

# 南极半岛海洋气候区的土壤

## · 鸟成土

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** 以强烈生物活动参与和外源有机质输入为发生学基础、以鸟粪矿化与下部岩石层磷化作用为主要发生学过程的鸟成土在南极海洋气候区广泛分布,形成独特的海岸带土壤景观。本文对南极海洋气候区内鸟成土的发生学特点、剖面形态特征、新成矿物主要类型及其发生机制进行了论述;对鸟成土随栖息地遗弃向残积鸟成土演变的过程进行了阐述。在上述基础上,论述了本区内鸟成土在发生、发育与演化过程中相对于南极其他地区鸟成土所表现的特殊性。

**关键词** 南极;鸟成土;企鹅栖息地;鸟粪;磷化作用

**中图分类号** S153

海洋脊椎动物栖息地、尤其是海鸟栖息地(rookeries)沿海岸带广泛分布于南极大陆滨海和南极半岛地区的海滩、滨海冲积扇及岩屑坡(talus slope),分布海拔从几米到数百米。发育在鸟类栖息地鸟粪层上、受生物活动强烈的土壤习惯上称为鸟成土(ornithogenic soils或ornithosols),是南极地区,尤其是南极海洋气候区一种重要的土壤类型。“鸟成土”这一名称是由 Syroechkovsky 最早提出并用以描述南极地区这种特殊土壤发生学类型的,现在已广为接受和使用<sup>[1]</sup>。

与其他土壤相比,鸟成土是南极地区研究较为深入和详细的土壤类型,其原因不仅在于它特殊的土壤发生学意义,更在于它在南极陆地生态系统结构、功能研究以及地貌、地质事件测年研究方面的特殊作用<sup>[2]</sup>。海洋鸟类在海岸带通过筑巢、脱毛、孵卵、哺育活动,把外源有机质及矿质营养元素带入栖息地,在影响土壤发育与演变的同时,为陆地低等植物提供了新的生境,陆地生态系统的结构随之发生改变。而生态系统的形成、维持及演变与地质活动历史密切相关。始新世至渐新世之间的古气候变化导致新的极地环境以及与现在相近的古海洋生态系统的形成,而第四纪以来的气候波动造成南极无冰区(ice-free areas)在面积、形状、分布以及延存时间等方面的变化,并最终制约海洋脊椎动物进入陆地的途径以及对陆地生态系统的影响程度<sup>[3,4]</sup>。

因此,鸟成土形成与演化方面的深入研究对揭示南极地区环境演变过程具有重要意义。

在南极海洋气候区,尽管贼鸥(skua gull)黑被鸥及巨海燕(giant petrel)等其他鸟类栖息地的土壤也具有明显的外来有机质输入和较为强烈的扰动作用,甚至形成弱发育的鸟成土,但总体而言,本区的鸟成土主要发育在企鹅尤其是阿德雷企鹅(*Pygoscelis adeliae*)栖息地。由于南极海洋气候区相对较高的气温和较为优越的自由水分条件,本区鸟成土在土壤形成过程、发育程度、形态特征、生物学与矿物学性状等方面与南极其他地区分布的鸟成土均有明显差异。

### 1 发生学特点与一般剖面形态

企鹅栖息地鸟成土的发生、发育开始于地表的扰动和外来物质的进入。在筑巢阶段,大量碎石被企鹅带入栖息地,在地表形成富含砾石(>30%)的异源物质层,原来的土壤和植被遭受破坏。同时,企鹅以粪便(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、以富含有机磷为特征的有机物质输入栖息地,为鸟成土的形成和发育提供了最重要的物质基础。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气候区陆地生态系统中的海洋有机磷总数量大约在 $(1.5\sim 2.0)\times 10^4\text{t}$ 之间。在乔治王岛的栖息地,

每年的企鹅哺育期间 (breeding period) 输入的排泄物干重可达  $10 \text{ kg/m}^{[5,6]}$ 。

典型的鸟成土剖面从上至下一般由鸟粪层 (gano) 和磷化层 (phosphatized horizon) 两个基本层次构成。鸟粪层厚度在几至几十厘米之间, 上部通常见灰白色有机结壳 (10YR8/2~10YR7/3), 呈纤维状薄平外观, 与下伏物质有清晰边界。在南极海洋气候区企鹅栖息地上发育的鸟成土, 鸟粪层一

