

南极 Davis 站地区晚更新世以来 沉积环境的演变

谢 又 予

(中国科学院地理研究所, 北京)

摘 要

本文论述了该区在晚更新世末次冰期中的间冰段时期(距今 50000—25000 年)为浅海沉环境, 后转变为冰融水环境, 在 31000—11000 年时, 本海积平原被冰川覆盖, 末次冰期以后(距今 6600—3500 年), 该区冰盖退缩形成湖泊与泻湖, 出现三次“似浊流”与两次冰融水相交替沉积, 在 2800 年新冰期时, 本区冰盖前进, 形成以普通角闪石为主, 次为石榴石与磁铁矿的巨砾夹粗砂的三道冰碛垄, 在此时段片理化阳起石、苏长岩的基岩上发育了硅铝-氯化物碎屑型风化壳。除寒冻物理风化作用外, 化学风化作用也十分明显。

南极是世界气候最寒冷而干燥的地区。风化作用的特点、冰期、间冰期时期沉积物的物理、化学特征的研究, 可为沉积学研究领域提供对比参数。而沉积环境的演化序列的研究则证实了晚更新世以来冰期、间冰期、气候最宜期及新冰期等重大气候事件的全球性意义。

本文所讨论的 Vestfold 丘陵区位于东经 $77^{\circ}55'$ — $78^{\circ}30'$ 与南纬 $68^{\circ}22'$ — $68^{\circ}40'$ 之间, 即东南极 Elizabeth 皇后地, Prydz 海湾的东侧, 澳大利亚的 Davis 站即位于本区中。

一、风化作用及其产物

南极是地球上最寒冷、风力作用最强烈的大陆, 冬季内陆温度可达 -65°C ^[1]。本区年均温为 -10.2°C , 冬季为 -40°C , 夏季极端最高温可达 13°C , 平均日较差夏季为 4°C , 冬季为 2°C 。年降水量为 70—130mm^[1]。因而本区冻融作用明显, 形成大量寒冻风化碎屑及特定的风化壳。

由于该区冰盖的扩张与退缩, 基岩有时处于气下风化状态, 有时又被冰体覆盖, 因而风化壳发育的时间受其限制, 不能形成明显的层状风化带, 而是仅以沿裂隙风化的形式出现。裂隙深仅 2m 左右, 基岩为片理化、阳起石苏长岩²⁾。

关于岩石在寒冻作用下形成裂隙的物理风化过程前人已有一些研究^[2-4]。看来低温是造成南极地区岩石产生物理风化作用的主要原因。尽管该区一年中只有 70—130mm 的降水量, 但冻结作用照样可使岩石产生裂隙, 并使裂隙中产生的风化碎屑有自下而上由粗变细的现象。

本文 1983 年 9 月 23 日收到, 1984 年 3 月 15 日收到修改稿。

1) 张青松, 南极东部维斯特福德丘陵区的地质与地貌, 1982。

2) 刘燕君, 南极东部维斯特福德丘陵区的岩石学研究, 1982。

寒冻作用是最强烈的物理风化过程。在此处还表现由基岩形成的石英小砂粒上。如粒径为 0.18mm 的石英颗粒,在扫描电子显微镜下可见到各式各样的石英表面的剥落过程,如从母岩上剥离下来后未经任何搬动的锯齿状石英砂(图版 I-1, 2);寒冻作用形成的裂纹(图版 I-3);以及石英表面剥落前形成的尚未落下的石英碎片(图版 I-4, 5)。

Whalley 和 Douglas 等于 1982 年专门论述了在寒冷气候下火成岩中裂隙的特征及发育过程,他们也通过扫描电子显微镜进行观察发现有显微裂隙存在^[1]。

