地 质 学 报
1988 年 ACTA GEOLOGICA SINICA 第 1 期
http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

南极半岛西部海域沉积粘土的氢、氧同位素组成及其物质来源探讨

徐步台 高水土
(浙江省地质科学研究所，杭州) (国家海洋局第二海洋研究所，杭州)

在沉积作用地球化学研究中，利用氢、氧同位素资料探讨沉积物的形成环境和物质来源，已成为一种行之有效的手段。本文是对南极半岛西部海域中 9 个站位所采集的海底表层沉积物，分离出粘土组分做了氢、氧同位素分析，并根据这些分析结果和粘土矿物成分资料，通过统计图解判别了该海区的粘土组分主要为陆源碎屑物质，即由南极半岛陆源区岩石在大气降水参与作用下地表风化或浅成蚀变形成的产物。但其中至少有一部分蒙脱石是由海底喷发火山物质或陆源火山碎屑在海水参与作用下形成的海相自生矿物。上述统计判别结果与粘土矿物学研究所得出的看法是一致的。

一、引 言

这次工作是有关南极半岛西部(包括南设得兰群岛周围和阿得雷德岛西北附近)海域沉积作用地球化学的研究内容之一。南极半岛在南极洲的位置及沉积物取样的海区如图 1 所示。南极半岛及周围岛屿在区域地质上可与南美洲安第斯地区进行对比，属中、新生代褶皱带。除局部出露中侏罗世以前的基底杂岩层外，广泛分布中、新生代安山岩类和玄武岩类火山岩层以及花岗岩类侵入岩。这里，特别要指出的是，在布兰斯菲尔德海峡的欺骗岛和乔治岛附近一带有现代喷发的活火山；此外，周围个别岛屿(如象岛)主要由中侏罗世以前的变质杂岩组成[1,2]。

为了进一步取得粘土物质的沉积作用地球化学信息，在进行了该区海底表层沉积物及其石英的氧同位素和稀土元素研究之后[3]，又从沉积物中分离出粘土组分，在粘土矿物学研究的基础上，取得了氢、氧同位素资料，从而探讨了该海区沉积粘土的形成条件和物质来源。

二、沉积物样品与粘土矿物成分

沉积物样品采自南极半岛西部海域的 9 个站位(图 1)，大多以砂和粉砂物质为主，粘土含量不等 (8—40%)。按粒度分析划分的沉积物类型及其各粒级组分相对含量全部列于表 1。

本文 1987 年 3 月收稿，9 月改回，罗正华编辑。

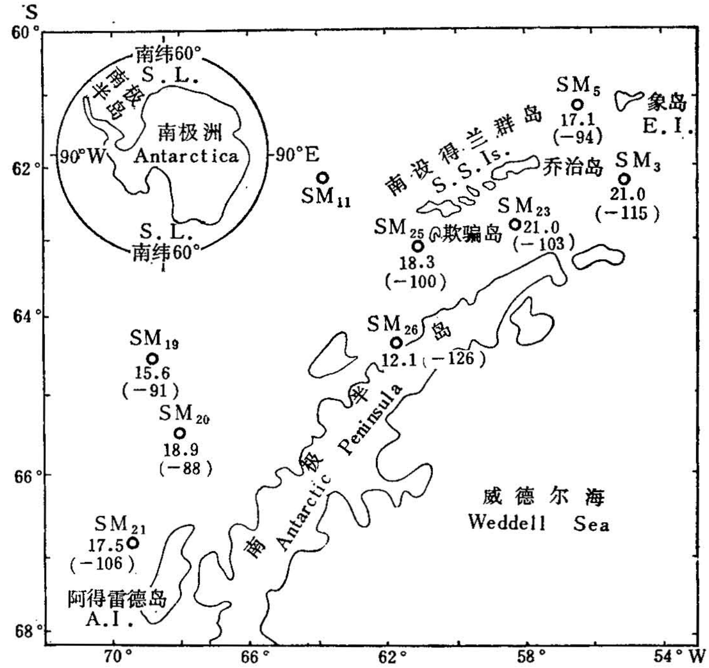

图 1 南极半岛西部海域沉积物取样位置及粘土组分 $\delta^{18}O$ 与 δD 值分布图

Fig. 1 The sampling locations and $\delta^{18}O$ and δD values of clay fractions from surface sediments in western sea-floor of Antarctic Peninsula