般可划分为新鲜鸟粪层 (未分解鸟粪层) 和淋溶鸟粪层, 这一特点明显有别于南极其他地区的鸟成土。新鲜鸟粪层颜色较深而鲜艳 (7.5YR6/4~7.5YR6/6), 其主要成分为矿化的企鹅排泄物、尿酸盐 (urates) 氟磷灰石 (fluorapatite), 时有鸟粪石 (struvite) 出现; 淋溶鸟粪层颜色总体相对较浅, 但不均一, 主要由氟磷灰石和风化壳质素碎屑 (chitin detritus) 组成。海洋气候区鸟粪层的基本理化性状见表 1。

表 1 菲尔德斯半岛发育于企鹅栖息地上的鸟成寒冻粗骨土基本性状

Table 1 Properties of onithogeni-gelic regosol formed on a penguin rookery, Fildes Peninsula, King George Island, the maritime Antarctic.

土层编号	深度 (cm)	颜色	砾石含量 (g/kg)	砂粒含量 (g/kg) *	粉粒含量 (g/kg) *	粘粒含量 (g/kg) *	pH 水提	有机 C (g/kg)	
									24D-3-1
24D-3-2	3~8	7.5YR6/6	771.0	541.0	304.0	155.0	7.19	69.68	
土层编号	深度 (cm)	C/N	代换性盐基 (cmol/kg)				CEC (cmol/kg)	CaCO <sub>3</sub> (g/kg)	交换性 Al (cmol/kg)
			Ca	Mg	K	Na			
24D-3-1	0~2	4.01	6.06	5.53	6.79	3.52	39.19	-	56.41

磷化层的厚度随栖息地地表风化物类型、基岩破碎程度、自由水分状况、鸟成土发育程度的不同而存在很大差异, 一般在几十厘米到几米之间。在磷化层内部, 岩性类型、结构状况、酸碱环境等因素的变化导致磷化作用以不同的方式进行, 造成产物的多样化, 并形成矿物性状具有明显差别的带状层理。

## 2 矿化作用与成土过程

微生物参与的表层企鹅粪矿化作用 (guano mineralization) 和下伏岩石层的磷化作用 (phosphatization) 是主导鸟成土形成与发育的两个关键过程。南极海洋气候区由于较高的气温和相对丰沛的降水, 致使自由水分在鸟成土发育过程中的活跃程度远比南极其他地区高, 鸟粪沥出物 (leachates) 得以随下行水流的淋溶与渗透作用影响下部土体, 并与基岩及其碎屑 (rock clast) 发生反应。因此, 南极海洋气候区内形成的鸟成土在土体深度、发生层次、剖面形态特征、矿物学性质等方面与南极其他地区、尤其是干燥的南极内陆地区发育的鸟成土存在显著差别。

### 2.1 鸟粪矿化作用

细菌学、酶学以及化学分析结果表明, 南极海洋气候区企鹅栖息地鸟粪的微生物矿化作用非常活

跃<sup>[7,8]</sup>。尽管鸟成土中微生物生物量的总体水平并不高, 但却是有有机物质分解过程的关键控制因素。细菌是鸟成土微生物群系中的绝对优势土壤微生物种, 其生物量占活跃栖息地 (active rookeries) 土壤微生物生物总量的 90% 以上, 在鸟粪层有机物矿化过程中具有非常重要的作用<sup>[9, 10]</sup>。不同生理特性的细菌种群参与了包括蛋白质水解 (proteolysis) 氨化 (ammonification) 硝化 (nitrification) 作用以及卵磷脂、壳质素降解 (lecithin and chitin degradation) 和磷酸钙溶解作用<sup>[10]</sup>。