关于风化壳发育过程中的化学风化问题,有一种看法认为多年冻结岩石是“化学宁静区”,是冻结岩石中的水分仅有冰和水蒸汽二种状态^[1]。根据我们对该风化壳的基岩以及风化碎屑物的矿物及化学分析结果来看,除了物理风化作用外,该区的基岩同样有化学风化作用存在。表现在风化壳中长石风化极迅速(图 1),基岩薄片中性长石含量高达 35%^[2],而向上不到 0.5m,长石含量减少为 3.3%;向上约 1m,只含 0.52%,甚至不含长石,此外辉石及紫苏辉石在基岩中占 30%^[1],但在风化碎屑中却很难见到。反映了化学风化作用与物理风化作用同时存在,既可形成风化的碎屑矿物,和风化的粘土矿物,但基性斜长石、辉石类、角闪石类等碎屑矿物在风化过程中往往终断在绿泥石阶段,云母终断在水云母阶段,但也有少量高岭石产生。

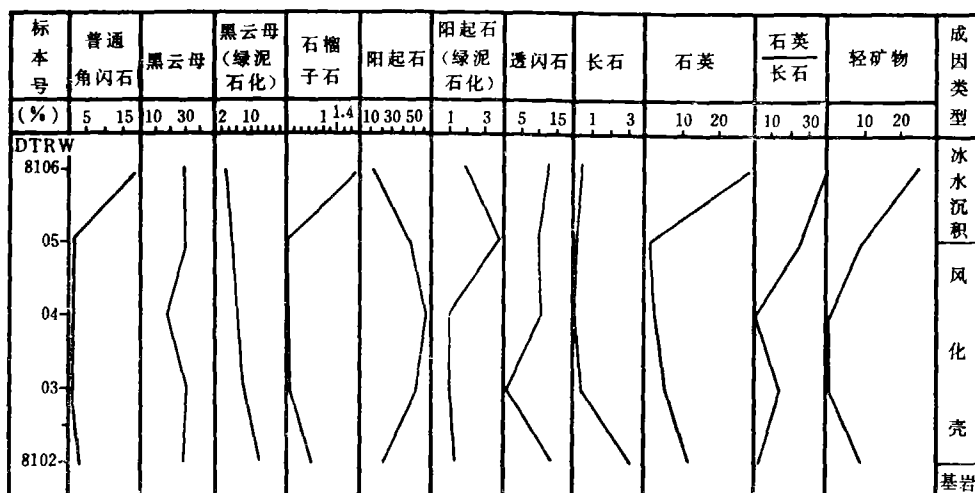
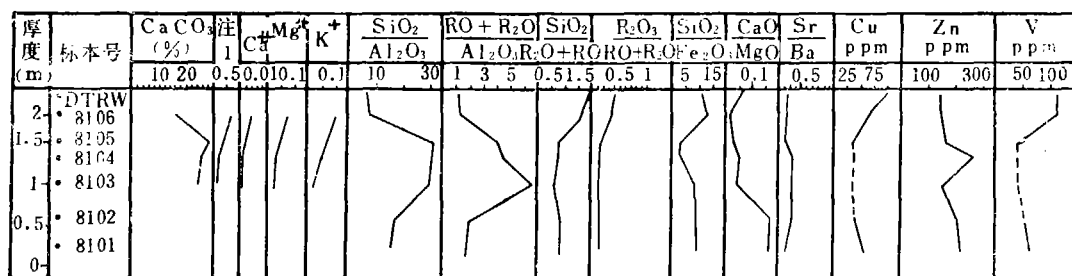


图 1 风化壳碎屑矿物含量图

化学风化作用还表现在化学元素的迁移与富集现象上(图 2),如 SiO_2 , Al_2O_3 的含量从下至上总的来看有逐渐降低的现象,而 CaO 在中部发生富集,这是因 CaO 在表层遭淋滤,但到一定深度又产生聚积的结果。而 MgO , K_2O , Na_2O 出现向上富集的现象,但 Si , Al , Ca , Mn , Ti 均有不同程度的流失,仅 Mg , K , Na 出现富集现象。 Ca 在距地表 1m 左右富集的深度应是多年冻土中活动层的深度,即冻土上限的深度,是较今略为温暖的时期形成的。此外易迁移元素在地表层富集的原因可能是通过干燥环境下始终存在的蒸发毛细作用被带到上部的。夏季

