

# 东南极格罗夫山地区的土壤特征\*

李潇丽\*\* 刘小汉 琚宜太 黄费新

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 在东南极格罗夫山地区哈丁山南岭发现的三个土壤地点, 是人类首次在东南极内陆地区发现的土壤, 属南极寒漠土壤(cold desert soil), 其主要特征是地表发育漠境砾幕(desert pavement), 土壤中含有丰富的盐分, 具有较强的染色作用, 土壤呈弱酸性, 不含有机质. 据 1:5 的土水提取液分析, 主要阳离子为  $Mg^{2+}$  和  $Na^+$ , 其次是  $K^+$  和  $Ca^{2+}$ , 主要阴离子为  $SO_4^{2-}$ , 其次为  $Cl^-$  和  $NO_3^-$ . 本区土壤中盐分层的分布与土壤中最大水分层和土壤中粘粒级含量最大层相一致. 土壤中有粘粒迁移, 这是本地区土壤与其他寒漠土壤的不同. 部分土壤剖面上部具有较强的染色作用, 由土壤中暗色矿物的风化所致, 染色程度与土壤中游离铁含量有很大关系. 土壤特征指示其年龄在 0.5~3.5 Ma 之间, 且在哈丁山上也没有发现冰川运动的遗迹, 说明至少在 0.5 Ma 以来, 即使在末次冰期极盛期, 该区的冰盖表面也没有到达过哈丁山土壤采样点的高度.

**关键词** 格罗夫山 寒漠土壤 漠境砾幕 可溶盐 游离铁

尽管南极洲所处的纬度较高, 并且有着世界上最寒冷的气候, 接受太阳辐射的能量也相对较少, 但是土壤还是以非常缓慢的速度在南极洲形成了<sup>[1-6]</sup>. 自从 Shackleton 在 1907~1909 年的南极探险过程中取了四个南极土壤样品, 报道南极有土壤以来<sup>[7]</sup>, 人们便开始了对南极土壤的关注. 特别是在 20 世纪 50~60 年代, 人们对南极的土壤进行了广泛的研究<sup>[2,8,9]</sup>, 表明在南极寒冷和干旱的环境中存在土壤过程, 南极寒漠土壤的主要成土过程是盐化作用和氧化作用, 且几乎不含有机质<sup>[1-3]</sup>. 虽然人类对南极土壤的研究已经有半个多世纪, 但是所研究的南极土壤地点主要集中在南极罗斯海和横断山脉地区以及南极沿岸与周围的岛屿地区. 由于南极洲恶劣的自然环境, 很多地方仍是研究空白区, 所以一些新的土壤地点以及新的土壤类型的发现, 仍是南极土壤研究的热点.

本文所论述的东南极格罗夫山地区是人类首次进行科学考察的地区, 属于东南极内陆高原气候区. 由于年降水量少, 极端的低温, 被人们认为不可能有土壤的形成<sup>[1]</sup>. 中国南极科学考察第 16 次队于 1999~2000 年间, 在格罗夫山的冰原岛峰哈丁山南岭发现了土壤, 这是人类首次在东南极内陆高原地区发现土壤. 并且本地区土壤有粘粒迁移, 不同于南极其他地区的寒漠土壤.

2001-12-10 收稿

\* 中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-303)和科学技术部攻关项目(批准号: 98-927-01-06)资助

\*\* E-mail: sclimb@sohu.com

# 1 研究材料和方法

## 1.1 地点

格罗夫山地区(Grove Mountains) (72° 20' ~73° 10' S, 73° 50' ~75° 40' E)位于东南极伊丽沙白公主地内陆冰盖, 介于中山站和冰穹 A 之间, 面积约 3200km<sup>2</sup>, 距中山站(69° 22' S, 76° 22' E)约 450 km. 地势东南高, 西北低, 高差 1200 m 左右. 区内出露冰原岛峰 64 座<sup>[10]</sup>. 本文所述三个土壤地点位于哈丁山南岭主峰南坡(72° 53' S, 75° 1' ~75° 2' E)(图 1), 海拔 2160 m 左右. 据程彦杰等<sup>[11]</sup>1998~1999 年观测, 1 月份该地区日平均气温-18.5℃, 日平均雪温-17.9℃. 平均最高气温为-13.1℃, 平均最低气温为-22.6℃, 平均日较差可达 9.5℃. 盛行东风和东北风, 平均风速是 10 m/s, 占 50%, 14 m/s 的强风天气占 25%, 本地区是典型的极地下降风区, 降雪率为 28.9%.