研究表明, 在南极气候最温暖地区, 企鹅排泄物在 1 周时间内就有 50% 左右的有机碳通过挥发作用进入大气, 而在南极海洋气候区的乔治王岛地区需要 2~3 周时间<sup>[7]</sup>。企鹅排泄物分解的第一阶段主要为蛋白质水解作用、氨化作用以及有机磷酸化合物水解作用, 而硝化作用则发生于可溶性有机物分解过程和鸟粪溶液铵离子浓度下降之后, 一般在企鹅扰动层下部边界以下土体内进行。有机物质经过第一阶段分解和矿化作用之后, 其 C/N 并未发生显著变化, 继续维持其较低水平。壳质素是鸟粪的主要组成物质, 大约占新鲜企鹅排泄物的 1/3。经有机质分解与矿化作用, 壳质素在鸟粪中的比重增加, 与各种尿酸盐 (urates) 与矿质磷酸盐构成鸟成土中的鸟粪层 (图 1)。鸟成土中的酶活性如蛋白酶

(protease) 冬酰胺酶 (asparaginase) 尿酸水解酶 (uric acid hydrolase) 远高于同一地区的其他土壤类型, 而新鲜企鹅排泄物中微生物是鸟成土有机质层

的主要酶源<sup>[7]</sup>。酶活动参与的尿酸盐、有机磷酸化合物等的分解与矿化过程主要发生在排泄物初始分解阶段之后<sup>[11]</sup>。

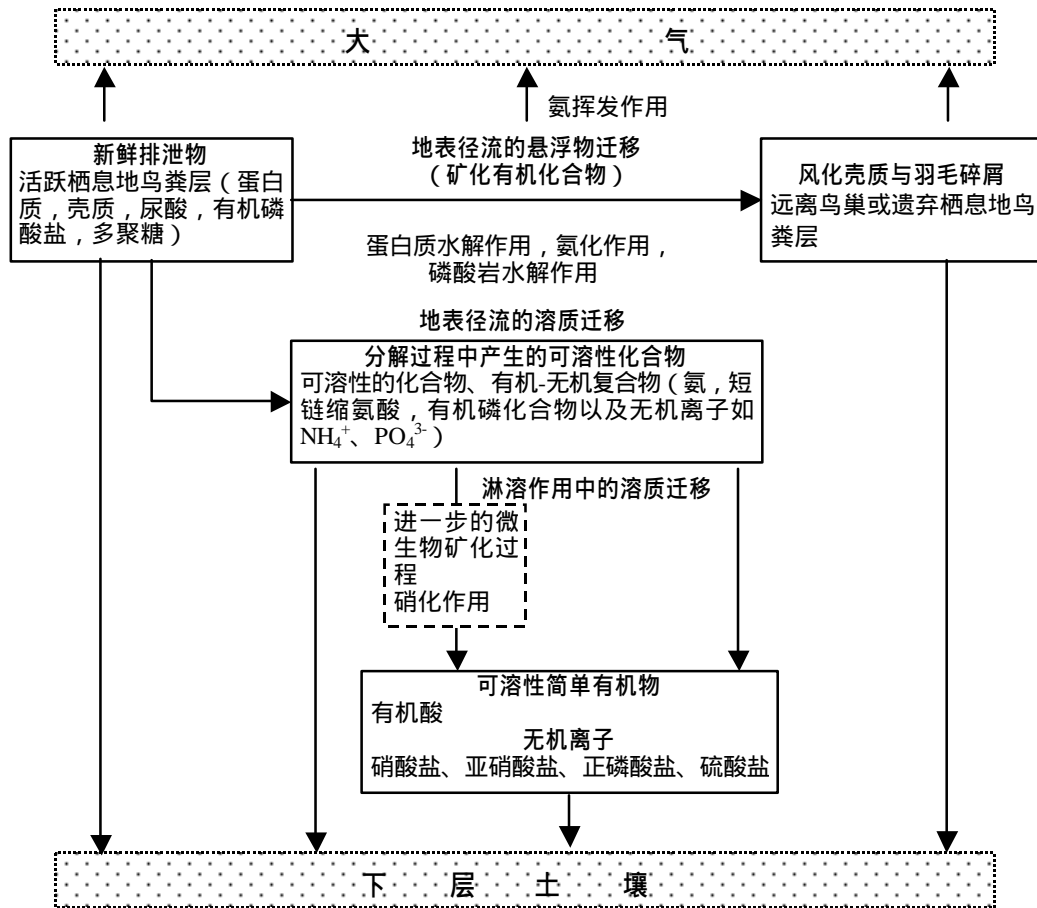


图 1 鸟成土中鸟粪矿化作用示意图

Fig. 1 A sketch showing guano mineralization in ornithogenic soils

## 2.2 磷化作用与矿物形成

磷化作用是指表层磷酸盐沉积物风化过程中产生的风化液在磷化岩石层 (phosphatized rock zone) 内发生磷置换 (phosphorus emplacing) 并生成磷酸钙和铁-铝磷酸盐的过程。磷化作用原是一个岩石学术语, 多用于描述温带地区的鸟成沉积与鸟成磷矿<sup>[12~15]</sup>。