1) 中国科学院冰川冻土沙漠研究所译,冻土学原理,1966年,第五章。

2) 刘燕君,南极东部维斯特福尔丘陵地区岩石学研究,1982。



注 1: 可溶盐全盐量 (%)

图 2 风化壳全岩(全土)化学分析图

雪的升华作用也可能是易溶盐类在地表浓缩的原因之一。

元素迁移的化学风化过程也清楚地反映在该风化壳中的石英砂上。石英砂表面在扫描电子显微镜下可见到 SiO_2 溶蚀、淀积及重结晶现象(图版 I-6)。我们在极干寒的昆仑山和天山的冰水石英砂粒上曾看到同样的情况^[6]。这是因为在碱性环境下和水分条件比较有利时,即使气候寒冷,水的 pH 值也会因有溶解盐类而升高,使砂粒表面有少量 SiO_2 被溶解。当温度升高时,蒸发作用又使 SiO_2 重新沉淀,甚至出现新晶体的缓慢生长。这种过程在冰缘环境下的夏季可以频繁进行。因此,上述南极石英砂粒上溶蚀、沉淀和重结晶现象就说明该地存在着冷暖变化及局部供水较好的干冷碱性环境。这点 W. B. Whalley, 和 B. J. Smith, 在研究 Hamadan 尘土中的石英砂时也曾指出过,即碱性环境对 SiO_2 的溶蚀可起促进作用^[7]。

此外,可溶盐中 Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ 离子和 CaCO_3 的含量变化也反映出阳离子迁移的特征,如图 3 所示。 CaCO_3 的含量自下而上从 25.55% 增至 29.67%,可溶盐的全盐量也有所增加。证明冻土中存在阳离子的交换反应。Hoc, 也指出:在季节冻土和多年冻土中,水和易溶解的物质的运动和再分配是一种普遍的、基本的、以温度为转移的具有很多实际效果的现象。他认为在南极干燥的多年冻土中,在白昼和季节的热量变化下,离子的迁移是十分迅速的^[8]。此外,我们对风化壳中微量元素的分析结果发现,锶、钡有明显的流失现象,而铈和钒则出现波动(图 2)。在我国青藏高原年均温 -6.6°C 的风火山地区, K^+ , Na^+ , Cl^- 离子在 5 m 深处出现峰值^[9]。含盐量分析结果表明在多年冻土上限附近有富集现象。同时也有以水云母和绿泥石为主的粘土矿物组合。以 B 值代表水云母与绿泥石峰值强度之比值点绘的曲线也表现出在冻土上限附近发生突变^[11]。这些情况都共同说明寒冷地区在多年冻土的活动层中存在着淋滤作用。据 Wilson, 研究矿物的化学风化作用可在 $-70-85^\circ\text{C}$ 间进行^[1], 尤其当夏季温度较高水分与氧气比较充足时,有利于矿物化学风化作用的进行。所有这些资料都迫使人们必须重新考虑极地区的化学风化作用问题。在这里从交换阳离子反应,岩石和矿物的化学风化作用,以及风化壳中元素的富集与迁移现象看出,在南极 Vestfold 丘陵区基岩上发育的碎屑型风化壳虽属风化初期的产物,但存在着逐渐向硅铝-氯化物碎屑型风化壳转换的趋势。

二、海侵时期及其沉积环境

晚更新世末次冰期中的间冰阶时期,距今约 5—2.5 万年。该区冰盖退缩,海面上升,海侵

1) 兰州冰川冻土研究所, Wilson A. T., 极地冰盖的化学地层学,世界冰川冻土,1983 年,第 1 期。

范围扩大,沉积了海相沉积(位于海积平原上的 DMP 剖面上部地层 DMP8133, ^{14}C 年龄为距今 31000 ± 474 年)。其上覆盖了末次冰期中的第一阶段(玉木 I) 沉积,总厚 9m。

