

南极半岛海洋气候区的土壤^①

II. 有机质积累过程

陈 杰¹ 龚子同¹ Blume HP²

(¹ 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008;

² Institute of Plant Nutrition and Soil Science, University of Kiel, Kiel D-24098 Germany)

摘 要 南极海洋性气候土壤形成过程中具有明显的有机质积累作用,有机质对成土过程和土壤性状产生重要影响,如土壤酸化、有机-金属螯合物的形成和生物成矿现象。受地表生物活动强弱影响,不同土壤有机 C、N 含量差异明显。冻扰作用、灰化作用以及物理性裂隙渗漏是有机质在剖面的迁移和重新分配的主要途径。

关键词 南极;土壤;成土过程;有机质积累

中图分类号 S151⁺.3

南极是地球上土壤发生、发育最弱的地区之一。相关的南极土壤发生学研究主要集中在微地形与地表特征、风化壳与沉积物年龄、土层厚度与土壤永冻层界面(permafrost table)与特性、剖面内部土体颜色的变化与分异、土壤盐分与盐积层发育状况、土壤机械组成与土壤颗粒在剖面中的分异状况、土壤风化状况与矿物学特征等几个方面,而在具体的成土作用以及成土过程研究方面,详细系统的报道不多。与南极其它地区特别是南极内陆地区相比,南极海洋性气候区内土壤发生、发育过程相对强烈。本文从有机质来源、在土壤中的积聚、含量特征以及迁移转化等几个方面阐述本区成土过程中最为重要的有机质积累过程。

1 有机质积累作用概况

相对强烈的土壤有机质积累作用是南极海洋性气候区在土壤形成过程中明显区别于南极大陆尤其是南极内陆地区的最突出特点。相对温暖适宜的气候条件使南极海洋性气候区成为南极生物物种最为丰富、生物活动最为强烈的地区。土壤中不仅有较为明显的有机质积累过程,而且某些局部地形景观上有机质的积累与转化深刻地影响着土壤的理化性状和形态特征^[1]。

表 1 中是南极海洋性气候区乔治王岛菲尔德斯半岛地区几类土壤的表层有机质与有机 C 的含量数据。比较而言,发育于南极海洋性气候区地表低等

植被盖度超过 60%的土壤其表层(< 10 cm)有机质与有机总 C 的含量水平与分布与我国黑龙江、内蒙古地区的季节性冻土漂白冷凉淋溶土、筒育永冻潜育土、寒冻筒育正常灰土等针叶林植被下的土壤相近,甚至高于我国西藏地区的高山土壤类型钙积寒性干旱土。即使南极海洋性气候区内稀疏植被下的土壤(盖度< 40%),表层有机质的含量水平也与青藏高原地区发育的寒冻正常新成土接近,甚至要高于发育和分布于更高海拔的筒育寒性干旱土。即使发育于新近沉积物且地表无植被着生的年轻土壤,其表层也可检测出有机质的积累(表 1)。

2 土壤有机质来源与积累的途径

南极海洋性气候区土壤有机物质的来源主要有 3 个主要途径,一是来源于地表低等植物的生物量积累;二是来源于动物,即海鸟、海兽等海洋脊椎动物在本区的栖息与活动;三是来源于土壤藻类、土壤动物与微生物活动。

几乎所有南极特有的陆地植物种类在南极海洋性气候区均有分布,以地衣、苔藓为主要形式的低等植物生物量相当可观,主要地衣种 *Usnea* *Himantormia* 的干生物量甚至可高达 2.0 kg/m^{2[2]}。植被以地衣苔藓为优势种的绿洲在本区相当普遍,在南极半岛某些地区以及附近岛屿的无冰区(ice-free areas),有超过 50%的陆地面积被各种低等植被覆盖。地衣主导的低等植被下发育的土壤一般分布在

^①国家自然科学基金(40001011)资助项目。

地形部位较高的区域，优势种多为多年生的枝状（fruticose）、叶状（foliose）以及壳状（crustose）地衣。苔藓植被主要形成于地势低洼、水分相对充

足的海滩、潮间带、季节性河溪畔。与地衣为主的低等植被相比，苔藓植被盖度更高，但范围较小，多呈规律明显的斑块状、条带状分布（图 1）（表 2）。

表 1 南极菲尔德斯半岛与我国高纬度、高海拔地区主要土壤表层（0~10 cm）有机质含量比较

Table 1 Comparisons of SOM and TOC in the top layer (0~10 cm) of the main types of soils in the Fildes Peninsula, the Maritime Antarctic, with of those in the high-latitude and high-altitude regions of China.

