

新不列颠海沟轴部沉积物的放射性核素分布

孙诗晴¹, 张芬芬¹, 王亚松², 许云平², 杜金洲¹

(1. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200241; 2. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院 深渊生物圈前沿科学研究基地, 上海 201306)

摘要: 深渊海沟是深海中重要且特殊的漏斗型地貌区域, 多年来一直被认为是深海“荒漠”。近年的研究表明, 深渊海沟区域不仅是深海沉积物的汇, 也存在着活跃的深渊生态系统, 并且是深海有机碳发生埋藏的重要场所。本文对采集于新不列颠海沟轴部的沉积物短柱样进行实验分析, 利用天然放射性核素 ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{40}K) 和环境磁学等参数在柱样中的分布情况判断沉积物来源, 结合 TOC、 $\delta^{13}\text{C}$ 参数进一步识别沉积物中陆源有机质的来源并计算贡献比例。结果表明, 新不列颠海沟轴部沉积物的来源主要受陆源、火山活动、碳酸岩溶洞三种物源控制, 另外, 顶部样品受到一定程度的人类活动影响。

关键词: 深渊海沟; 放射性核素; 物源分析; $\delta^{13}\text{C}$

中图分类号: P736; X142

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)01-0047-12

Distribution of radionuclides in sediment columns from the axis of the New Britain Trench

SUN Shiqing¹, ZHANG Fenfen¹, WANG Yasong², XU Yunping², DU Jinzhou¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Estuary Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Hadal Science and Technology Research Center, College of Oceanography & Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The abyssal trench is an important and special funnel-shaped landform area in the deep sea, which has been regarded as the “desert” for many years. Recent studies have revealed that the abyssal trench area is not only a sink of deep-sea sediments, but also has an active abyssal ecosystem, and an important site for the burial of deep-sea organic carbon. This article conducts experimental analysis on sediment short column samples collected from the axis of the New Britain Trench. The distribution of natural radioactive nuclides ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K) and environmental magnetism parameters in the column samples are used to determine the source of the sediments, and TOC is combined with $\delta^{13}\text{C}$ parameter to further identify the source of organic matters in sediments and to calculate the contribution ratio. The research results indicate that the sources of sediment in the axis of the New British Trench are mainly controlled by three sources: terrestrial, volcanic, and carbonate caves. Secondly, the top samples are influenced to some extent by human activities.

Key words: hadal trench; radionuclides; source analysis; $\delta^{13}\text{C}$

深渊地带是深海中的特殊地带, 水深超过 6000 m, 主要由海沟和海槽两种海底地貌组成。深渊地带海域具有极端的物理化学性质和特殊的生态环境, 因此, 深渊地带被认为是低沉积速

收稿日期: 2023-10-26, 修订日期: 2023-12-22

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目 (SKLEC-KF202108); 国家自然科学基金项目 (42276033)

作者简介: 孙诗晴 (1999—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要研究方向为同位素海洋学, E-mail: 51213904019@stu.ecnu.edu.cn

通信作者: 杜金洲, 博士, 主要研究方向为同位素海洋学, E-mail: jzdu@sklec.ecnu.edu.cn

率且营养物质匮乏的。但近年来的研究发现,深渊地带拥有全球 75% 的原核生物量和超过 50% 的原核生物生产力^[1],尤其是海沟的“漏斗效应”导致该区域相对较高的沉积速率^[2]和生物量。深渊沉积物碳储量约为 1.5×10^{22} g^[3],是深海无机和有机沉积物的沉积中心^[4-9],远高于(70 倍)深海平原地貌中沉积物的碳储量^[10-11]。然而,极端的静水压力成为研究人员探索深渊地区一项高难度的挑战,也使深渊海沟沉积区成为目前地球表面研究最少的区域^[9]。