SM 为取样位置；其下方的数字为 $\delta^{18}O$ 值和括号内数字为 δD 值；左上角插图表示南极半岛在南极洲的位置

SM: Sampling locations; Numbers below sampling location showing $\delta^{18}O$ values and numbers within parentheses showing δD values; Inserted map above-left showing location of Antarctic Peninsula in Antarctica;

S. S. Is.-South Shetland Is.; A. I.-Adelaide I.; E. I.-Elephant I.; S. L.-南纬

用于粘土矿物鉴定和氢、氧同位素分析的试样，是用去离子水沉降分离得到 $<2\mu m$ 的粘土组分。有些试样还用过氧化氢或稀盐酸除去微量有机质或碳酸盐的预处理，最后用去离子水洗涤干净，在 50℃ 下烘干。经过这些常规方法处理的试样不会引起粘土矿物特性及其氢、氧同位素组成的变化。

粘土矿物鉴定和相对含量测定采用X射线衍射、红外吸收光谱和电子显微镜等方法。其结果表明，该海区沉积粘土由伊利石、蒙脱石、绿泥石及高岭石等矿物组成。其中蒙脱石有两种：钙蒙脱石和钠蒙脱石。各粘土矿物的相对含量，以伊利石（34—57%）和蒙脱石(11—46%)占优势，其次为绿泥石(8—33%)，高岭石为最少(4—12%)（表 1)。从粘土矿物分布来看，大致可分成两个区：南设得兰群岛周围海域，蒙脱石含量（平均 46%）大于伊利石(平均32%)；相反，阿得雷德岛西北海域，则伊利石含量(平均 49%)大于蒙脱石(平均 23%)。这种粘土矿物的分区性可能与上述在布兰斯菲尔德海峡一带存在现代活火山有关；同时，也可能反映伊利石和蒙脱石两种粘土矿物，在成因和来源上有所不同。个

别站位(序号 2)的粘土试样中绿泥石含量较高，可能是由于附近的象岛出露有变质杂岩，其中有较多的绿泥石呈陆源碎屑矿物被搬运入海。最后要指出的是，根据经钾饱和处理的蒙脱石 (001) 晶面反射峰，有些试样主要在 1.3nm(13 Å) 附近[1)]，以及采用 P. E. Biscaye (1965) 提出的 (V/P) 值测定所得出的结晶度为一般到良好[4]，并结合考虑具有适宜于形成蒙脱石的偏碱性海水和活火山喷发等有利环境。因此，我们推测至少有些蒙脱石，特别是钠蒙脱石很可能是海底火山物质经海水热液流体蚀变而形成的海相自生粘土矿物。

三、粘土组分氢氧同位素组成

粘土试样中氧的提取采用了五氟化溴法。经加热至 150—200℃ 真空脱气 2 小时的预处理，除去吸附水和层间水后，在高温下与 BrF_5 反应析出的氧气，通过 C 还原产生供质谱分析的 CO_2 气样[5]。

粘土试样中氢的提取采用了加热法。同样，经加热真空脱气予处理后，高温下直接提取羟基中的氢，大部分以 H_2O 形式，而有少量呈 H_2 等形式析出，后者用氧化铜使氧化成 H_2O。然后，再采用金属铀还原法将 H_2O 转化成供质谱分析的 H_2 气样[5]。

CO_2和H_2气样分别在 MAT-250 和 MM602D 质谱计上进行氧和氢同位素比值测定。氢、氧同位素组成用相对于 SMOW 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值表示，其标准偏差分别为 ±2‰ 和 ±0.3‰。所取得的 9 个沉积物中粘土组分的氢、氧同位素分析结果列于表 1 和图 1。

四、粘土矿物成因与来源探讨

作者之一(1987)先前曾根据南极半岛西部海域沉积物及其石英的氧同位素组成和稀土元素分布特征，指出沉积物中占主体组分的砂和粉砂系来源于南极半岛及其周围岛屿的陆源碎屑物质，并推断其中的粘土组分很可能也是以陆源碎屑物质为主[3]。这由于与已知各大洋沉积物的氧同位素资料相对比，该海区沉积物的 $\delta^{18}O$ 值明显较低 (图 2)，大致反映了高纬度和火成岩陆源区的地表或浅成产物的氧同位素组成特征。