分布范围	土壤类型	样本数量	有机质 (g/kg)	有机 C (g/kg)
南极菲尔德斯半岛 (62°08' 48" ~62°15' 05" S)	企鹅栖息地	4	180.9	104.92
	植被土壤（盖度> 60%）	7	24.2	14.04
	植被土壤（盖度< 40%）	9	8.4	4.87
	无植被土壤	7	5.7	3.36
黑龙江呼中 (52°50' N)	漂白冷凉淋溶土	1	27.0	15.66
黑龙江塔河 (52°20' N)	漂白冷凉淋溶土	1	56.2	32.60
黑龙江古莲 (52°10' N)	筒育永冻潜育土	1	46.4	26.91
内蒙喜桂图 (48°05' N)	寒冻筒育正常灰土	1	21.5	12.47
西藏 海拔 4490~5250 m	暗沃寒性雏形土	6	133.5	77.43
4700~5100 m	钙积寒性干旱土	6	17.1	9.92
4940~5930 m	寒冻正常新成土	4	8.3	4.81
5000~5500 m	筒育寒性干旱土	2	4.9	2.84

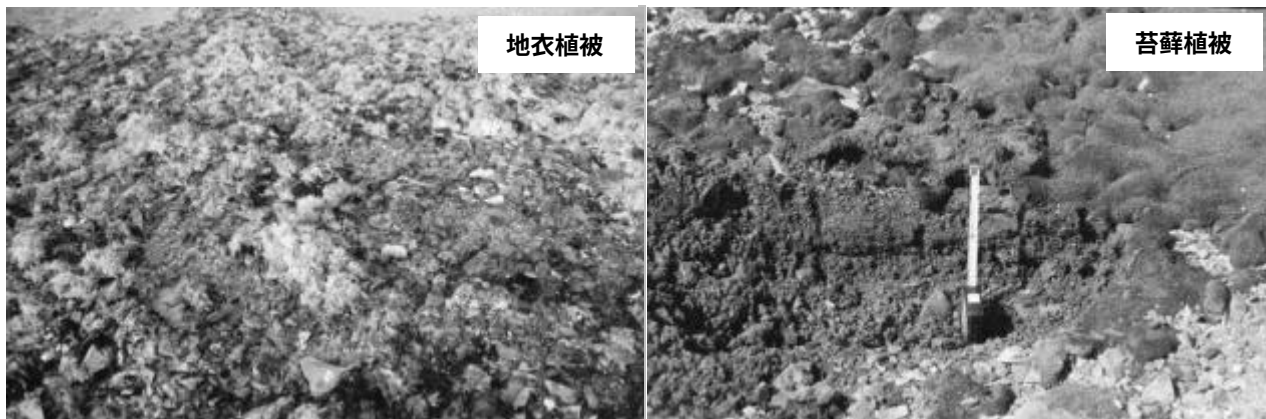


图 1 南极海洋性气候区以地衣和苔藓主导的低等植被（乔治王岛菲尔德斯半岛）

Fig. 1 Lower plant vegetation dominated by lichen and moss species in the Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic.