土壤地点所处的哈丁山主峰南坡为单面山构造, 出露岩石比较单一, 主要为长英质麻粒岩, 片麻状二长花岗岩, 夹易风化的铁镁质麻粒岩和基性岩脉透镜体<sup>[10]</sup>. 岩石受风蚀作用显著, 可见大量呈蜂巢状的岩石.

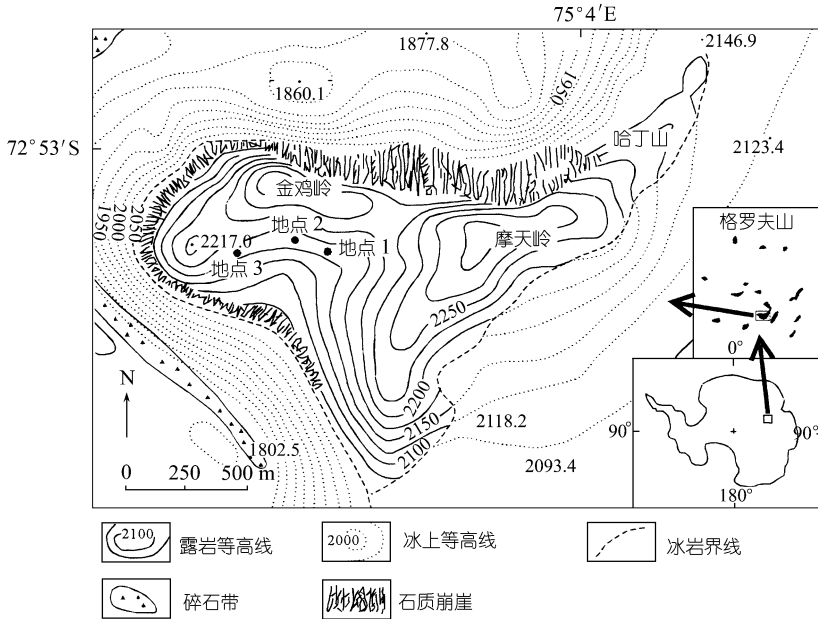


图 1 土壤采样位置图

## 1.2 分析方法

分层采取土壤剖面, 深度从表层砂质土透过冰冻层达到土壤基底的岩石. 土壤样品风干后, 用 Munsell 颜色法对土壤的干色进行描述. 先用筛子把大于 2mm 的砾石筛出称重, 计算百分含量, 用小于 2mm 的土壤进行其他研究. 用筛析法和沉降法结合对土壤的粒度进行分析. 对土壤中的盐分采用 X 粉晶衍射分析和 1:5 的土壤与水之比的 可溶盐分析. 1:5 土壤与水的提取液分析包括土壤的 pH 值及 Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等 离子含量的测定. 土壤中有机质分析采用氧化还原法-重铬酸钾比色法. 土壤中的中溶盐石膏分析采用容量法,

而不溶盐碳酸钙则采用中和法进行分析. 从土壤中提取粘粒后, 对其进行 X 粉晶衍射分析. 游离铁采用连二亚硫酸盐-柠檬酸盐-碳酸氢钠混合提取液(CBD 浸提液)提取, 全铁经氢氟酸和高氯酸溶解, 后用盐酸提取, 二者含量均用 WFD-YR 型原子吸收分光光度计测定, 游离铁和全铁的误差分别是 11% 和 0.4%.

## 2 土壤特征与讨论

### 2.1 土壤剖面形态特征

现将本区的几个代表性土壤剖面描述如下.

地点 1 土壤呈小块梯田状散布在低洼的坡面上. 面积大小不等(图 2(a)). 土壤剖面厚薄不等, 10~25 cm. 剖面中有小的冰晶胶结, 但干燥松散. 剖面中的盐分层距地表约 5~10 cm. 盐分层明显, 但盐分层的界限不平直, 高低突兀. 土壤剖面特征如下:

剖面 B9261

2~0 cm 地表为细砾和石块, 以及与周围基岩成分一致的二长花岗岩和长英质麻粒岩巨砾.

染色程度中等; 巨砾被风塑成奇形怪状, 表面染色强烈, 呈灰黑色和暗棕红色; 地表的巨砾和小石块下面有盐分结壳

0~5 cm 浅黄棕色(2.5Y4/6)含少量砾石砂质土, 砾石呈次棱角状; 有少量冰晶胶结, 较疏松; 风干后形成较多的白色盐分胶结团. 层界明显

5~10 cm 黄棕色(2.5Y5/4)含少量砾石壤砂土, 砾石呈次棱角状, 其上有白色盐斑出现; 有少量的冰晶胶结, 使砂多少有些冻结; 层内有大量的盐斑连续分布; 风干后形成大量的大块盐分胶结团. 与下伏基岩凹凸接触