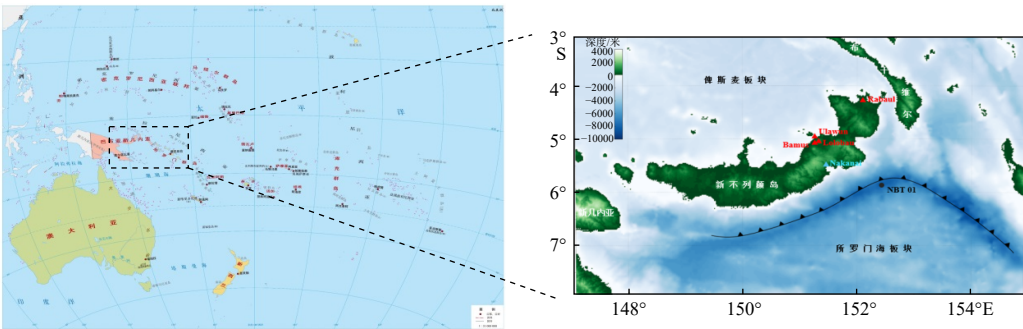
为讨论海沟轴部的复杂沉积物来源,以新不列颠海沟(New Britain Trench, NBT)轴部柱样沉积物为例,使用华东师范大学河口海岸国家重点实验室先进的高纯锗(HPGe) γ 能谱仪对新不列颠海沟轴部沉积物短柱岩芯(NBT 01)中的天然放射性核素($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K)进行无损分析,同时,结合环境磁学参数,并关联早期研究此处沉积物物源的粒度、元素(TOC、Al、Ti)、碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)等物理化学参数^[6,12],综合讨论新不列颠海沟轴部可能的沉积物来源,为该区域深入研究沉积物物源提供一定的科学依据,也为此后在该区域选择合适的沉积物定年方法

给出物源参考。此外,研究区域缺乏天然放射性核素数据,本文数据也填补了该区域这一研究的空白。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新不列颠海沟在 1910 年被德国“行星号”考察船成员首次发现,是位于西赤道太平洋热带辐合带(ITCZ)巴布亚新几内亚地区的一条全长 840 km 的弯曲海沟(图 1),临近新几内亚岛、新不列颠岛、布干维尔岛三大陆地^[12-13],由所罗门海板块分别向西北俯冲到南俾斯麦板块下,向东北俯冲到太平洋板块下形成。海沟按走向可分为东西两段,折角约 72°,最大深度为 9140 m,轴部狭窄,仅 50~75 km。首先,海沟轴部高生产力的热带雨林能够在暴雨事件下向海洋提供丰富的土壤有机质^[14]。其次,由于强烈的板块俯冲作用,区域内边缘构造活动非常活跃,大地震频繁,极易引起海底滑坡,为陆源物质在轴部沉积提供了更多的物质来源。最后,附近岛屿仍有活跃的火山活动,可以向周边海域输入大量中-基性火山物质^[15-17]。



注:红色三角代表岛上主要火山;蓝色三角代表岛上喀斯特洞穴;黑色圆点代表采样站位

图 1 采样区域与采样站位^[13]

Fig. 1 Study area and sample location

2017 年 1 月,“张謇”号科考船在新不列颠海沟(图 1)进行采样工作,短柱样品 NBT 01 由自主着陆器上的底栖舱采集^[6],该沉积柱样位于海沟轴部,柱状样信息见表 1。

放射性核素示踪是海洋学研究的一种重要手段,在国内外研究中具有广泛应用^[18]。河流输入与大气沉降是研究区海洋天然核素(^{238}U 、

^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{210}Pb)的主要来源。首先,岩石和土壤的风化颗粒、受人类活动影响的沉积物

表 1 NBT 01 柱样信息

Tab.1 Sample information of core NBT 01

采样柱长/cm	地理位置	水深/mbsl
22	5.87°S, 152.43°E	8225

颗粒, 以及河水本身所携带的可溶性核素是河流向海洋输送天然核素的三种方式。人类活动的农业(化肥使用等)和工业(燃煤和采矿等)活动对河流向海输入的 ^{238}U 、 ^{40}K 影响较大。其次, 海洋生物(藻类等)也是 ^{40}K 的来源之一。最后, 研究区周边大型喀斯特溶洞地貌区也可能是天然核素的来源场所。如, Nakanai 溶洞系统中的碳酸盐岩在受到流水侵蚀的作用下, 向海输送具有独特铀系核素特征天然核素。