南极海洋性气候区动物来源的土壤有机质，贡献最大的海洋脊椎动物是海鸟，其中最重要的是种类繁多、种群庞大的企鹅。南极海洋性气候区的海鸟以粪便（dropping）、食物残留（food remains）、凋落羽毛以及鸟尸等形式把大量源自海洋的、以富含有机 P 为特征的有机物质携带入栖息地的陆地生态系统中，对土壤形成过程的有机质积聚作用产生重要影响。据有关研究估算，仅各种企鹅每年以各种形式携带到南极海洋性气候区陆地生态系统中的海洋有机 P 总量大约在 $1.5 \times 10^4 \text{ t} \sim 2.0 \times 10^4 \text{ t}$ 之间^[3]。

除企鹅之外，以南极海洋性气候区为主要栖息地的黑背鸥、贼鸥、巨海燕等海鸟也在土壤有机质积聚中发挥重要作用。由于生活习性、食物结构、种群数量以及栖息时间长短方面的差异，不同种类的海鸟在土壤有机质积聚过程中发挥的作用以及对土壤形成所产生的影响具有显著不同（图 2）（表 3）。

南极海洋性气候区地表无植被土壤的有机质主要来源于海洋动物活动、土壤藻类与雪藻生长、以及成土过程发生之前沉积母质中的有机质积累。在乔治王岛的研究表明，绝大多数土壤类型表层中全

P 含量高达 2 g/kg 以上,而同一地区的主要母岩拉斑玄武岩(tholeiite basalt)中全 P 含量在 0.7 g/kg 左右。土壤表层相当高全 P 含量说明海洋动物对这一地区土壤有机质积聚作用影响相当普遍^[4]。

表 2 南极海洋性气候区乔治王岛菲尔德斯半岛地衣与苔藓植被的分布与有机质积累比较

Table 2 Comparisons of distribution and OM accumulation between lichen- and moss-dominated vegetation in the maritime Antarctic

植被类型	地衣植被		苔藓植被	
	山地夷平面	山坡及平地	坡底及山麓	海滩、潮间带,河畔
地表植被状况	良好,盖度 50%~95%	较差,盖度 < 40%。	斑块状,盖度 > 90%。	条带状,盖度> 90%
凋落物状况	一般有 < 3 cm 的凋落物层;有机质分解微弱。	一般无明显凋落物层。	有较明显凋落物层,分解状况强于地衣土壤,无泥炭形成。	一般无凋落物层。
土壤表层有机质一般性状	有较明显的有机表层,有机物有分解现象,色调与下伏土层相比明显较暗。暗色表层一般厚约 3cm,极少超过 5 cm。	表层土壤一般没有明显的有机质积聚现象,表层颜色与下伏土层差别不大。	有明显的有机质积聚表层和较深厚的根系活动层,有机质分解现象明显,有机质积聚层与根系活动总厚度多超过 5 cm 但颜色与下伏土层差别不明显。	有较为发达的根系活动层,但表层并无明显的有机物质积聚现象。
土壤表层的有机质含量水平	表层有机质含量丰富,范围在 30~200g/kg 之间。	表层有机质含量远低于山顶夷平面发育的地衣植被土壤,很少超过 20g /kg。	有机质含量较丰富多在 30~50 g/kg。	有机质含量一般在 10~20 g/kg。

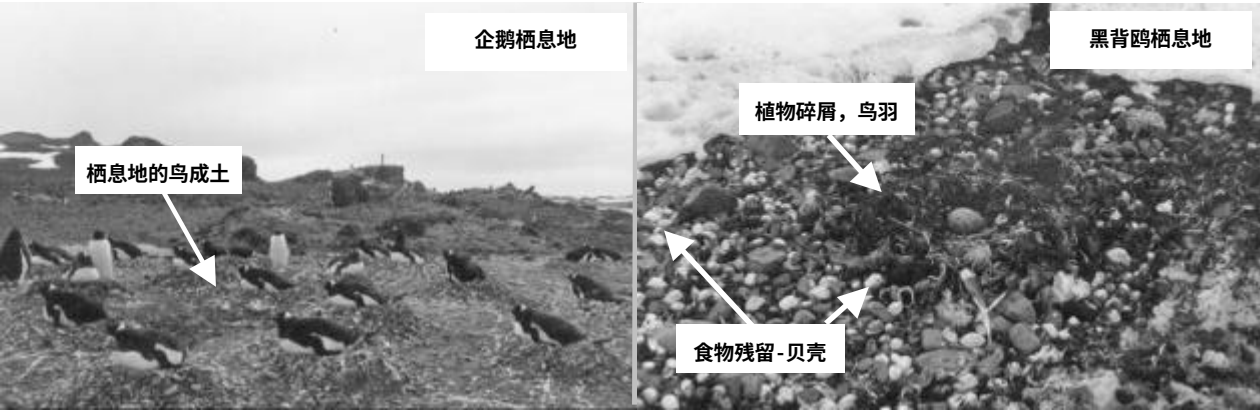


图 2 南极海洋性气候区海鸟栖息地景观(乔治王岛菲尔德斯半岛)