从粒度分析反映出该剖面的下部为粘土砂质粉砂,向上逐渐变粗为中细砂。正态概率曲线反映出剖面下部几乎全部为细三段型,质点运动只有悬浮很少有跃移及滚动组分(图 3),在 Pusaga 的 C-M 粒度图象上是处于均匀悬浮与远洋悬浮之间(即处于 VIII 区,略跨 VII 区)(图 4)为海相沉积。该剖面的上部粒度变粗,为中细砂类或粉砂粘土质砂,粘土含量极少。从粒度正态概率图上表现为有滚动、跳跃及悬浮三部分的三段型,其中滚动组分含量可高达 15—20%,峰态为 1 左右,属窄峰态,表明物质经过一定的改造后再进入新环境。该部分颗粒

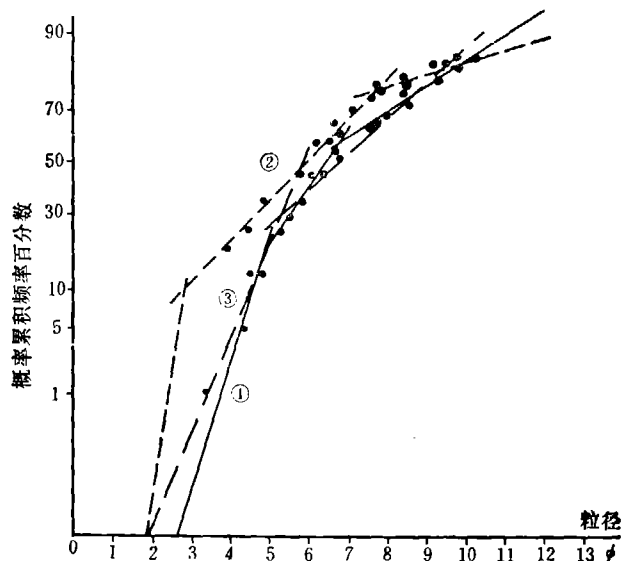


图 3 海相沉积粒度概率曲线图

① 细三段型(悬浮三段型) DMP8103; ② 既有跳跃,又有悬浮的三段型, DMP8101; ③ 海相细二段型 DMP8104。

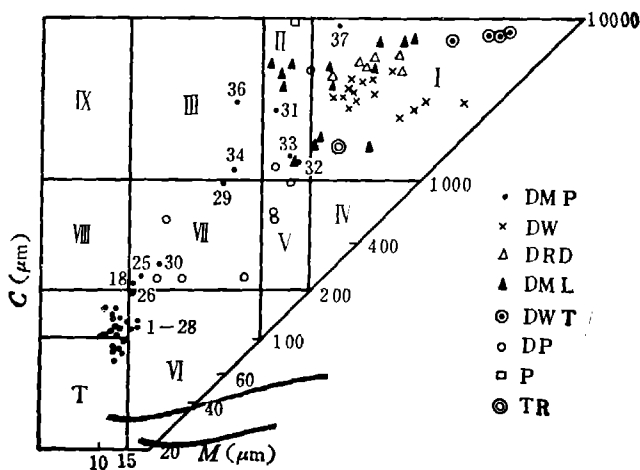


图 4 C-M 图

大部分分布在 C-M 图的滚动与悬浮区(第 II 及 III 区)(图 4)。根据对比,该部分样品的粒度概率曲线为似河口沙坝及汉道河床沙¹⁾,是冰盖融化形成的冰水沉积。