1.2 样品分析

1.2.1 放射性核素比活度测量方法

本文选取 NBT 01 柱样 2~20 cm 进行测试, 样品的 5 cm 以上按 0.5 cm 间隔分样, 5 cm 以下按 1 cm 间隔分样, 称重后立刻冷冻干燥至恒重, 得到沉积物的含水量为 26%~39%。将沉积物研磨过筛(100~150 目), 以相同高度装管密封, 随后利用高纯锗(HPGe) γ 谱仪测量放射性核素。

本研究使用井型高纯锗(HPGe) γ 谱仪(GWL-120-15-XLB-AWT, ORTEC-AMETEK, 1.33 MeV 下 ^{60}Co 的 1.65 keV FWHM)进行核素测量, 测样时各核素已相对平衡。使用国际原子能机构制备的土壤样品作为标准参考源(IAEA-375), 同时测定该参考源的全能量峰值效率, 其中, 本文涉及的标准参考源的能量峰效率见表 2。在样品测试时, 对所有标准土壤参考源和实验沉积物样品同时进行衰变校正和背景扣除。每层位样品在高纯锗 γ 谱仪中测量时长为 24~48 h。

表 2 本文涉及核素标准参考源峰值效率

Tab.2 The peak efficiency of the standard reference source for the radio-analysis covered in this article

核素	全能量峰值效率
^{210}Pb (46.5 keV)	0.4045
^{234}Th (63.3 keV)	0.5412
^{212}Pb (238.6 keV)	0.2908
^{214}Pb (295.2 keV和352.0 keV)	0.2659, 0.2287
^{208}Tl (583.2 keV)	0.0725
^{214}Bi (609.3 keV)	0.0718
^{228}Ac (338.3 keV和911.1 keV)	0.1855, 0.0653
^{40}K (1460.8 keV)	0.05592

选取 46.5 keV 处的峰面积计算 ^{210}Pb 的比活

度; 选取 ^{226}Ra 的子体 ^{214}Bi (609.3 keV)和 ^{214}Pb (295.2 keV和352.0 keV)的峰面积计算 ^{226}Ra 的比活度; $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度通过从 ^{210}Pb 的比活度减去 ^{226}Ra 的比活度获得。选取 ^{238}U 的子体 ^{234}Th (63.3 keV)的峰面积获得其比活度。 ^{228}Ra 的比活度根据 ^{228}Ac (338.32 keV和911.1 keV)的峰面积得出; ^{228}Th 的比活度根据 ^{208}Tl (583.2 keV)与 ^{212}Pb (238.6 keV)的加权平均比活度获得; ^{232}Th 的比活度根据 ^{228}Ra 与 ^{228}Th 的加权平均比活度获得。选取 1460.8 keV 处的峰面积计算 ^{40}K 的比活度。需要指出, 本文所测试沉积物样品中的 ^{137}Cs 低于仪器最低检测限(0.63 Bq/kg), 沉积物样品中的 ^{137}Cs 比活度具有低本底值的特征。

1.2.2 环境磁学参数测量方法

称取样品质量约 5 g 装入 10 mL 无磁圆柱体样品盒中。

(1) 利用 MS-2 型磁化率仪进行样品低频(χ_{lf} , 0.47 kHz)和低频(χ_{hf} , 4.7 kHz)磁化率测量, 并计算百分比频率磁化率(χ_{fd})。

(2) 利用 Dtech 2000 型交变退磁仪对样品进行交变退磁(交变磁场峰值为 100 mT, 直流磁场为 0.04 mT), 获得非磁滞剩磁(ARM)。利用 JR-6 型双速旋转磁力仪对样品 ARM 进行测定, 并计算非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})。