> 10 cm 风化的基岩; 风化成砂状, 见白色盐分聚集

地点 2 土壤发育在簸箕状冲沟地形内(图 2(c)). 土壤剖面厚度 2~10 cm, 无冰晶胶结, 干燥. 该区土壤染色强烈. 染色深度大约有 2~4 cm. 局部地表有盐分结壳出现, 盐分自地表延伸至整个剖面. 位于地点 1 西 200 m. 其剖面特征如下:

剖面 T92111

2~0 cm 地表为砾石与岩块, 以及与周围基岩成分一致的花岗岩和麻粒岩巨砾. 由于有非常强的染色作用, 石块和巨砾的表面呈暗棕红色和灰黑色; 花岗岩巨砾被风吹蚀成圆形, 麻粒岩巨砾被风、沙和雪粒雕塑成奇形怪状(图 2(b)); 地表岩石下面有海绵状盐分结壳出现

0~6 cm 暗黄棕色(2.5Y6/3)含砾砂质土, 砾石 2~5 mm. 疏松, 有盐斑分布; 层界不分明

6~10 cm 黄棕色(2.5Y6/2)含砾砂质土, 砾石 2~12 mm. 疏松, 有盐斑分布; 与下伏基岩凹凸接触

> 10 cm 风化的麻粒岩

剖面 T92121

2~0 cm 地表砾石和岩块, 次圆状和次棱角状, 染色强烈. 层界明显、平整

0~7 cm 暗红棕色(5YR5/4), 含少量砾石的砂质土, 染色强烈. 与下伏基岩凹凸接触

> 7 cm 风化的麻粒岩

地点 3 位于簸箕状冲沟西端弧形坡地上(图 2(c)), 南缘为高差约 20 m 的断崖, 西缘为弧形陡峭狭窄山脊. 剖面厚度约 40cm, 剖面上部大约 12cm 为松散干燥的土壤, 下部为有冰胶结的冻土. 主要盐分层出现在剖面中有冰胶结的土壤层, 距离地表 26cm 左右. 剖面特征如下:

## 剖面 T92311

2~0 cm 地表为砾石和岩块, 以及被风雕塑成圆形的花岗岩巨砾和奇形怪状的片麻岩和基性岩巨砾. 地表细砾次圆状和次棱角状, 染色较弱; 花岗岩巨砾因剥蚀强烈, 表面新鲜; 周围基岩染色强烈, 呈灰黑色和暗棕红色. 层界分明

0~12 cm 棕黄色(2.5Y5/4)含砾砂质土, 砾石 2~5 mm, 层间偶见白色盐分. 疏松, 干燥

12~26 cm 暗灰黄色(2.5Y5/2)含砾砂质土, 砾石 2~5 mm, 此层有冰晶胶结

26~32 cm 暗灰黄色(2.5Y5/2)含砾壤砂土, 风干后可见有大量的白色盐分出现, 层界不明显, 有大量的冰晶胶结

32~40 cm 暗灰黄色(2.5Y4/2)含砾砂质土, 偶见盐分. 砾石多为肉红色的长石晶体. 有大量的冰晶胶结. 与下伏基岩界限明显

> 40 cm 基岩

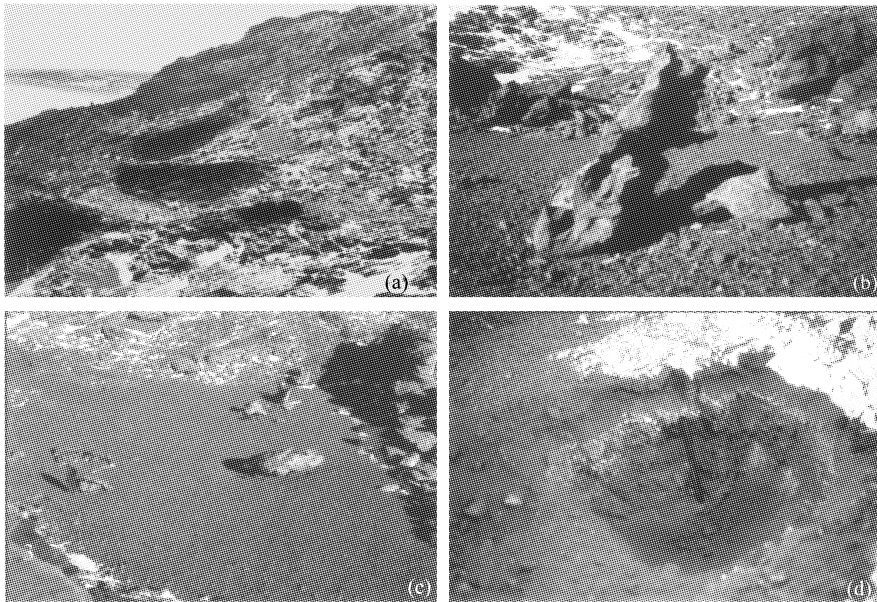


图 2 土壤地貌特征及土壤剖面特征

(a) 地点 1 土壤呈小块梯田状分布在山坡凹洼处; (b) 地点 2 表面的漠境砾幕和土壤表面的风蚀岩; (c) 地点 3 簸箕冲沟内发育的土壤; (d) 剖面 B9231

