是化学风化作用强弱的重要指标。表 3 中的数据 displays, 粗骨寒冻灰化土和石灰性扰动冻土两种土壤中粘粒部分的结晶矿物构成以绿泥石和蒙脱石为主。从含量上看, 粗骨寒冻灰化土粘粒中绿泥石和蒙脱石均高于石灰性扰动冻土; 从剖面内部垂直分布上看, 粗骨寒冻灰化土两种矿物的含量呈现出上低下高的趋势, 表明该土壤土体中有明显的淋溶淀积作

用, 自生矿物在石灰性扰动冻土剖面的分布则没有规律, 反映出土体冻扰作用的强烈影响。在南极海洋气候区, Fe、Al 氧化物、绿泥石、蒙脱石、次生石英、石髓等是土壤粘土矿物的主要组成成分, 而绿泥-蒙脱石混层矿物 ( I/S 混层矿物 ) 在本区土壤中极为常见, 其发生和演变与本区现代气候环境与成土过程密切相关。强烈风化过程的代表性产物高岭石在南极海洋气候区的某些土壤粘粒中也有发现, 但没有证据表明这类粘土矿物形成于现代成土过程。一般认为, 高龄石类矿物可能形成本区古气候条件下的更为强烈的风化作用, 残积于经地貌过程而发生沉积的母质中。

表 3 粗骨寒冻灰化土与石灰性扰动冻土粘粒部分的矿物组成比较

Table 3 Comparison of clay fractions between skeletal-gelic podzol and calcari-turbic cryosol in mineralogical composition of clay fractions

土壤类型	层次	深度 (cm)	矿物含量 (粒径 < 2 μm 粘粒, g/kg)						
			石英	长石	绿泥石	伊利石/云母	橄榄石	蒙脱石	辉石
粗骨寒冻灰化土	Ah	0 ~ 2	< 100	300	< 50	100	< 50	350	50
	Bhs	15 ~ 18	< 50	300	250	< 50	< 50	250	100
	CBw	25 ~ 34	< 50	100	300	< 50	< 50	400	< 50
石灰性扰动冻土	Aw	0 ~ 4	150	260	130	90	0	240	130
	Cw2	10 ~ 30	100	270	100	90	120	150	170
	Cw4	50 ~ 80	200	190	310	120	90	0	90

## 2 土壤发育与铁氧化物的形成与转化

各种形态的次生 Fe 氧化物是风化和成土过程中原生重矿物的风化产物, 由于次生 Fe 氧化物的化学组成、结晶状况、含量与分布与土壤过程密切相关, 因此具有重要的土壤发生学意义, 被称为土壤发生

性 Fe 氧化物。不同类型的土壤由于成土母质、成土环境、成土年龄等方面的差异, 这些次生 Fe 氧化物在土壤物质中的构成与含量具有明显不同。因此, 土壤物质中次生 Fe 氧化物的种类、含量、存在状态一定程度上客观反映了成土特性和土壤发育的程度。

表 4 粗骨寒冻灰化土与石灰性扰动冻土中土壤发生性 Fe 氧化物

Table 4 Pedogenic Fe oxides in skeletal-gelic podzol and calcari-turbic cryosol

土壤类型	层次	深度 (cm)	Fe <sub>p</sub> (mg/g)	Fe <sub>o</sub> (mg/g)	Fe <sub>o-p</sub> (mg/g)	Fe <sub>d-o</sub> (mg/g)	Fe <sub>v-d</sub> (mg/g)	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Si <sub>o</sub> (mg/g)	ODOE (mg/g)
粗骨寒冻灰化土	Ah	0 ~ 2 cm	3.0	2.1	4.0	12.6	21.0	0.36	6.6	0.19
	Bhs	15 ~ 18	7.1	7.1	2.2	14.5	28.6	0.39	4.3	0.47
	CBw	25 ~ 34	2.1	6.1	4.6	6.7	35.5	0.50	—	0.08
石灰性扰动冻土	Aw	0 ~ 4	0	3.9	7.1	5.5	29.6	0.56	1.3	0.02
	Cw2	10 ~ 30	0.1	2.5	4.5	8.0	24.2	0.36	1.8	0.04
	Cw4	50 ~ 80	0.1	1.9	1.6	4.2	23.6	0.13	1.7	0.03

注: Fe<sub>p</sub>—焦磷酸盐提取 Fe; Fe<sub>o</sub>—草酸提取 Fe; Fe<sub>d</sub>—连二亚硫酸盐-柠檬酸提取 Fe; Fe<sub>v</sub>—热盐酸提取 Fe; ODOE—草酸提取液光密度。

表 4 所列为粗骨寒冻灰化土与石灰性扰动冻土两种土壤中有关土壤发生性 Fe 氧化物分析数据, 其

中 Fe<sub>d-o</sub> 可用以表征土壤物质中针铁矿 ( Goethite ) 和纤铁矿 ( lepidocrocite ) 等结晶态 Fe 氧化物的含