在 9 个沉积物中所分离出的粘土试样，所获得的氢、氧同位素分析结果为 δD 值范围在 −88—−126‰ 之间，平均为 −103‰；$\delta^{18}O$ 值范围在 +12.1—+21.0‰ 之间，平均为 +17.6‰ (表 1)。据 S. M. Savin & S. Epstein (1970) 及其他作者的有关资料，海相自生蒙脱石等粘土矿物的 $\delta^{18}O$ 值高达 +23—+28‰[6-8]；δD 值为 −40—−80‰[8-10]，相比之下，上述该海区粘土组分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值要低得多，因此，总的氢、氧同位素组成大致反映了非海相自生粘土矿物的特征。若将 9 个粘土试样的分析结果分别绘制在 δD-$\delta^{18}O$ 相关图上(图 3)，则所有样品都落在与大气降水相关的风化蒙脱石、伊利石及高岭石线附近。这种相关性分布特征更清晰地表明这些粘土物质主要是由陆源区地表风化或浅成蚀变的产物。这个结果与 G. Faure (1977) 关于“海相沉积物中不仅石英和长石等碎屑矿

1) 广东省海洋研究所，1973，海洋科技参考资料，第 8 期。

表 1 南极半岛西部海域表层沉积物中粘土组分的氢和氧同位素组成（%）*

Table 1 Hydrogen- and oxygen-isotopic compositions of clay fractions from surface sediments in western sea-floor of Antarctic Peninsula

序号 serial No.	样品号 sample No.	沉积物类型 sediment type	沉积物粒级组分含量(%) content of sediment fraction			粘土矿物相对含量(%) relative content of clay mineral				粘土试样同位素组成 isotopic composition of clay material	
			砂 sand	粉砂 silt	粘土 clay	蒙脱石 smectite	伊利石 illite	高岭石 kaolinite	绿泥石 chlorite	δ^{18}D	δD
1	SM_3	粉砂质砂	66.87	25.23	7.90	26	55	7	12	21.0	−115
2	SM_5	粉砂质砂	57.64	33.84	8.55	24	39	4	33	17.1	−94
3	SM_{11}	泥质粉砂	3.62	56.11	40.26	37	42	7	14	16.5	−106
4	SM_{19}	含泥质砂	75.74	7.52	10.60	38	42	7	13	15.6	−91
5	SM_{20}	砂质含泥粉砂	25.84	63.26	10.90	46	41	5	8	18.9	−88
6	SM_{21}	粉砂质砂	53.81	32.78	8.86	10	57	12	21	17.5	−106
7	SM_{23}	泥质粉砂质砂	43.01	29.64	21.18	31	47	7	14	21.0	−103
8	SM_{25}	泥质粉砂	4.05	60.94	35.01	41	34	7	18	18.3	−100
9	SM_{26}	泥质含砂粉砂	10.23	52.31	37.46	11	52	10	27	12.1	−126

* 测定单位：北京大学地质系稳定同位素实验室。

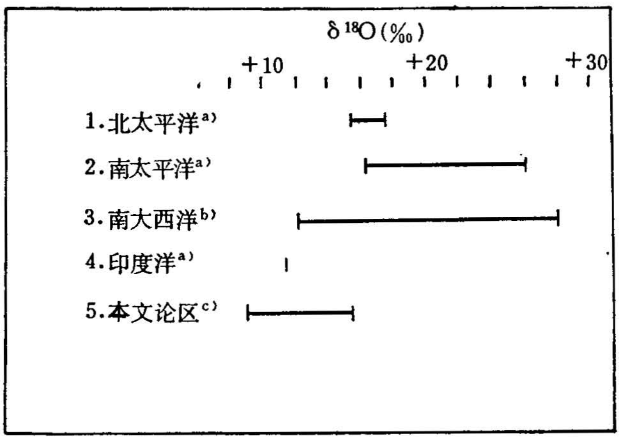

图 2 各大洋海底沉积物的氧同位素组成

Fig. 2 Oxygen isotopic compositions of sea-floor sediments in some oceans

a) Savin & Epstein (1970); b) Lawrence (1979); c) 徐步台和施光春(1987)