三个土壤地点的地表都有一层砾石层平铺在土壤的表面, 称之为漠境砾幕. 漠境砾幕是指在典型的荒漠地带缓慢形成的由砾石和粗大的碎屑组成的地表覆盖层. 砾石为次棱角状, 呈杂色. 这些地表的砾石是由大风夹着冰粒和小的砂粒对基岩和巨砾等进行磨蚀, 大风的选择性搬运作用和冻融作用, 以及盐类风化对岩石的影响等等各种因素, 使岩石崩解成小的碎块, 平铺在土壤的表面, 形成漠境砾幕, 保护着地表下面的土壤不被风吹走. 漠境砾幕是南极大陆无冰区土壤的典型特征<sup>[1~3,5,8,9,12]</sup>. 本地区发育有风棱石和荒漠岩漆.

由表 1 可以看出, 本地区土壤剖面中的砾石含量较少; 砾石的粒径一般为 5 mm, 不超过 12 mm, 磨圆较差. 砂级占 90%左右; 粘粒级含量 1.56%~11.72%; 粉砂的含量相对粘粒少. 可以看出粘粒在土壤剖面中有迁移. 可能是由于土壤中含有少量的冰晶及微弱的冻融作用引起的. 土壤发育在哈丁山南岭较低的部位, 它的母质可能是在历史上温暖期冰雪融水的地表径

流冲积搬运以及附近基岩的崩解堆积形成的, 在地表斜坡可以看到冲蚀的浅沟。

表1 东南极格罗夫山地区土壤的理化特征

土层深度 /cm	Munsell 颜色 (干色)	> 2mm /%	砂/%		粉砂 /%	粘粒 /%	全铁 /%	游离铁 /%	Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub>	盐类特征
			粗砂	细砂						
剖面 B9221(地点 1)										
0~4	暗红黄色(10YR5/4)	2.7	59.47	32.89	5.64	2	8.2	0.76	9.27	未见
4~7	黄棕色(2.5Y5/3)	4.9	79.99	14.45	3.56	4	9.22	0.57	6.18	未见
7~12	黄棕色(2.5Y5/3)	6.2	66.9	18.86	4.8	9.44	8.25	0.49	5.94	可见盐斑
剖面 B9231(地点 1)(图 2(d))										
0~4	棕黄色(2.5Y5/4)	6.2	74.187	17.21	3.12	5.48	9.32	0.64	6.87	未见
4~9	黄棕色(2.5Y5/3)	5.3	76.84	16.96	2.76	3.44	8.92	0.55	6.17	未见
9~14	黄棕色(2.5Y5/3)	9.3	62.76	25.92	3.72	7.6	8.92	0.53	5.94	盐斑较多
14~17	灰橄欖色(5Y5/2)	19.6	78.97	14.27	3.92	2.84	9.22	0.53	5.75	偶见盐斑
剖面 B9261(地点 1)										
0~5	淡黄棕色(2.5Y4/6)	0.2	65.46	30.02	0.12	4.4	9.22	0.6	6.51	偶见盐斑
5~10	黄棕色(2.5Y5/4)	5.2	63.14	20.82	4.32	11.72	8.4	0.41	4.88	丰富盐斑
剖面 B9271(地点 1)										
0~7	灰橄欖色(5Y6/2)	40	71.52	17.36	4.92	6.2	9.22	0.55	5.97	偶见盐斑
剖面 T92111(地点 2)										
0~6	黄棕色(2.5Y6/3)	13	72.31	14.172	3.88	9.64	5.12	0.62	12.1	盐斑较多
6~10	灰黄棕色(2.5Y6/2)	19.5	79.38	11.44	4.06	5.12	5	0.76	15.2	盐斑可见
剖面 T92121(地点 2)										
0~5	暗红棕色(5YR5/4)	22.9	71.3	22.3	3.88	2.52	10	1.08	10.8	未见
剖面 T92310(地点 3)										
0~15	暗黄棕色(10YR5/4)	28.3	57.49	34.15	6.8	1.56	7.11	0.88	12.4	盐斑可见
剖面 T92311(地点 3)										
0~12	棕黄色(2.5Y5/4)	4.8	73.09	22.63	1.76	2.52	9.22	1.05	11.4	未见
12~26	暗灰黄色(2.5Y5/2)	16.4	84.43	10.37	2.64	2.56	9.55	1.03	10.8	偶见盐斑
26~32	暗灰黄色(2.5Y5/2)	18.9	73.87	18.77	1.4	5.96	8.7	0.88	10.1	盐斑较多
32~40	暗灰黄色(2.5Y4/2)	6.3	73.93	10.83	6.2	9.04	8.7	0.95	10.9	可见盐斑
剖面 T92301(地点 3)										
0~20	暗黄色(2.5Y6/3)	24.5	79.25	12.63	1.92	6.2	5.38	0.71	13.2	可见盐斑
20~40	暗黄色(2.5Y6/3)	19.4	72.56	12.33	2.92	5.24	6.3	0.76	12.1	可见盐斑
地点 2 地表盐分结壳(具有海绵状孔隙)										
T92	土黄色(2.5Y7/4)						8.52	4.75	55.8	