量水平;  $Fe_{o-p}$  则反映了非结晶或结晶状态不好的氢氧化铁 (ferrihydrite) 类矿物, 如赤铁矿 (hematite)、褐铁矿 (limonite) 等含量水平;  $Fe_{v-d}$  表示粘土矿物中各种 Fe 氧化物的含量水平;  $Fe_p$  反映有机结合态 Fe (可交换态) 以及各种 Fe 的磷酸盐含量水平<sup>[10]</sup>。表 4 中的数据显示, 粗骨寒冻灰化土中结晶态、有机结合态和磷酸盐态 Fe 氧化物的含量水平明显高于石灰性扰动冻土。这是因为粗骨寒冻灰化土强酸性环境为原生含 Fe 矿物蚀变、分解以及次生矿物的形成与转变提供了比石灰性扰动冻土更好的条件。在灰化作用 (podzolization) 下, 粗骨寒冻灰化土表层中的 Fe 与有机质结合并发生淋溶, 于 Bhs 层土壤颗粒表面形成金属-有机复合物胶膜 (metallo-organic compounds), 这一点可以从粗骨寒冻灰化土 Bhs 层  $Fe_p$  数据得到证实。由于石灰性扰动冻土的土壤反应为中型至弱碱性, 有机质含量极低 (1.0 ~ 0.5 mg/g), 因此土壤中几乎不含有有机结合态和磷酸盐态  $Fe_o$ 、 $Fe_{o-p}$  和  $Fe_{d-o}$  在剖面不同深度的数据表明结晶态、非结晶以及弱结晶态 Fe 氧化物在不同层次的分布没有明显的规律性, 土壤物质没有淋溶迹象, 但不排除冻扰过程导致 Fe 氧化物随土壤物质在剖面的翻卷、移动。粘土矿物中 Fe 氧化物方面, 反映其含量水平的  $Fe_{v-d}$  数值在粗骨寒冻灰化土剖面中表现出明显的上低下高趋势, 是土壤淋溶作用的明确表现<sup>[11]</sup>。由于粘土矿物的形成通常与 Fe、Al、Mn 次生氧化物的富集密切相关, 因此次生氧化物/粘粒比率与土壤深度的关系曲线常用来替代单纯的次生氧化物与土壤深度关系曲线表征灰化和潜育作用对土壤剖面的影响<sup>[10]</sup>。粘土矿物 Fe 氧化物在石灰性扰动冻土剖面垂直方向上的分布均匀, 没有显示出土壤过程的影响。

土壤和风化壳中自生 Fe 氧化物可能是多种原生矿物的风化产物。谢又予等<sup>[12]</sup>在南极海洋气候区乔治王岛 (King George Island) 菲尔德斯半岛 (Fildes Peninsula) 地区的研究结果显示, 自生 Fe 氧化物的总量 (用赤铁矿和褐铁矿含量之和表示) 与风化壳内部原生磁铁矿 (magnetite) 的含量具有明显的负相关关系, 表明次生氧化铁矿物主要是磁铁矿转化而来 (图 2)。进一步的研究发现, 风化壳剖面中赤铁矿含量只与未遭风化的磁铁矿含量有明显的负相关关系, 而褐铁矿则与风化蚀变的磁铁矿含量负相关。这表明, 磁铁矿首先被氧化为赤铁矿, 而风化过程中的过渡产物经过水化作用形成褐铁矿。这一

论断只是初步解释了次生 Fe 氧化物的起源问题, 具体的发生机制和成土因素参与下 Fe 氧化物形成、转化、演变、迁移以及这些过程中次生矿物各种衍生类型、存在形态、含量水平等方面尚需深入研究。

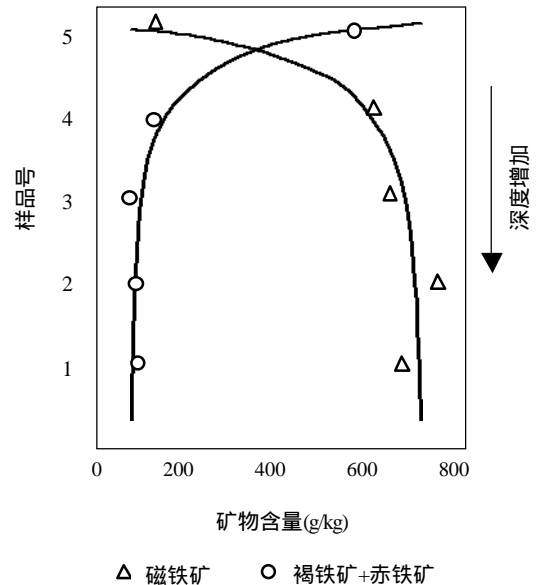


图 2 土壤及风化剖面中 Fe 氧化物含量变化

Fig. 2 Distribution patterns of iron oxides within profiles of soils and weathered crusts