由此看来,在距今 31000 年的间冰段时期,该区为浅海沉积环境。其后,海侵范围逐渐缩小,代之以流水沉积,但不是典型的河流沉积,并缺少海滩沙沉积,这是因该处岩石海岸带的坡度大,海滩带窄,以及该区周围属“防护性海滩”。现全年海面封冻的季节长达 9 个多月,因而缺乏海滩沙的沉积物。间冰段时,气候虽然相对冰期时较温暖,但在南极仅表现为冰盖出现退缩,在此期间从 CaCO_3 可溶盐的钙离子含量及粘土粒级的化学全量分析中钙、镁的比值,均出现四个较一致的波峰(图 5),粘土矿物全部为结晶差的水云母(图 6),反映出在这相对较温和的背景上存在 4 次相对偏冷的气候波动。

三、晚更新世末次冰期最盛期的到来——冰盖覆盖最大时期

从世界范围来看,晚更新世末次冰期最盛期(距今 23000—12000 年,其中极冷期为 18000—15000 年),即“玉木 II”时,全球气候均最寒冷,冰川、冰盖的规模最大,虽然常有人提出南极冰川波动不符合北半球冰期变动规律,尽管最近 200 年南极的气候波动有利于这种异时冰期的论点,但南极 Abad 站冰岩芯同位素测定表明,南极大陆与北半球的主要气候事件是