## 2.2 土壤中的盐分

**2.2.1 可溶盐** 本区土壤中的盐分聚积特征是: 呈结壳状聚集在土壤表面的砾石底部, 连续或者断续分布在剖面中的某一层。七个土壤剖面中的结晶盐类 X 粉晶衍射分析结果显示, 它们的主要成分为五水泻盐 ( $MgSO_4 \cdot 5H_2O$ )、六水泻盐 ( $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ )、白钠镁矾 ( $Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ) 和磷钙铍石 ( $CaBe_2(PO_4)_2$ ) 等, 主要是硫酸盐。用 1:5 土壤与水的提取液进行可溶盐的分析, 土壤中主要的阳离子为  $Mg^{2+}$  和  $Na^+$ , 其次是  $Ca^{2+}$ , 含有少量的  $K^+$ ; 主要的阴离子是  $SO_4^{2-}$ , 其次是  $NO_3^-$ 、 $Cl^-$  和少量的  $HCO_3^-$ 。Bockheim<sup>[5]</sup> 在南极 McMurdo 附近的干谷地区, 按照 Campbell 和 Claridge<sup>[8]</sup> 1969 年所划分的三个土壤-气候带(半干旱地带、干旱地带

和极端干旱地带)采得八个土壤剖面. 研究表明, 在沿岸地区土壤中主要的阴离子为  $\text{Cl}^-$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  是内陆干旱和极端干旱环境下最常见的离子. 格罗夫山地区应属于干旱土壤气候带.

盐分的聚集说明土壤中的盐分发生了运移与积累. 由表 2 可以看出,  $\text{Ca}^{2+}$  离子有向地表增大的趋势,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  离子保留在盐分最大层内. 盐分的最大层与剖面中粘粒含量最高层一致, 并且与剖面中水分最大层对应. 土壤中的有效水分是以小的冰晶的形式存在的. 这些小冰晶随着季节和昼夜温差的变化会变成水膜或者水蒸气. 在细粒物质中, 离子的渗透性降低, 颗粒中的孔隙也较小. 孔隙越小, 溶液的冻结点越低, 并且盐分的存在也使土壤中水分的冻结点降低, 延长了土壤中可利用水分的存在时间, 这就越利于盐分的运移和聚集<sup>[13,14]</sup>, 同时盐分的存在也加速了土壤颗粒的崩解, 所以本地区土壤中盐分的聚集层对应于粘粒和水分含量最大层. Campbell 等<sup>[15]</sup>对 Coombs Hills 区的寒漠土研究表明, 该地区土壤中水分分布在大约 10~15cm 的深度, 与盐分的最大分布层对应.