Fig. 2 The rookery landscapes of penguins and black-back gulls in the Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic

表 3 南极海洋性气候区企鹅、黑背鸥栖息地有机物质积聚状况比较

Table 3 Comparison of organic matter Accumulation on the rookeries of penguins and black-back gulls in the Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic.

有机质状况	海鸟栖息地类型	
	企鹅	黑背鸥
栖息地一般情况	距离海岸线较近,栖息地集中连片,且多为常年性栖息场所,地表几乎没有植被。	距离海岸线差异很大,分布范围较广,多位于山顶孤立而不连片,多为临时性栖息场所,地表植被条件通常教好。
土壤有机质积聚表层厚度与有机质含量水平	有机质积聚表层较薄,一般不超过 5 cm (含新鲜未分解有机物);表层土壤有机质含量一般 > 100 g/kg。	有机质积聚表层较深厚,约 10 cm 左右;土壤有机质含量一般 < 100 g/kg。
有机质分解状况与有机质积聚表层形态特征	有机质有明显分解现象;有机物积聚表层上部有灰白色结壳,除少量鸟羽和新鲜排泄物外,其它有机物质难以辨认;土层压实现象明显,土壤颗粒与有机物质黏结良好,土层由上至下颜色由黑褐转为粉红。	与企鹅栖息地相比,地表干燥,有机质分解状况较差,有机物质积聚表层中含有大量未分解和半分解的贝壳,约占土体总体积的 30% 左右,另有未分解的植物残体,表土层松软,颜色单一,以淡色调为主。

3 土壤有机质的含量特点

南极海洋性气候区生物活动受小地形、坡向、地表稳定性、水分条件与光照条件等微域环境因素的强烈影响,不同土壤之间有机质含量水平差异巨大为本区有机质积聚作用的最大特点。对乔治王岛主要土壤的有机 C、全 N 储量估算结果显示,某些鸟成土平均有机 C 储量高达 38872 g/m²,分别为弱发育正常冻土和石质土有机 C 储量的 18.7 倍和 17.6

倍;平均全 N 储量为 3560 g/m²,分别为弱发育正常冻土和石质土全 N 储量的 10.6 倍和 13.3 倍。即使同一土壤类型,由于发育的微域因素不同,有机质积聚作用强度差异巨大,土壤个体有机质含量水平同样相当悬殊。就乔治王岛主要土壤有机 C 和总 N 储量总体水平而言,最大平均值与最小平均值之间相差数十倍,其中潮湿扰动冻土之间,不同土壤个体最大与最小有机 C 和总 N 储量相差近 50 倍^[5]。

表 4 南极海洋性气候区乔治王岛主要土壤 C、N 储量^[5] (g/m²)

Table 4 Carbon and nitrogen storage in soils of the King George Island, the maritime Antarctic

类 型	样本数	有机全 C (TOC)			全 N (N _t)			C/N		
		最低	最高	平均	最低	最高	平均	最低	最高	平均
总体水平	17	88	38872	6172	20	5121	888	3	11	7
弱发育正常冻土	7	252	5490	2080	49	908	336	3	11	7
扰动冻土	6	214	38872	10538	40	5121	1333	4	10	7
潮湿扰动冻土	1	—	—	280	—	—	75	—	—	4
灰土	2	3655	5490	4573	497	655	576	6	11	9
石质土	4	88	6821	2212	20	743	267	4	9	6
鸟成土	3	18176	38872	25266	2154	5121	3560	5	9	7