(3) 利用 MMPM10 型脉冲磁化仪按照 1 T、-100 mT、-300 mT 顺序进行脉冲磁化, 获得相应等温剩磁(IRM)。分别利用 JR-6 型双速旋转磁力仪测得 $\text{IRM}_{-1\text{ T}}$ (饱和等温剩磁, SIRM)、 $\text{IRM}_{-100\text{ mT}}$ 和 $\text{IRM}_{-300\text{ mT}}$ 。

(4) 按以下公式计算硬剩磁(HIRM)和退磁参数(S)的比值^[19]:

$$\text{HIRM}_{100} = (\text{SIRM} + \text{IRM}_{-100\text{mT}})/2 \quad (1)$$

$$\text{HIRM}_{300} = (\text{SIRM} + \text{IRM}_{-300\text{mT}})/2 \quad (2)$$

$$S_{-100} = 0.5 \times (\text{SIRM} - \text{IRM}_{-100\text{mT}})/\text{SIRM} \times 100 \quad (3)$$

$$S_{-300} = 0.5 \times (\text{SIRM} - \text{IRM}_{-300\text{mT}})/\text{SIRM} \times 100 \quad (4)$$

式中: SIRM ($\text{IRM}_{-1\text{ T}}$)、 $\text{IRM}_{-100\text{ mT}}$ 与 $\text{IRM}_{-300\text{ mT}}$ 分别代表在 1 T、-100 mT、-300 mT 下进行脉冲磁化所测得的等温剩磁; HIRM_{100} 与 HIRM_{300} 分别代表所对应等温剩磁下计算得到的硬剩磁; S_{-100} 与 S_{-300} 分别代表所对应硬剩磁下计算得到的退磁参数。

2 结果与讨论

2.1 NBT 01 柱样放射性核素比活度

本研究测量的新不列颠海沟轴部 NBT 01 站位沉积物柱状样中的放射性核素比活度如图 2 所示。该沉积物柱状样中放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 比活度范围分别

是 16.05 ~ 35.47 Bq/kg、14.60 ~ 25.88 Bq/kg、118 ~ 1634 Bq/kg、95 ~ 1613 Bq/kg、3.68 ~ 17.05 Bq/kg、142 ~ 596 Bq/kg; 比活度均值分别为 (20.51 ± 3.87) Bq/kg、 (22.03 ± 1.88) Bq/kg、 (475 ± 9.22) Bq/kg、 (453 ± 9.42) Bq/kg、 (7.74 ± 3.32) Bq/kg、 (276 ± 10.55) Bq/kg。