在南极海洋气候区的鸟成土形成与发育过程中, 上部鸟粪层是风化对象, 同时也是剖面下部物质风化的策动因素, 产生的沥出液与土壤及岩石矿物质的反应过程非常复杂。首先, 沥出液 pH 值由于在土壤环境中受氨化、硝化过程、有机质分解产生有机酸 (草酸) 以及细菌参与的硫化物氧化产生硫酸等因素的影响, 在剖面的不同部位具有明显变化。同时, 不同岩性的岩石与土壤矿物质发生磷化作用所要求的酸碱环境有很大差异, 因此, 土壤发

生层中铁铝磷酸盐性状、在剖面中垂直分布模式与鸟粪分化液到达相应部位时的酸碱反应密切相关<sup>[3]</sup>。

南极海洋气候区发生在鸟成土剖面中的磷化作用一般包括 3 种模式。首先, 鸟粪沥出液在淋溶与渗漏过程中与较易溶解的硅酸盐矿物发生反应, 在土壤矿物质表面生成磷酸盐胶膜, 如鸟成土中常见的无定形磷酸铝胶膜。其次, 是所谓的交代变质作用 (metasomatism), 这一过程极少液相物质参与, 最终在原来硅酸盐矿物和生物器官侵入体的基础上形成磷酸盐结晶。最后, 为所谓的异质溶解作用 (incongruent dissolution)。随着鸟成土发育程度与土壤年龄的增加, 这一过程是鸟成土剖面中最普遍的磷化模式, 其实质是原生的复合铁-铝磷酸盐遭受溶解, 释放  $K^+$ 、 $NH_4^+$  离子, 蚀变为无定形磷酸铝的

过程。而生成的无定形磷酸铝以胶膜的形态包被于复合磷酸盐表面，保护其免遭进一步的快速溶解。鸟粪周期性的沥出液淋溶作用是这一过程赖以发生的基础，但随着复合铁-铝磷酸盐的溶解和为无定形磷酸铝的生成，异质溶解过程逐渐趋缓。

由于不同栖息地在年龄、土壤矿物质和母岩岩

性、有机质输入强度与性状、自由水分状况等方面的差异，不同鸟成土中磷化作用的强度与程度、产生次生磷酸盐的矿物学种类与形状以及剖面形态特征等方面有很大不同。图 2 为基岩为玄武-安山岩的鸟成土磷化过程中所产生磷酸盐的主要类型、分布特征与演化途径<sup>[3]</sup>。