表 2 东南极格罗夫山地区土壤的化学特征<sup>a)</sup>

剖面深度 /cm	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	盐分总量	pH 值	石膏	碳酸钙	有机质
	$\times 10^{-2}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$						/%						
剖面 B9231 (地点 1, 第 4 风化阶段)													
0~4	88.64	8.34	11.69	4.57	221.04	4.80	42.54	9.83	396	6.4	0.396	1.81	-
4~9	47.89	52.83	1218.46	5.00	2774.17	33.40	17.44	14.74	4248	6.7	-	1.64	0.701
9~14	37.70	1027.47	349.00	18.30	5005.56	40.20	36.96	10.81	6994	6.0	-	1.51	-
14~17	23.64	376.81	178.05	14.55	1854.78	29.40	38.36	10.81	2666	6.4	-	1.43	1.455
剖面 B9261 (地点 1, 第 4 风化阶段)													
0~5	74.38	6.12	10.94	2.20	219.75	1.30	3.49	9.34	328	6.0	0.394	1.95	-
5~10	46.87	1557.61	420.95	4.15	7087.56	45.40	19.53	11.31	10042	6.7	-	1.52	1.216
剖面 T92311 (地点 3, 第 4 风化阶段)													
0~12	129.80	18.84	12.80	16.60	368.40	33.20	11.86	11.31	590	6.7	0.66	2.14	0.26
12~26	8.15	12.76	159.50	13.49	381.35	45.90	13.25	13.27	674	6.4	-	2.27	0.623
26~32	141.62	17.43	847.50	16.60	2252.01	45.60	15.34	7.37	3428	6.4	-	1.66	0.708
32~40*													
剖面 T92301 (地点 3, 第 4 风化阶段)													
0~40	124.91	14.87	797.52	19.90	2029.05	46.60	13.95	7.37	3106	6.7	-	0.45	0.642
剖面 T92111 (地点 2, 第 3~4 风化阶段)													
0~10	77.84	1281.56	919.90	19.91	4981.07	15.60	23.71	10.32	8102	6.4	-	0.22	1.334

a) - 表示含量为零, \* 表示未测, 风化阶段根据文献[16]

地点 1 中的水分以小冰晶的形式出现, 地点 2 为非常干燥的土壤, 地点 3 的土壤剖面距离地表 12 cm 以下为有冰晶胶结的冻土层. 土壤剖面中都含有盐分层, 地点 1 和 2 盐分层距离地表大约 5~10 cm, 地点 3 盐分层距离地表大约 26 cm. 因为本地区非常干燥, 它们的活动层和永久冻土层不易区分. 估计本地区的活动层距地表大约 10 cm 左右.

**2.2.2 地表岩石下面的盐分结壳** 与可溶盐有关的南极土壤的特征是在地表的岩石底部附着的盐分结壳, 如碳酸盐和石膏. 在 Lower Taylor 谷地和 Ross 岛, 均有这样的盐分结壳, 其主要成分是碳酸钙, 来自基岩中的大理岩<sup>[13]</sup>. 在格罗夫山地区地表没有发现石膏和碳酸钙结皮, 但在土壤剖面中, 石膏趋于分布在土壤的表层(表 2), 碳酸钙的含量在剖面中自下而上逐渐升高, 这可能是由于在极端干旱寒冷的环境下发生蒸发作用的结果.

在本地区地表的岩石下面有一些白色和黄白色的物质, 固结成海绵状附着在砾石底部。经 X 粉晶衍射分析, 主要成分是石英( $\text{SiO}_2$ , 40.75%)、四水白铁矾( $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 37.39%)、主羟铬矿( $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 9.30%)和四水泻盐( $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 12.56%)。这些物质主要是铁镁的硫酸盐矿物和氧化物。阳离子以 Fe 为主, 其次是 Mg 和 Cr 离子。其游离铁的含量是 4.75%, 全铁的含量是 8.52%, 游离度为 55.8%。地表岩石底部附着的盐分结壳, 是地表岩石风化作用的结果。据观察, 在蜂巢岩的孔洞里有液态的水滴出现, 在周围基岩上可以见到小块的积雪融化, 浸润着岩石表面, 说明即使在  $-20^\circ\text{C}$  的环境下, 由于太阳的照射岩石表面的冰雪仍可能局部融化。这些少量的融水浸润岩石, 经过漫长的寒冻、风蚀等作用, 在南极极端干冷的环境下, 岩石内部的 Mg, Fe 和 Cr 等离子以及降雪中带来的离子就在岩石表面富集, 形成盐分。谢又予<sup>[17-19]</sup>在研究南极长城站和戴维斯站的风化作用时发现, 在寒冻状态下, 存在着化学元素的运移, Mg 和 Fe 离子有向表面富集的现象。岩石内部的离子向岩石表面运移与雪融带来的离子在岩石表面沉降, 附着在岩石表面。

关于南极土壤中盐分的来源一直存在着争议, 主要有岩石的化学风化, 海盐的沉淀, 沉积岩石的渗滤<sup>[13,20]</sup>以及大气沉降、降雪等等。French<sup>[21]</sup>在研究 Terra Nova Bay 地区的冰缘特征时也发现, 在晚春, 岩石的洞里有风吹的积雪; 在初夏, 积雪融化或者升华, 可以见到盐分沉淀在岩石上。本地区盐分中  $\text{SO}_4^{2-}$  的来源可能是由于大气沉降和降雪带来的,  $\text{Mg}^{2+}$  是由于土壤母质中含铁镁矿物的风化造成的。