大多数土壤在下部土层(心土甚至底土层)内有机质的出现说明两个问题。一是有机质在土壤形成、发育过程中在剖面内部的迁移(translocation)与重新分配(re-distribution),二是成土母质中含有残积有机质。南极海洋性气候区,至少两种土壤过程对有机质在剖面中的迁移与重新分配产生重要影响:冻扰(cryoturbation)和灰化作用(podzolization)。通过冻扰作用,表层有机质被翻转,埋葬于下部土层,这是一种在南极海洋性气候区土壤发育过程中相当常见的现

象,尤其以发育在新近沉积物上的、土层较为深厚、地表植被稀疏的冻土纲土壤最为明显。以这种形式进入剖面下层的有机质分解状况较差,基本保留表层有机质物质组成与性状。表层有机质伴随灰化作用进入土壤下部土壤实质上是自由水参与的一种淋溶作用,以这种方式进入剖面下层的有机质一般为水溶性或酸溶性,腐殖质化现象明显。在南极海洋性气候区,伴随自由水沿土壤较大裂隙发生物理性渗漏也是土壤有机质发生移动的因素之一(图 3)。

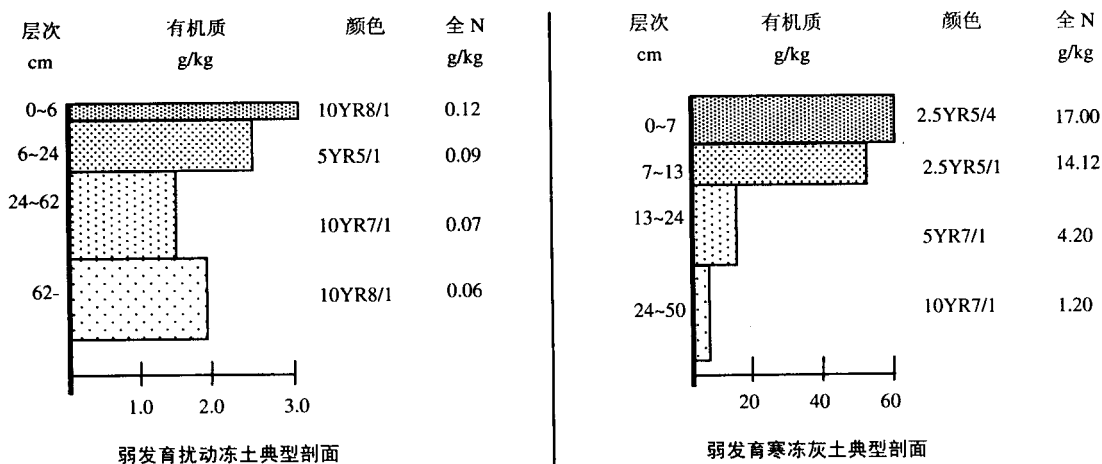


图 3 南极海洋性气候区有机质在剖面中的分布特征

Fig. 3 Typical distribution patterns of soil organic matter (SOM) within profiles of some soils in the maritime Antarctic

南极海洋性气候区土壤剖面中不同部位积累的有机物质并非全是当前土壤发生过程的产物。土壤有机质组成 ^{13}C -NMR 分析结果显示, 只有部分样品中有机质的烷基 C (alkylic C) O-烷基 C (O-alkylic C) 芳香 C (Aromatic C) 和羧基 C (Carboxylic C) 的构成关系与当前地表生物活动产生的有机质具有显著相关性^[4]。土壤异源的有机物质 (heterogeneous organic matter) 可能的 3 种来源一是土壤发生过程中的外来有机质 (extraneous materials), 如鸟粪和风力搬运的异地植物凋落物; 二是以往风化与成土过程中有机质积累的产物, 三是地质过程中形成的矿物富含有机 C, 如无烟煤 (anthracite) 等^[6]。