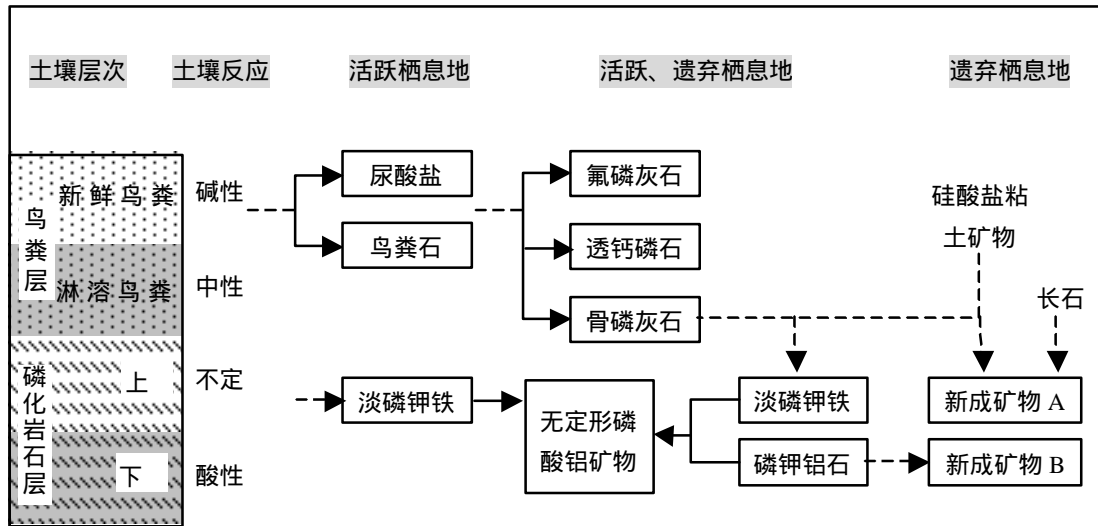


图 2 鸟成土内磷酸岩矿物剖面垂直分布与演化

Fig. 2 Vertical distribution and temporal evolution of phosphate minerals in ornithogenic soil

### 3 遗弃栖息地与残积鸟成土

气候变化和地貌环境演变导致南极企鹅频繁的迁徙和栖息地变动，新栖息地形成的同时，原来的栖息地被遗弃。在较为干旱的南极地区，栖息地被遗弃后鸟成土迅速失去绝大部分的水分含量，有机质的氧化作用导致鸟粪层硬化。随着时间的推移，硬化层内部尚未氧化的有机质逐渐分解，有机质含量和 C/N 持续下降。同时，土壤粘粒和粉粒中的磷酸钙也开始缓慢分解，无机粘土矿物表面则被无定形的壳类风化残留物包被。企鹅活动停止后，鸟成土发育过程中断，土壤开始向栖息地形成前原有的土壤类型逆向演化。由于表层中含有大量异源砾石，鸟成土不能完全恢复原有土壤的全部性状，而是形成残留部分鸟成土发生学特征的土壤类型，即残积鸟成土 (relic ornithogenic soils)<sup>[2]</sup> (图 3)。

在南极海洋气候区，遗弃栖息地 (abandoned rookeries) 上鸟成土向残积鸟成土的演化过程以及残积鸟成土的性状特征与南极干旱地区有明显不同。首先，由于本区较为丰沛的降水和较好的地表

自由水分状况，鸟成土鸟粪表层脱水氧化与硬化现象极少发生，而是在地表径流和侧渗、下渗水流的作用于短时间内侵蚀、淋洗殆尽。残留于松散砾石间的鸟粪有机质中壳质素物质分解，导致 C/N 由新鲜鸟粪的 1~2 上升到残留有机质的 5 以上。由于在鸟粪矿化过程中形成的氟磷灰石极难分解，残留有机质中 C/P 率一般仅上升 1 倍左右，而容易分解的鸟粪石在残积鸟成土表层中很少发现<sup>[3, 16]</sup>。鸟粪层消失之后，地表常见富含复合铁-铝磷酸盐的浅色粘土矿物。鸟成土发生性磷酸盐中水磷铝钾石 (minyulite) 最易分解，因此在残积鸟成土已不复存在，淡磷钾铁矿 (leucophosphite) 的含量也大为减少。相反，蓝铁矿 (vivianite) 和磷酸铝的含量却比鸟成土明显提高<sup>[3]</sup>。

鸟粪层遭受侵蚀后，本土低等植物 (autochthonous microflora) 在遗弃企鹅栖息地地表的快速着生是南极海洋气候区残积鸟成土形成过程不同于南极其他地区的重要因素。低等植被在遗弃栖息地的生长与演替一般从嗜氮的石生壳状地衣开

始 (nitrophilous species of epilithic crustaceous lichens), 由于土壤 N、P 等营养元素含量丰富, 逐渐演变成以枝状地衣 (Fruticose lichens) 为优势种的茂密植被<sup>[16]</sup>。于是, 由植被凋落物形成的、C/N、C/P 远高于鸟粪的地表有机质层开始出现, 有机质层的形成和发育, 从根本上改变了鸟成土原来的发展与演化方向 (图 3)。