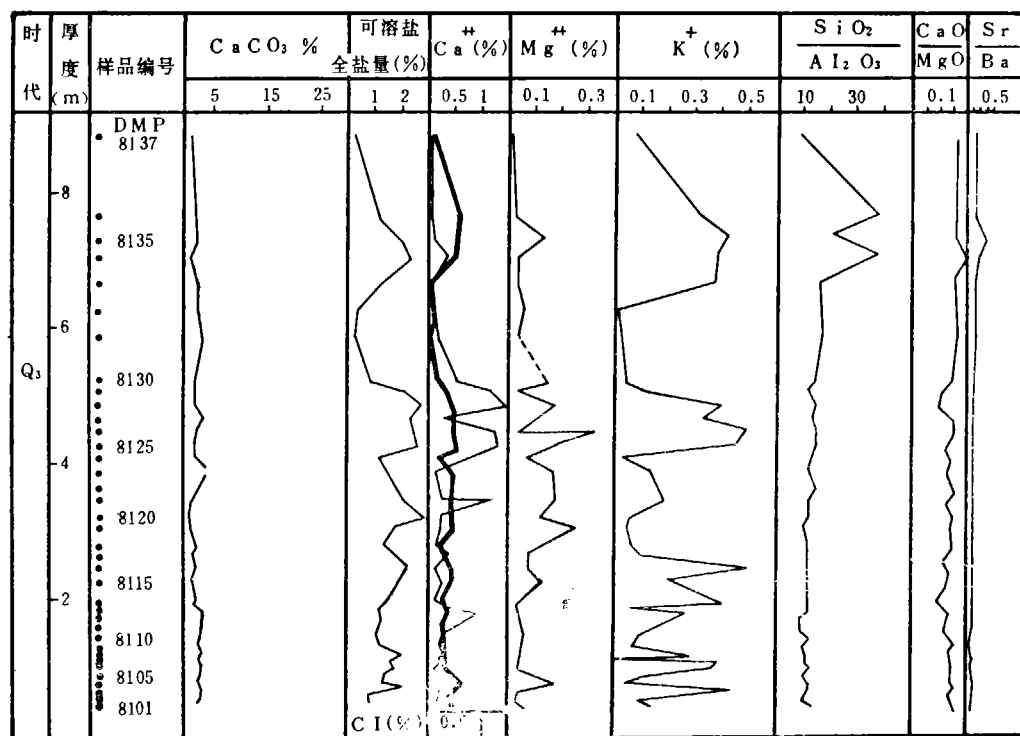


图 5 海相 DMP 剖面化学分析结果表

1) 同济大学, 粒度资料的处理和应用, 1977 年 15 页。

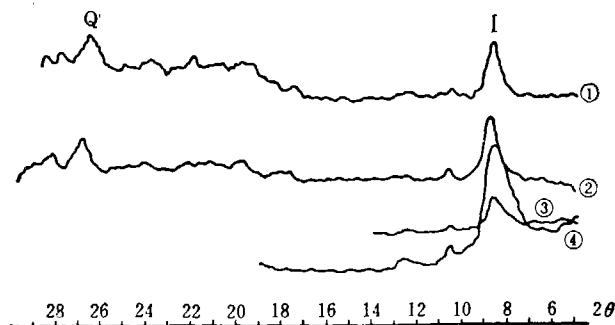


图6 海相 DMP 剖面粘土矿物 X 射线衍射图谱

① DMP8137 (冰碛); ② DMP8101; ③ DMP8134; ④ DMP8103.

相当的, 它们都有过一个重要的寒冷时期, 在距今约 17000 年时达到最冷阶段, 并在距今 11000 年前结束^[10]。Vestfold 丘陵区的第四纪沉积物分析也证实了上述论点。在晚于 31000 年至 11000 年之间, 在海积平原上 (marine plain) 广泛覆盖了一套冰碛沉积层, 并超覆于海相地层之上, 即属晚更新世末次冰期第二期 (玉木 II) 的产物。

在该区的最高丘陵 (Stalker Hill 和 Boalder Hill, 158m. a. s. l.) 和沿海岛屿上均有漂砾和冰川擦痕存在。冰盖的厚度至少比现在厚 158m 以上¹⁾。该期的冰川堆积物在上述间冰期的海相沉积物上仍有保留, 为粗大的漂砾加砂砾石质粉砂层, 在 C-M 图上分布在高于河流滚动沉积范围 (即 I 区) (图 4)。在该套沉积物的石英砂的凹坑处, 常聚集大量的海相硅藻碎片与石英碎块贴附在一起, 海相硅藻的存在指示出这些石英颗粒是经历过海洋环境, 嗣后又被冰川改造, 因而又有被冰盖研压形成的石英小碎块, 二者同时存在表征着石英砂的多代性特征 (即石英砂表面特征反映出经历过不同的沉积环境), 也是冰盖前进超覆于海相沉积物之上并部分改造了海相沉积的证据^[11]。

四、冰后期气候最宜期的沉积环境

晚更新世末次冰期以后, 全球性气候转暖, 进入全新世。其间以气候最宜期对自然环境改变影响最大, 北欧树线比现今要高 500m。格陵兰现在北纬 66° 水域生长的食用蠔, 在距今 5000—7000 年时则分布到北纬 73°。但不同地区气候最宜期所经历的时间并不完全一致, 如丹麦的最宜期是在距今大约 4000—3000 年 (亚北方期)。而格陵兰 regin 的气候最宜期则为距今 4100—8000 年, 而在距今 5000—6000 年前后达到最暖的程度^[10]。南极 Vestfold 丘陵区所表现出的气候最宜期则为 3500—6600 年, 显然均为全新世中部时段。在中国据竺可桢研究全新世中期温度比现今高 2°C^[12]。该时期南极生物化石很丰富, 有大量 CaCO₃ 胶结虫管化石 (Hydroides sp. 据南京古生物研究所鉴定) 及瓣鳃类、硅藻、有孔虫等, 但至今尚未得出确切的温度升高值。

然而, 该时期和全球其他地区一样, 冰盖表现出退缩, 在该区的凹地中冰融水充填形成湖泊和泻湖。Watts 泻湖即是其中之一, ¹⁴C 测年为距今 3500—6600 年, 该剖面 (DW) 泻湖沉

1) 张青松, 南极东部 Vestfold 丘陵区的地质与地貌, 1982。

砂, 基质中 50% 以上为粗、中、细砂, 粉砂含量仅占 20%, 而粘土含量一般小于 10%, 有些甚至不含粘土。这些冰碛物的概率曲线很杂乱, 但基本可分成两大类, 一为“似浊流”类, 即由冰体夹碎石呈正体式的搬运。另一种为滚动、跳跃及悬浮三种运动方式共存, 且前两者含量可高达 60%, 表现出冰盖内部物质的消融, 搬运方式是既有呈高密度流也有呈固体状态的搬运。