有机质积累过程强烈的土壤表层一般呈酸性, pH 在 4.0~6.2 之间。多数灰土或灰化作用强烈的土

壤中, 灰化淀积层 Bh (spodic horizon) 发育明显。在 Bh 中, 有机-金属螯合物 metallo-organic compounds (以 Fe、Mn 螯合物为主) 大量出现, 矿物颗粒有胶膜发育。在企鹅遗弃栖息地发育的灰土, 土壤酸性特征较弱, C/N 率较低, 有机质和有机-金属化合物以芳香族化合物特性 (aromaticity) 明显的腐殖酸 (humic acids) 和腐殖酸盐 (humates) 为主, 这与温带地区灰土中普遍以富里酸 (fulvic acids) 和富里酸盐 (fulvates) 为特征的有机质转化迁移过程有很大不同。发育于南极海洋性气候区海鸟栖息地土壤有机 P 含量非常高, 鸟粪石 ($\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、氟磷灰石 ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)、水磷铝钾石 (minyulite) 等 10 多种次生磷酸盐形成于这类土壤的成土过程中 (图 4)^[7~9]。

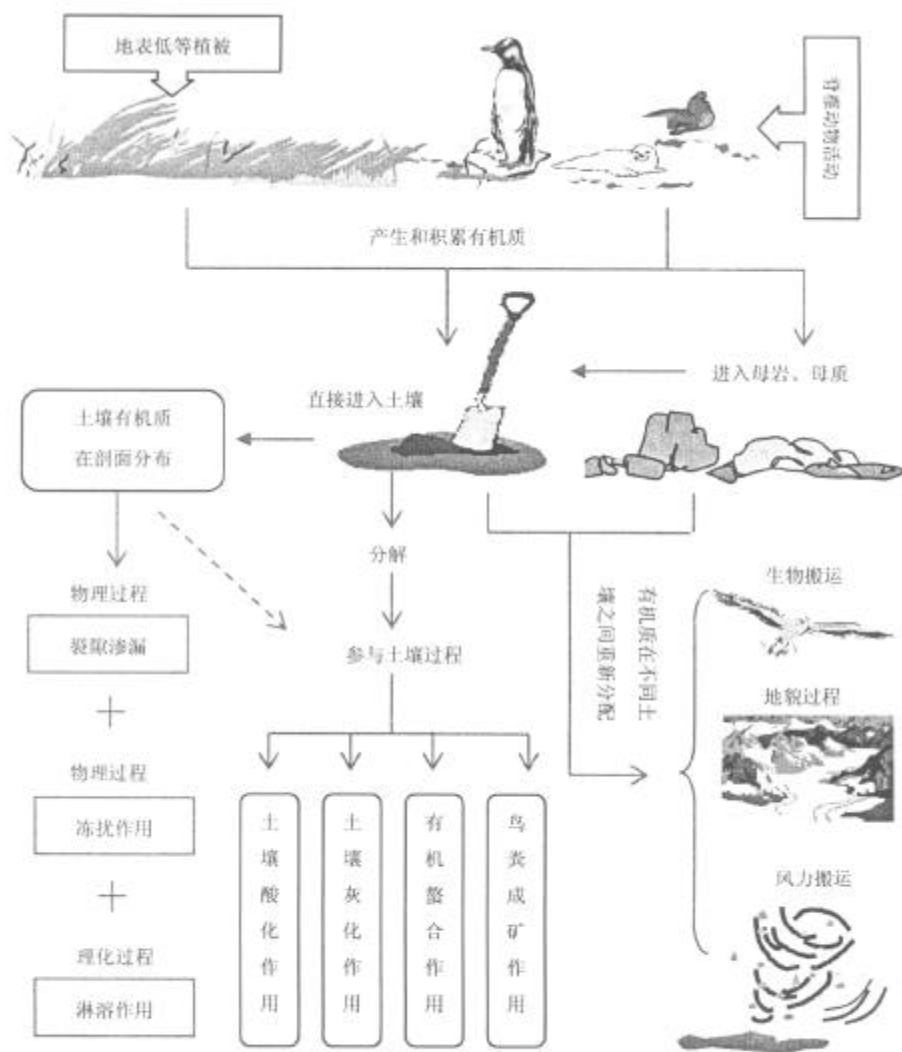


图 4 南极海洋性气候区土壤有机质积累过程与特点

Fig. 4 Accumulation of soil organic matter (SOM) and its particularities in the maritime Antarctic