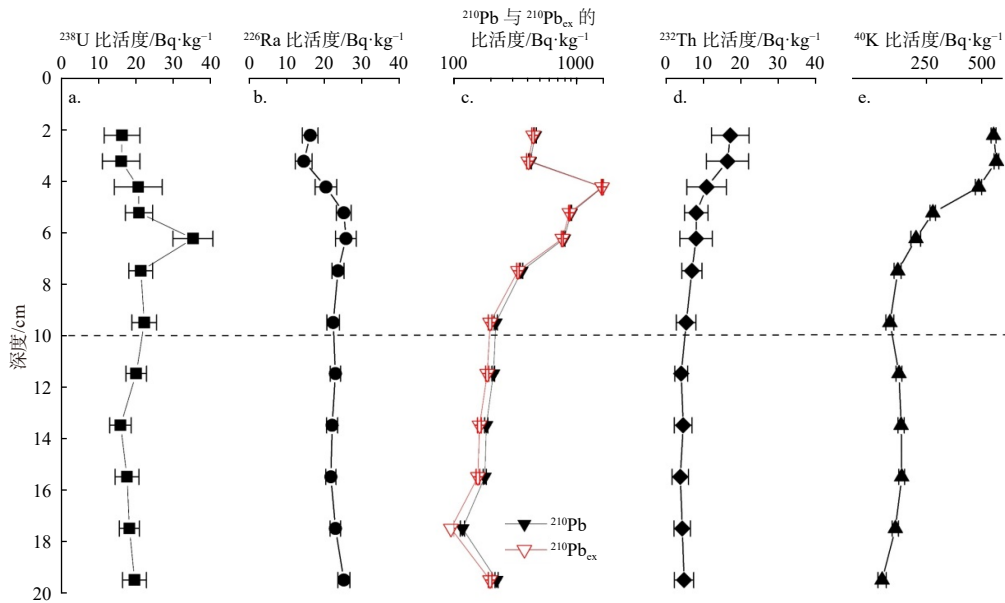


图 2 海沟轴部 NBT 01 沉积物柱状样中放射性核素 ^{238}U (a)、 ^{226}Ra (b)、 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)(c)、 ^{232}Th (d)、 ^{40}K (e) 比活度剖面

Fig. 2 Vertical profile of radioactivity of ^{238}U (a), ^{226}Ra (b), ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)(c), ^{232}Th (d), ^{40}K (e) in sediment core from the station of NBT 01 in the trench axis

NBT 01 柱样的各核素比活度深度剖面呈上、下两部分不同的分布特征: 10 cm 以浅的每种核素比活度存在不同程度的垂向波动, 10 cm 以深的各核素比活度则均表现出较为稳定的垂向特征。对 ^{238}U 和 ^{232}Th , 在 10 cm 以浅, 各层核素比活度较 10 cm 以深层位更大, 对 ^{226}Ra 则反之。在 6 ~ 6.5 cm, ^{238}U 比活度表现出高于 UNSCEAR^[20] 全球平均值 (30 Bq/kg) 的高值 $[(35.47 \pm 5.33)$ Bq/kg], 可能指示特殊的沉积物来源。

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{40}K 在全深度 (2 ~ 20 cm) 具有较其他核素更明显的垂向变化特征。对 ^{40}K , 在 2 ~ 4.5 cm 出现最高比活度范围值 (477 ~ 596 Bq/kg), 该值显著高于 UNSCEAR^[20] 公布的全球平均值 (400 Bq/kg), 可能存在具有高 ^{40}K 比活度特征的沉积物组分。对 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, 在 4 ~ 6.5 cm 存在最高

比活度范围值 (767 ~ 1613 Bq/kg), 指示可能存在物源变化, 导致沉积物年龄发生倒转, 相对于 4 cm 以浅的沉积物年龄更年轻。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在 10 cm 以深的沉积物中比活度变化范围较小 (95 ~ 198 Bq/kg), 在深海 10 cm 以深的沉积物中, 该值属于较高水平 (深海地区的沉积速率通常低于 1 mm/kyr, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 仅可在沉积柱顶部 1 mm 内检测到^[21-23]), 意味着此处的沉积速率可能异常高。考虑到生物扰动对沉积物的影响通常发生在水-沉积物界面以下的较浅深度^[24-26], 同时, 在该区域依据 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{TOC}}$ ^[12] 所得到的沉积速率可达 1.3 ~ 10.2 cm/kyr, 本文认为该采样站位的沉积物可能并非稳定的自然沉积, 而是具有其他多种复杂的沉积物来源, 这会导致沉积速率的计算与定年结果的较大不确定性, 因此, 确定研究区

沉积物来源是为在此区域进行后续研究而必须解决的首要问题。

2.2 NBT 01 柱样磁学参数垂向特征

NBT 01 柱样环境磁学参数特征如图 3 所示。磁化率 χ 是沉积物中磁性矿物的种类、含量和粒度的综合体现^[27], 可用于粗略指示沉积物中磁性矿物的含量。柱样中 χ 的变化范围为 $(26.68 \sim 43.99) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。饱和等温剩磁 SIRM 不受磁

性矿物、逆磁性矿物及超顺磁颗粒的影响, 可指示亚铁磁性矿物的含量。柱样中 SIRM 的变化范围为 $(40494.80 \sim 62817.23) \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。退磁参数 S_{ratio} 可反映不完整反铁磁性矿物和亚铁磁性矿物的相对比例, 柱样中 S_{-100} 在 87% 以上。SIRM 与 χ 的变化趋势基本一致, S_{ratio} 较高, 说明亚铁磁性矿物主导了 NBT 01 柱样的磁性特征。