由于较为活跃的土壤自由水分活动和较强烈的淋溶作用, 南极海洋气候区内鸟成土鸟粪沥出物在剖面中的影响深度以及下部磷化层的厚度远大于南

极其他地区。在向残积鸟成土的演变过程中, 磷化层作为一个特殊的发生层次, 将在以后的土壤发育过程中对土壤形态特征和矿物学特性产生持久影响。随着土壤演变进程的发展, 磷化层中矿物发生溶解与重结晶作用以及淋淀行为。同时, 磷化层可能因外力如冻扰作用、冻融分选过程、泥石流运动发生分割、破碎、搬运, 作为特殊的土壤发生学产物, 磷化层物质因而对土壤发生、发育及演化的影响不仅局限于某个特定剖面, 而是整个区域的土壤。

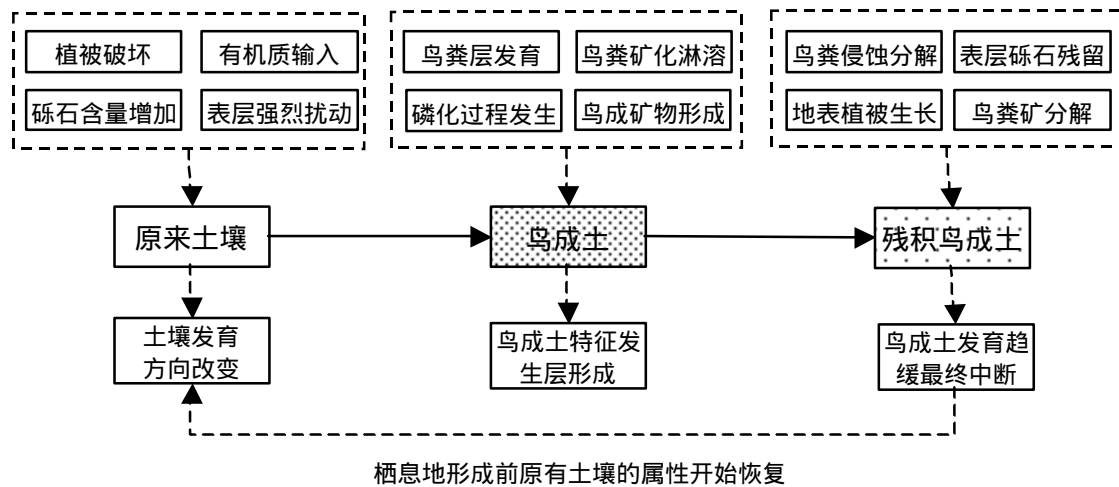


图 3 企鹅栖息地土壤演化过程示意图

Fig. 3 Soil evolution in rookeries driven by alternation of colonization and abandonment

#### 4 主要结论

(1) 南极海洋气候区是南极鸟成土分布最集中的地区, 本区的鸟成土在土壤形成过程、发育程度、形态特征、生物学与矿物学性状等方面与南极其他地区分布的鸟成土均存在明显差异。

(2) 强烈的生物活动参与和外源物质输入是鸟成土最基本的发生学特点, 鸟粪层和磷化层是鸟成土剖面中最基本的发生层次; 土壤背景、成土年龄、生物活动强度等方面的差异导致不同鸟成土的发生学性状有很大差异。

(3) 微生物参与的表层鸟粪矿化作用和下伏岩石层的磷化作用是主导鸟成土形成与发育的两个关键过程。南极海洋气候区内鸟成土鸟粪层的分解速率、鸟粪分解沥出液的影响深度、以及磷化层的厚度都远大于南极其他地区。