### 3 主要结论

(1) 南极海洋气候区岩石风化和成土过程中, 以溶解、表面融蚀、金属离子释放为特征的原生矿物蚀变作用明显, 各种形态 Fe、Al、Mn 氧化物、绿泥石、碳酸盐为代表的自生或次生矿物出现。

(2) 本区土壤普遍表现出与其母质、母岩相似的矿物学特征; 各种土壤由于成土环境、成土过程、成土年龄等方面的不同, 不同土壤类型在成土矿物构成、存在形态、含量水平以及剖面分布均表现出明显差异。

(3) 地表稳定、发育过程连续、有机质含量较高的土壤, 土壤中原生矿物的风化程度较高, 次生矿物类型较多、含量较高且在剖面中有与相应土壤过程相一致的分布规律; 而地表不稳定、冻扰作用强烈、有机质含量低的幼年土壤, 无论是原生矿物的风化程度还是次生矿物的形成与含量, 都与第一类土壤有明显差距。

(4) Fe、Al 氧化物、绿泥石、蒙脱石等是南极海洋气候区土壤粘土矿物的主要组成成分, 而绿泥-蒙脱石混层矿物 (I/S 混层矿物) 则为本区土壤粘粒

中极为常见特征矿物。高岭石在某些土壤中的出现与现代成土过程没有明显的发生学联系,可能是地质历史时期的产物。

(5) 土壤发生性 Fe 氧化物与成土作用和土壤过程密切相关,其矿物类型、含量、形态特征、分布模式在不同的土壤中明显不同,是表征土壤发育程度与剖面形态表达的有效指标。土壤矿物中 Fe 氧化物的形成机制以及与土壤过程的发生学联系尚需进一步深入研究。

#### 参考文献

- Campbell IB, Claridge GGC. Antarctic soils, weathering processes and environment. Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1987, 43 ~ 70
- O'Brien R, Romans G, Robertson L. Three soil profiles from Elephant Island, South Shetland Islands. British Antarctic Survey Bulletin, 1979, 47: 1 ~ 12
- 陈杰, 龚子同, 阮心玲, Blume HP. 南极半岛海洋气候区的土壤 . 冻-融作用与水分状况. 土壤, 2004, 36 (1): 5 ~ 11
- Glasby GP, McPherson JG. Desert varnish in southern Victoria Land, Antarctica. N. Z. J. geophys, 1981, 24: 389 ~ 397
- Chen J, Gong ZT. Role of lichens in weathering and soil-forming processes on Fildes Peninsula, Antarctica. Pedosphere, 1995, 5 (4): 305 ~ 314
- 陈杰, 龚子同, Blume HP. 南极半岛海洋气候区的土壤 . 风化作用. 土壤, 2003, 35 (4): 279 ~ 285
- Wilson MJ. Interactions between lichens and rocks: a review. Cryptogram. Bot., 1995, 5: 299 ~ 305
- Jones D, Wilson MJ, McHardy WJ. Lichen weathering of rock-forming minerals: application of scanning electron microscopy and microprobe analysis. J. Microsc., 1981, 124: 95 ~ 104
- Ascaso A, Sancho LG, Rodriguez-Pascual C. The weathering action of saxiculous lichens in maritime Antarctica. Polar Biology, 1990, 11: 33 ~ 39
- Blume HP, Beyer L, Kalk E, Kuhn D. Soils and soilscapes. In: Beyer L, Boelter M. eds. Geocology of Antarctic ice-free coastal landscapes. Berlin, Springer-Verlag, Ecological Studies, 2002, 154: 114 ~ 138
- 保学明, 于天仁. 土壤中水溶性亚铁络合物的稳定常数. 土壤学报, 1986, 23 (2): 40 ~ 43
- 谢又予. 中国长城站地区(菲尔德斯半岛)地貌与沉积. 北京: 海洋出版社, 1993, 10 ~ 46

## SOILS IN THE MARITIME ANTARCTIC

### . MINERALOGY

CHEN Jie GONG Zi-tong

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences) Nanjing 210008)

**Abstract** In the maritime Antarctic region, alteration of primary minerals and formation of authigenic minerals evidently occur in the soils during rock weathering and soil-forming processes. Taking two representative types of soils, skeleti-gelic podzol and calcari-turbic cryosol, as examples, the paper addresses characteristics of soil mineralogy. It was pointed that secondary Fe-, Al-oxides in a variety of chemical compositions and morphological features, chlorites, carbonates were dominant authigenic minerals of the soil material. And, in the clay fractions of the soils, mineralogy was characterized by smectite and smecite-chlorite (I/S mixed minerals). It was stated that, due to variation of pedogenic environmental factors and differences in soil-forming processes and soil evolution history, mineralogical attributes of different soils, such as mineral constitutions, content levels and distribution patterns, varied significantly. Finally, pedogenic Fe-oxide formation was thought to be tightly linked with soil-forming processes, and therefore could be used as an effective index indicating genesis and development of soils.

**Key words** Antarctica, Weathering, Soil mineralogy, Clay mineral, Fe-, Al-oxides