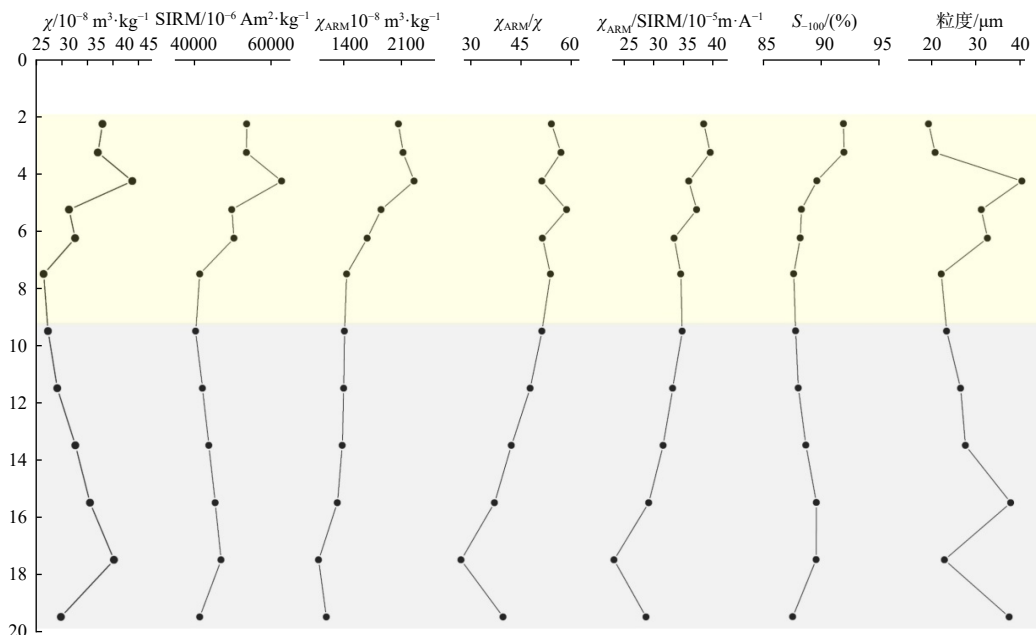


图 3 新不列颠海沟轴部 NBT 01 沉积物柱状样中环境磁学参数与平均粒径^[6] 特征

Fig. 3 Down-core magnetic parameters and median particle size of NBT 01 in the New Britain Trench

通常用于指示磁性矿物晶粒大小的参数包括非磁滞剩磁磁化率 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, 范围分别为 $(1096.61 \sim 2257.45) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $27.14 \sim 58.72$ 和 $(23.30 \sim 39.57) \times 10^{-5} \text{ m/A}$ 。 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的值随深度的变化趋势与 χ 和 SIRM 呈镜像分布, 而 χ_{ARM} 在 10 cm 以浅随深度的变化趋势与 χ 和 SIRM 类似, 在 10 cm 以深则同样与 χ 和 SIRM 呈镜像。根据沉积物磁性特征随深度的变化趋势, 可以 10 cm 为界将 NBT 01 柱样沉积物分为两部分, 在 10 cm 以浅, 环境磁学参数值的波动较频繁, 且各参数的平均值皆高于 10 cm 以深的平均数据。该磁学参数特征与核素在柱样 10 cm 以浅的变化特征相似, 反映相比于 10 cm 以浅, 10 cm 以深的沉积物中亚铁磁性矿物更多, 磁性矿物颗粒更细的特征, 指示