4 主要结论

(1) 南极海洋性气候区土壤有机质积累作用相当强烈，土壤有机质 C、N 贮量水平与北极苔原带地区以及我国高纬度、高海拔地区分布的土壤具有可比性；

(2) 成土过程中有机质的主要来源为以地衣、苔藓为优势植物的低等植被的生长和以企鹅、贼鸥为主的海洋脊椎动物的活动；

(3) 冻扰作用、灰化作用以及物理性裂隙渗漏是土壤有机质在剖面中的迁移和重新分配的主要机制。不同土壤以及同一土壤的不同层次有机质分解程度差异极大；

(4) 某些土壤有机质并非当前地表生物活动的产物，土壤异源有机物质出现的原因包括鸟粪和风力搬运的异地植物凋落物、以往风化成土过程中的有机质积累以及母质、母岩中存在富含有机 C 的矿物；

(5) 生物活动与土壤有机质积累是导致土壤呈酸性反应的原因之一，此外，有机质参与土壤的灰化过程。证据表明，某些土壤中有明显有机-金属螯合物形成与迁移现象以及有机质参与的成矿作用。

参考文献

- 1 Chen J, Gong ZT and Blume HP. Soils of Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic: Part I. Formation processes and Pedogenetic particularities. Chinese Journal of Polar Science, 2000, 11(1): 25~38
- 2 Kappen L. Lichens in the Antarctic region. In: Friedmann EI. ed. Antarctic Microbiology. New York, Wiley-Liss Inc.,

1993, 433~490

- 3 Myrcha A and Tatur A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. Pol. Polar Res., 1991, 12: 3~24
- 4 Blume HP, Beyer L, Kalk E and Kuhn D. Weathering and soil formation. In: Beyer L and Boelter M. eds. Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes. Ecological Studies, Vol. 154. Berlin, Springer-Verlag, 2002, 115~138.
- 5 Beyer L, White DM, Blume HP, Boelter M, Kuhn D, Pingpank K and Vogt B. Refractory Soil Organic Matter-Formation, Accumulation, Translocation and Transformation. In: Beyer L and Boelter M. eds. Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes. Ecological Studies, Vol. 154. Berlin, Springer-Verlag, 2002, 140~159
- 6 Campbell IB and Claridge GGC. Antarctic soils, weathering processes and environment. Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1987, 87~95
- 7 Blume HP, Beyer L, Boelter M, Erlenkeuser H, Kalk E, Kneesch S, Pfisterer U, Schneide D. Pedogenic zonation in soils of the southern circumpolar region. Adv. GeoEcol., 1997, 30: 69~90
- 8 Gressitt JL and Shoup J. Ecological notes on free-living mites in North Victoria Land. In: Gressitt JL. ed. Entomology of Antarctica, Am Geophys. Union Antarct. Res. Ser. 10. 1967, 307~320
- 9 Kuhn D. Genese. Ökologie und Soziologie einer Bodengesellschaft in einem Periglazialgebiet der King-George-Insel (West-Antarktis). Schriftenreihe Inst. Pflanzenem., Bodenk. Univ. Kiel, Nr. 40, 1998, 36~129

SOILS IN THE MARITIME ANTARCTIC II. ORGANIC MATTER ACCUMULATION

Chen Jie¹ Gong Zitong¹ Blume HP²

(¹ Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

² Institute of Plant Nutrition and Soil Science, University of Kiel, Kiel D-24098 Germany)

Abstract Significant accumulation of soil organic matter play an important role in shaping soil characteristics during soil-forming processes in the maritime Antarctic, e.g. in soil acidification, podzolization, formation of metallo-organic compounds and biogenetic minerals. Resulting from difference in intensity of biological activities on the surface ground, contents of total organic carbon and nitrogen amongst soils developed in the sites with different micro-environmental features differ greatly. The studies indicate that cryoturbation, podzolization and leakage are main processes that lead to translocation and re-distribution of soil organic matter within a profile.

Key words Antarctic, Soil, Soil-forming process, Organic matter accumulation