1. North Pacific; 2. South Pacific; 3. South Atlantic; 4. Indian; 5. sea area discussed in paper

物，而且多数粘土矿物看来也不是与海水处于同位素平衡”的看法是一致的[9]。

然而，假如该海区粘土物质全部都是与陆源区大气降水处于同位素平衡，那么按照南极半岛地理位置的高纬度（南纬 61°—67°）寒冷气候条件下，由当地大气降水参与作用所形成的粘土矿物，我们曾推测其氢、氧同位素组成应大致为 $\delta D \approx -126‰$ 和 $\delta^{18}O \approx +15‰$[3]。相比之下，该海区粘土组分的平均 δD 和 δ^{18}O 值却要略高一些，这很可能意味

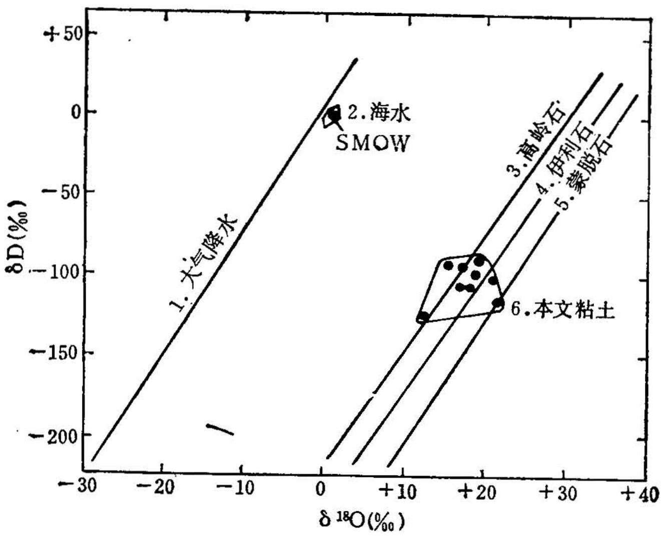

图 3　地表温度下形成的粘土矿物 δD-$\delta^{18}O$ 相关图
(Savin & Epstein, 1970; Faure, 1977)

Fig. 3　Relationships between δD and $\delta^{18}O$ of clay minerals formed at earth-surface temperatures

1. meteoric water; 2. seawater; 3. kaolinite; 4. illite; 5. smectite
6. clay in this paper

表 2　地表温度下粘土矿物-水体系的同位素分馏系数[8,9]

Table 2　Isotope fractionation factors for clay-water systems at earth-surface temperatures

矿　物 mineral	氧同位素 oxygen isotope	氢同位素 hydrogen isotope
蒙 脱 石	1.027	0.94
高 岭 石	1.027	0.97
伊 利 石	1.0234	—*

* 该分馏系数值虽尚未确定，但据现有资料表明介于蒙脱石与高岭石的分馏系数值之间——作者注。

着在粘土物质中，至少有一部分粘土矿物不是在当地大气降水参与作用下形成的陆源产物。同时，我们这次研究的是粘土矿物的混合试样，而不同的粘土矿物与生成水之间的同位素分馏系数存在着一定的差异(表 2)，因此，各种粘土矿物的氢、氧同位素组成之间还会存在一定的互补关系。据前述粘土物质中均以蒙脱石和伊利石两种矿物占优势，总含量达 70—80% 以上，并可分为以蒙脱石或伊利石为主的两种类型。因此，粘土组分的氢、氧同位素组成主要取决于上述两种粘土矿物的成因和来源。 根据表 2 中所列的蒙脱石-水体系和伊利石-水体系之间的氢和氧同位素分馏系数值的明显差异，我们可预期在相同条件下形成的粘土组分中，蒙脱石的相对含量愈高则粘土的 δD 值应相对愈低；同时，若在粘土组分中伊利石的相对含量愈高，则粘土的 $\delta^{18}O$ 值应相对愈低。然而，南极半岛西

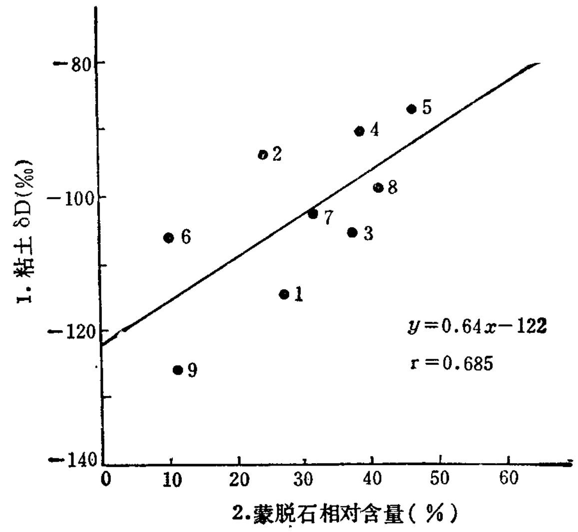

图 4 粘土组分 δD 值与蒙脱石相对含量相关图
(1—9 为表 1 中粘土样品序号)