(4) 鸟成土中新生矿物的形成和演化与土壤环境、母质与母岩的岩性在剖面的分异密切相关, 不

同的矿物形成于不同的发生层次和剖面部位。

(5) 鸟粪层的快速侵蚀、低等植被的生长演替、磷化层对土壤性质的持续影响是南极海洋气候区内遗弃企鹅栖息地残积鸟成土形成过程中显著不同于南极其他地区的重要特点。

#### 参考文献

- 1 Syroechkovsky EE. The role of animals in the formation of primary soils under the condition of circumpolar regions of the earth (Antarctica). *Zoolog. Zhur.*, 1959, 38: 1770 ~ 1775
- 2 Campbell IB, Claridge GGC. *Antarctic soils, weathering processes and environment*. Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1987, 215 ~ 220
- 3 Tatur A. Ornithogenic ecosystems in the maritime Antarctic – formation, development and disintegration. In: Beyer L, Boelter M. eds. *Geoecology of Antarctic Ice-free*

- Coastal Landscapes. Berlin, Springer-Verlag, Ecological Studies, 2002, 154: 161 ~ 184
- 4 陈杰, 龚子同, Blume HP. 南极半岛海洋气候区的土壤 . 有机质积累过程. 土壤, 2003, 35 (5): 364 ~ 369
  - 5 Myrcha A, Tatur A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. Polish. Polar Research., 1991, 12: 3 ~ 24
  - 6 Tatur A, Myrcha A. Ornithogenic soils on King George Island, South Shetland Islands (maritime Antarctic). Polish. Polar Research, 1984, 5: 113 ~ 125
  - 7 Pietr SJ, Tatur A, Myrcha A. Mineralization of penguin excrements in the Admiration Bay region (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). Polish Polar Research, 1983, 4:97 ~ 172
  - 8 Myrcha A, Pietr SJ, Tatur A. The role of pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: Siefried WR, Condy PR, Laws RM. eds. Antarctic nutrient cycle, food webs. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1985, 156 ~ 162
  - 9 Ramsay AJ, Standard RE. Numbers and viability of bacteria in ornithogenic soils of Antarctica. Polar Biology, 1986, 5: 195 ~ 198
  - 10 Boelter M, Blume HP, Schneide D, Beyer L. Soil properties and distribution of invertebrates and bacteria from King George Island (Arctowski Station), maritime Antarctic. Polar Biology, 1997, 18: 295 ~ 304
  - 11 Boelter M, Kandeler E, Pietr SJ, Seppelt RD. Heterotrophic microbes, microbial and enzymatic activity in Antarctic soils. In: Beyer L, Boelter M. eds. Geoecology of Antarctic Ice-free Coastal Landscapes. Berlin, Springer-Verlag, Ecological Studies, 2002, 154: 189 ~ 207
  - 12 Altschuler ZS. The weathering of phosphate deposits-geochemical and environmental aspects. In: Griffith EJ, Beeton A, Spencer JM, Michell DT. eds. Environmental phosphorus handbook. London: Wiley, 1973, 33 ~ 96
  - 13 Flicoteaux R, Lucas J. Weathering of phosphate minerals. In: Niagru JO, Moore PB. eds. Phosphate minerals. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1984, 292 ~ 317
  - 14 Gong ZT, Huang B. Geochemistry of soil formation in South China Sea islands. Pedosphere, 1995 5(4): 333 ~ 342
  - 15 龚子同, 刘良梧, 周瑞荣. 南海诸岛土壤的形成和年龄. 第四纪研究, 1996, 16 (1): 88 ~ 95
  - 16 Tatur A, Myrcha A, Niegodzis J. Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in maritime Antarctic. Polar Biology, 1997, 17: 405 ~ 416

## SOILS IN THE MARITIME ANTARCTIC . ORNITHOGENIC SOILS

CHEN Jie    GONG Zi-tong

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

**Abstract** Characterized by strong biological participation and input of extraneous organic matter in the surface layer, ornithogenic soils in penguin rookeries are formed through the pedogenic processes dominated by mineralization of guano and phosphatization of underlying rock. In this paper major pedogenic, characteristics, morphologic profile features, mineral formation and distribution patterns of ornithogenic soils in the maritime Antarctic were expounded, and process of the soils in the abandoned rookeries evolving towards relic ornithogenic soils was demonstrated. Meanwhile, in comparison with ornithogenic soils in other places outside the maritime Antarctic, the soil in this region exhibited some particularities in soil-forming and evolutionary processes, and in morphology and mineralogy.

**Key words** Antarctica, Ornithogenic soils, Penguin rookery, Guano, Phosphatization