### 2.3 土壤中的游离铁

土壤的红化作用是南极土壤的一个重要成土特征。在南极寒漠土壤中, 红化作用表现为土壤剖面中游离铁含量的相对集中, 土壤越老, 土壤剖面染色的深度和程度也越强<sup>[16,22,23]</sup>。Campbell 和 Claridge<sup>[16]</sup>研究南极土壤的风化阶段时认为, 在风化的第 1 阶段, 土壤中游离铁的含量为 0.2%~0.3%, 而在风化的第 6 阶段, 土壤中游离铁的含量会增至 4%~5%, 对大多数南极土壤来说, 游离铁的含量不会超过 1%。所以, 游离铁的含量越大, 说明土壤的风化程度越高。从我们分析的 27 个土壤样品(表 1)可以看出, 土壤剖面中游离铁的含量在 0.4%~1.08%, 近地表逐渐增大,  $\text{Fe}_d/\text{Fe}_t$  值也遵循这个规律, 含游离铁最大的是剖面 T92121, 为 1.08%, 暗红棕色 (5YR5/4) 也说明本区土壤母质中铁镁质矿物含量较高。通过对部分土壤样品的微形态学分析, 发现土壤中含有黑云母、角闪石和磁铁矿等富铁镁矿物, 而在矿物颗粒的边缘可以见到由这些暗色矿物析出的红色胶膜。所以, 土壤中的游离铁可能来自土壤中含铁镁矿物的风化。

### 2.4 土壤中的粘土矿物

土壤中的粘土矿物主要是伊利石(见表 3), 蒙脱石和伊蒙混层也比较常见, 少量高岭石和蛭石。伊利石是由云母水化而来的, 进一步转化为蛭石。水云母类矿物处于矿物风化的初级阶

表 3 土壤中的粘土矿物<sup>a)</sup>

土壤剖面/cm	粘土矿物的相对含量/%					土壤剖面/cm	粘土矿物的相对含量/%				
	S	I/S	I	K	V		S	I/S	I	K	V
T92111(10)	2		94		4	B9221	0~4		96		
T92121(5)	4		95	1			4~7		97		
			81	2			7~12		95		
T92311	0~12					B9262	0~5	24	75	1	
	12~26	11	21	67	1			5~10	24	75	1
	26~32	18	32	48	2						

a) S 为蒙脱石, I/S 为伊蒙混层, I 为伊利石, K 为高岭石, V 为蛭石

段, 蒙脱石的出现反映了本地区富含镁元素, 没有强烈的淋溶, 属寒冷干旱的弱酸性环境. 高岭石是在酸性条件下, 强烈风化淋溶的产物, 在本区很少见.

## 2.5 土壤的 pH 值

土壤的 pH 值和土壤的盐分组成相对应, 主要是由于大气环流的酸性物质和来自海水成因的微碱性盐分平衡作用的结果. 南极的土壤一般被描述为碱性土壤, pH 值有一个很大的变化范围, 较低的 pH 值总是对应着较低的  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  比率<sup>[13]</sup>. 在较南方的高纬度地区, 干旱和极端干旱土壤的 pH 值一般在 6~6.5 之间, 如研究区格罗夫山地区的 pH 值为 6~6.7(表 2). 在接近沿海地区, 由于受海洋的影响, 土壤的 pH 值大于 7. 在 McMurdo 的 Oasis 地区, 土壤的 pH 值大约为 8. 如果土壤受海洋的影响非常大, 那么它的 pH 值可达 9, 如在 Inexpressible 岛.

## 3 土壤与南极古环境讨论

Campbell 和 Claridge<sup>[16]</sup>根据土壤的地表岩石特征、土壤颜色、土体的层次分异、土壤中的盐分、土壤发育的深度等等, 把南极寒漠土壤划分为 6 个风化阶段. 每一个风化阶段对应于不同的土壤年龄. 处于土壤风化第 1 阶段的土壤, 地表岩石新鲜, 角状. 随着风化程度的加大, 地表岩石的染色、圆化、抛光、孔穴状风化、风棱石以及沙漠漆皮等的发育程度也增强. 土壤的颜色也由第 1 风化阶段的淡橄榄色发展到第 6 风化阶段的深棕色、黄红色和暗红色. 土壤的层次从无分异到层次分异非常清楚. 盐分也由第 1 风化阶段土壤剖面中没有盐分到第 6 风化阶段盐分出现在整个剖面中.