Fig. 4 Relationships between the δD values and the smectite contents of clay fractions
(1—9: Serial numbers of clay samples in Table 1)
1. clay; 2. smectite relative content

部海域沉积物中粘土组分,其中有的蒙脱石相对含量较高的试样(序号 4、5 和 8),反而具有较高的 δD 值;而有的伊利石相对含量较高的试样(序号 1、6 和 7),则反而具有较高的 $\delta^{18}O$ 值(表 1)。为了利用粘土组分的氢、氧同位素资料进行统计处理判别这两种主要粘土矿物的成因和来源,首先,绘制出粘土组分 δD 值与蒙脱石相对含量之间的相关图(图 4),得到 $y=0.64x-122$ 的线性方程,相关系数 $r=0.685$, 显示了粘土 δD 值随着蒙脱石含量增高而增大的变化趋势;其次,绘制出粘土组分 $\delta^{18}O$ 值与伊利石相对含量之间的相关图(图 5),除上述几个明显异常的试样(序号 1、6 和 7)外,得到 $y=-0.36x+31.50$ 的线性方程,相关系数 $r=-0.878$, 显示了粘土 $\delta^{18}O$ 值随着伊利石含量增高而减小的变化趋势。据上述相关性统计图解,并结合粘土组分总的氢、氧同位素组成特征,表明伊利石是在陆源区大气降水参与作用下形成的粘土矿物,即从陆地搬运来的碎屑物质。至于几个 $\delta^{18}O$ 值偏离的试样,看来很可能是由蒙脱石所引起的异常现象。从上述统计图解可见,蒙脱石的 $\delta^{18}O$ 值与相对含量之间并没有显示所预期的结果,而是在一定程度上具有与伊利石不同的变化趋势(图 4)。因此,至少可认为蒙脱石不是单一成因和来源的粘土矿物。同时,已知该海区有些地方存在现代火山活动,这可为海水热液的蚀变作用提供了必要的热源条件,故很可能有一部分蒙脱石是由海底火山物质直接蚀变而成的海相自生矿物。总之,我们对南极半岛西部海域沉积物中粘土矿物成因和来源的判别与通过粘土矿物学研究所得出的结论是一致的[1)]。此外,从该海区及周边地质环境等因素来考虑也是合理的。

1) 国家海洋局第二海洋研究所,1987,南极科学考察调查报告。

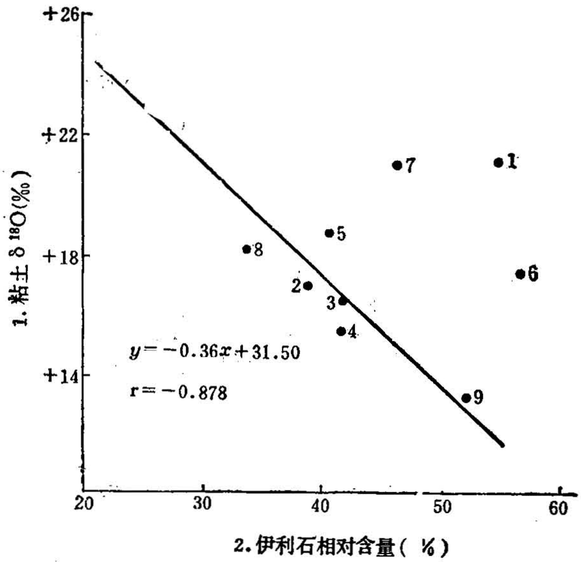

图 5　粘土组分 $\delta^{18}O$ 值与伊利石相对含量相关图
(1—9 为表 1 中粘土样品序号)

Fig. 5 Relationships between the $\delta^{18}O$ values and the illite contents of clay fractions
(1—9: serial numbers of clay samples in Table 1)
1. clay; 2. illite relative content