上述三道冰碛物的矿物成分主要为普通角闪石 (60—70%), 次为石榴石及磁铁矿, 反映这些冰碛物的物质来源没有变化, 为同一冰盖体中的冰川前进时携带的碎屑物质。从三道冰碛中的石英砂在扫描电子显微镜下的表面特征, 反映出冰盖具有巨大的研压作用, 形成大量的石英小碎块, 使其留在凹坑处。此外, 强烈的寒冻风化作用使石英表面呈片状剥落。上述现象是该区冰碛物的共性^[11], 但从在该区普遍存在高度不等的终碛堤, 反映出新冰期中至少存在二到三次小的冰进, 即处于全新世的“大西洋期”至“亚北方期”之间的过渡时期 (距今约 5200—4600 年), 而世界许多地区在大约距今 2800 年时发生了冰川作用。由此看来, 在冰后期, 在气候最宜期之后或与之交叉时, 均存在明显的气候波动, 新的冰川形成, 冰盖多次前进, 虽然物质来源与沉积物特征基本相似, 但从其分布的范围及高度不等, 仍能划分出几次小的冰进阶段。

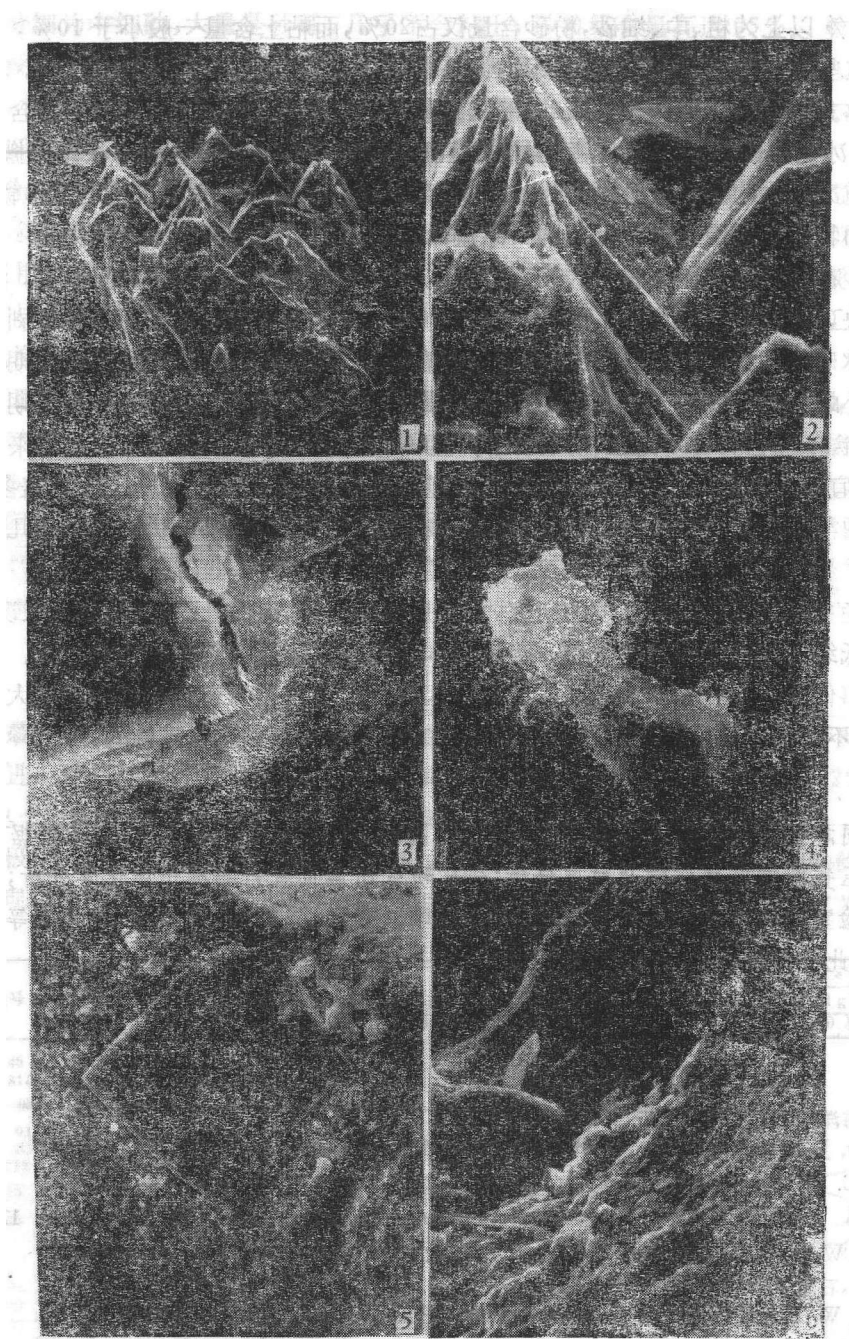
对南极晚更新世以来自然环境的研究, 尤其是冰盖消长、海面升降、大气环流状况, 均强烈地影响着较低纬度地区的天气和气候, 极地冰体的消长直接影响着海岸线的变迁。极地自然环境的重大事件均牵动着低纬度地区的脉搏。因而从上面论述的自然环境中的重大事件与其它地区相比, 不难看出, 晚更新世以来, 几次气候的重大变化是具有全球性的。