格罗夫山地区的土壤处于 Campbell 和 Claridge 划分的土壤风化的第 3 和 4 阶段. 主要是第 4 阶段, 即地表岩石圆化、风棱石化、孔穴状风化发育强烈, 染色、抛光发育良好, 荒漠漆皮有一定程度的发育. 土壤上层颜色深, 下层颜色变浅. 土体层次发育清楚, 盐分断续或者连续呈层状分布, 所对应的土壤年龄是 0.5~3.5 Ma.

土壤的年龄说明, 至少在 0.5 Ma 以来, 冰盖表面的高度也没有到达过哈丁山采样点的位置(采样点海拔 2160 m, 哈丁山下蓝冰的冰面与山坡裸岩界线的平均海拔为 2050 m), 相对高差仅约 110 m, 即使在末次冰期极盛期, 该区冰盖表面的上升幅度也并不大, 这样才使得土壤得以发育, 保存至今.

## 参 考 文 献

- 1 Campbell I B, Claridge G G C. Antarctica: Soils, Weathering Processes and Environment. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 1~368
- 2 Tedrow J C F, Ugolini F C. Antarctic soils. In: Tedrow J C F, ed. Antarctic Soil and Soil-forming Processes, Antarctic Research Series. American Geophysical Union, 1966, 8: 161~177
- 3 Bockheim J G, Ugolini F C. A review of pedogenic zonation in well-drained soils of the southern circumpolar region. Quaternary Research, 1990, 34: 47~66
- 4 Beyer L, Bolter M. Formation, ecology and geography of Cryosols of an ice-free oasis in Coastal East Antarctica near Casey Station (Wilkes Land). Australian Journal of Soil Research, 1998, 37: 209~244
- 5 Bockheim J G. Properties and classification of cold desert soil from Antarctica. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61: 224~231
- 6 Blume H -P, Beyer L, Schneider D. Soil of Southern circumpolar region and their classification. Eurasian Soil Science, 1998,



- 31: 477~485
- 7 Jensen J T. Report on Antarctic Soils. British Antarctica Expedition 1907~1909. 1916, Part VI, 6: 89~92
  - 8 Campbell I B, Claridge G G C. A classification of frigid soils—the zonal soils of the Antarctic continent. *Soil Science*, 1969, 107: 75~85
  - 9 McCraw J D. Some surface features of McMurdo Sound region, Victoria Land, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1967, 10: 394~417
  - 10 刘小汉, 赵越, 刘晓春, 等. 东南极格罗夫山地质特征——冈瓦纳最终缝合带的新证据. *中国科学, D辑*, 2002, 32(6): 457~468
  - 11 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根, 等. 东南极格罗夫山地区夏季的天气特征. *极地研究*, 1999, 11 (4): 291~300
  - 12 Bockheim J G. Properties of a chronosequence of ultraxerous soils in the Trans-Antarctic Mountains. *Geoderma*, 1982, 28: 239~225
  - 13 Claridge G G C, Campbell I B. The salts in Antarctic soils, their distribution and relationship to soil processes. *Soil Science*, 1977, 123: 377~384
  - 14 Chuvilin E M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils. *Polar Record*, 1999, 35(192): 59~66
  - 15 Campbell I B, Balks M R, Claridge G G C. Moisture contents in soils of the McMurdo Sound and Dry Valley region of Antarctic. In: Lyons W B, Howard-Williams C, Hawes I, eds. *Ecosystem Processes in Antarctic Ice-free Landscapes*. Rotterdam: Balkema, 1997. 61~76
  - 16 Campbell I B, Claridge G G C. Morphology and age relationship of Antarctic soils. In: Suggate R P, Cresswell M M, eds. *Quaternary Studies*, Royal Society of New Zealand Bulletin, 1975, 13: 83~88
  - 17 谢又予. 南极戴维斯站地区晚更新世以来沉积环境的演变. *中国科学, B辑*, 1985, (2): 176~184
  - 18 谢又予. 东南极凯西站地区风化过程的初步研究. *中国科学, B辑*, 1987, (7): 751~760
  - 19 谢又予. 论南极多年冻土区的化学风化作用——以中国长城站、澳大利亚凯西站和戴维斯站为例. *南极研究*, 1988, 1(2): 8~14
  - 20 Keys J R, Williams K. Origin of crystalline, cold desert salts in the McMurdo region, Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 2299~2309
  - 21 French H M, Guglielmin M. Observations on the ice-marginal, periglacial geomorphology of Terra Nova Bay, northern Victoria land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999, 10: 331~347
  - 22 Ugolini F C, Bull C. Soil development and glacial events in Antarctica. *Quaternaria*, 1965, 7: 251~269
  - 23 Bockheim J G. Relative age and origin of soils in eastern Wright Valley, Antarctica. *Soil Science*, 1979, 128: 142~152