五、结　论

根据南极半岛西部海域表层沉积物中粘土组分的氢、氧同位素组成，结合粘土矿物成分和地质背景等资料，我们对该区海底沉积粘土的成因和来源的认识如下：首先，从粘土组分总的氢、氧同位素组成基本上反映了与大气降水处于同位素平衡的特征，表明大多数粘土矿物是来源于南极半岛陆源岩石区，即由地表风化或浅成蚀变形成的产物，以陆源碎屑物质形式搬运入海的沉积粘土。其次，对粘土组分中两种占优势的矿物——伊利石和蒙脱石，通过氢、氧同位素组成与相对含量之间的相关性统计图解判别结果，表明前者应属陆源矿物；而后者在一定程度上具有与海水处于同位素平衡的特征，因此，至少有一部分蒙脱石是海相自生矿物。上述一些认识与粘土矿物学研究结果，以及该海区所处的地质环境等都是相符合的。

本文是在我国首次南大洋科学考察队同志共同协作和辛勤工作取得大量科考成果的基础上完成的。在工作中还承蒙陈成业老师、施光春同志的热忱帮助。谨此一并致以诚挚谢意。

参　考　文　献

[1] 郑剑东，1985，南极洲地质构造概况及南设得兰群岛简介。地质论评，第 31 卷，第 5 期，第 479—484 页。
[2] 孙枢，1981，南极洲地质概况与矿产资源问题。国外地质，第 9 期，第 1—7 页。

[3] 徐步台、施光春，1987，南极半岛西部海域沉积物的氧同位素和稀土元素地球化学。科学通报，第32卷，第8期，第606—609页。
[4] Biscaye, P. E., 1965, Mineralogy and sedimentation of recent deepsea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 76, p.p. 803.
[5] 徐步台、邵益生，1986，浙江高岭土矿床中氢、氧同位素的研究. 地质科学，第1期，第90—96页。
[6] Savin, S. M. & Epstein, S., 1970, The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ocean sediments and shales. Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 34, No. 1, pp. 43—63.
[7] Lawrence, J. R., 1979, $^{18}O/^{16}O$ of the silicate fraction of recent sediments used as a provenance indicator in the South Atlantic. Marine Geology, Vol. 33, No. 1—2, pp. 1—7.
[8] Savin, S. M. & Epstein, S., 1970, The oxygen and hydrogen isotope geochemistry of clay minerals. Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 34, No. 1, pp. 25—42.
[9] Faure, G., 1977, Principles of Isotope Geology. John Wiley & Sons Inc., pp. 323—372.
[10] 丁悌平，1980，氢、氧同位素地球化学. 地质出版社，第103—122页。

HYDROGEN AND OXYGEN ISOTOPIC COMPOSITIONS OF CLAYS ON THE OFFSHORE OF THE WESTERN ANTARCTIC PENINSULA AND THEIR MATERIAL SOURCE

Xu Butai

(Zhejiang Institute of Geology, Hangzhou)

Gao Shuitu

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou)

Abstract

Hydrogen and oxygen isotopic compositions were measured for clay fractions separated from the sea-floor surface sediments collected at 9 stations on the offshore of the western Antarctic Peninsula. The results are as follows: the δD values are in the range of -88—$-126‰$, with a mean of $-103‰$; the $\delta^{18}O$ values are in the range of $+12.1$—$+21.0‰$, with a mean of $+17.6‰$. On the basis of the data of hydrogen and oxygen isotopic compositions and mineral components of the clay fractions and by use of statistical diagrams, the following knowledge has been gained on the origin and source of clay minerals in the sea area: (1) Generally, the characters of the hydrogen and oxygen isotopic compositions for the clay fractions indicate that most of the clay minerals have reached isotopic equilibrium with local meteoric water. In other words, the clay minerals were mostly the products of the surface weathering or the supergene alteration of igneous rocks in the Antarctic Peninsula and its surrounding islands, and then they were transported and deposited on the sea floor as terrigenous detritus. (2) As shown by the relationships between the isotopic compositions of the clay fractions and the contents of their dominant minerals-illite and smectite, the illite has entirely reached isotopic equilibrium with local meteoric water, and thus it should belong to the terrigenous detrital minerals; on the other hand the smectite shows signs of being isotopically in equilibrium with sea water, and thus at least a part of smectite belongs to marine authigenic minerals. The above conclusions are consistent with the results on studies of the clay mineralogy and the geological environments of the sea area.