张青松同志提供全部分析样品及野外资料; 金力、冷达明同志提供 ^{14}C 测年数据; 吴淑安、康立文、李玉秀同志完成化学及粒度分析; 铀矿研究所协助进行等离子体化学分析; 北京市地质局中心实验室完成部分碎屑矿物分析; 北京六学刘燕君、陈静生、张淑媛、袁又申等老师提出宝贵意见, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 李令华, 海洋科技资料, 1981, 1: 65.
- [2] McGreevy, J. P. and Whalley, W. B., *Arctic and Alpine research*, 14 (1982), 2: 157—162.
- [3] Thorn, C. E., *Earth Surface Processes*, 1979, 4: 211—228.
- [4] Hallet, B., *Permafrost Fourth international conference Fairbanks, Alaska, U. S. A.* 1983, 123.
- [5] Whalley, W. B. et al., *Zeitschrift für Geomorphologic*, N. F. Bd, 1982, 26: 33—54.
- [6] 谢又予等, 石油与天然气地质, 2(1982), 1: 66—73.
- [7] Whalley, W. B. and Smith, B. J., *Journal of Arid Environments*, 1981, 4: 21—29.
- [8] Hoc, A. D., *Quaternary Research*, 5(1975), 1: 125.
- [9] 李烈, 中国地理学会冰川冻土学术会议论文选集(冻土学), 科学出版社, 1982, 54.
- [10] A. 高迪著, (邢嘉明等译), 环境变迁, 海洋出版社, 1981, 54.
- [11] 谢又予, 科学通报, 28(1983), 9: 557—559.
- [12] 竺可桢, 中国科学, 1973, 2: 168—189.

1) 张青松, 南极东部 Vestfold 丘陵区第四纪地层, 1982.



1. 风化壳中石英砂表面呈尖角状及锯齿状外形,并且呈V型的原生解理,×270; 2. 照片1的放大,×1800; 3. 寒冻风化作用形成的裂纹,×3600; 4. 石英砂表面呈片状剥落时的状态,×1500; 5. 石英砂表面方形的剥落片,×2000; 6. 风化壳中石英砂表面 SiO₂ 的溶蚀与沉淀现象,×1400.