上下两部分物源存在显著差异。

2.3 沉积物来源解析

2.3.1 基于天然放射性核素的物源分析

对比沉积物的核素特征可判别沉积物的来源。图 4 为新不列颠海沟轴部 NBT 01 柱样 2 ~ 20 cm 各层 ^{232}Th 与 ^{238}U 比活度的分布, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 为 0.2 ~ 1.1。根据比值的接近程度可分为三个层段: 第 1 层段为顶部 2 ~ 4 cm, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 集中在 1.0 附近。第 2 层段为中部 4 ~ 10 cm, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 相对分散, 范围为 0.2 ~ 0.6, 除 6 ~ 6.5 cm 存在异常高的 ^{238}U 比活度外, 该层段 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 随深度的增加逐渐降低, 其中 4 ~ 4.5 cm 接近表层 2 ~ 4 cm 的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, 9 ~ 10 cm 接近底部 10 cm 以下的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 。第 3 层段为底部 9 ~ 20 cm, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 集中在 0.2 附近。

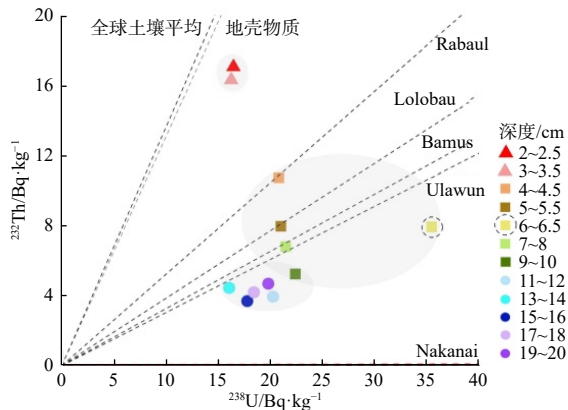


图4 NBT 01 柱样各层、周边区域^[28]及全球平均^[29]沉积物中²³²Th和²³⁸U比活度的关系

Fig. 4 Relationship between ²³²Th and ²³⁸U in sediments from NBT 01, surrounding areas, and world average

沉积物中²³²Th、²³⁸U分属于2个独立的衰变系列之首,半衰期超过1亿年,在地壳中的含量较为恒定,陆源物质中²³²Th/²³⁸U比值接近于地壳物质及全球土壤平均值(1.3~1.4)^[28-29]。²³²Th/²³⁸U主要取决于母体源岩矿物的性质^[30],能较好地指示沉积物的来源^[31]。新不列颠海沟NBT 01柱样中2~4 cm沉积物的²³²Th/²³⁸U与地壳及全球土壤平均值最为接近,说明NBT 01柱样顶部2~4 cm沉积物与地壳(土壤)沉积物具有一定同源性。Lin等^[12]通过对NBT 01顶部4 cm沉积物中Sr-Nd同位素进行比对,以及莎草科植物种子的发现,证明该层段沉积物来自新不列颠岛第四纪河流的长英质岩为主,核素结果为此结论提供了新的证据。

Lin等^[12]指出,NBT 01柱样中存在火山成因的基性和/或超基性岩。不同于²³²Th易于吸附在包括黏土矿物在内的铝硅酸盐矿物上,在放射学中,基性岩石含有低浓度的不稳定元素,因此²³²Th等核素的放射性非常低^[32],相比长英质岩表现出更低的放射性活度^[33]。此外,Santos等^[34]指出,由于在火山岩的形成过程中涉及地幔和/或地壳源的部分熔融以及部分结晶,长期放射性平衡的条件受到干扰^[35-36],分馏矿物相的小型共岩浆捕虏体可能导致U相对于Th在基性和/或超基性火山岩中的相对富集。新不列颠岛东部四大活火山(Rabaul、Ulawun、Bamus、Lolobau)熔岩的²³²Th/²³⁸U比值范围为0.3~0.6^[37],同样

地,NBT 01柱样中4~4.5 cm、5~5.5 cm及7~8 cm沉积物中的²³²Th/²³⁸U比值在此范围内,本文推断NBT 01柱样4~10 cm层位中大部分沉积物受到新不列颠岛上火山物质输入的影响。然而,该层位中6~6.5 cm、9~10 cm沉积物中的²³²Th/²³⁸U相对其他层位偏低,这说明柱样中²³²Th或²³⁸U的来源可能受其他物源输入的影响。

Luo等^[6]发现在NBT 01柱样10 cm以下存在大量碳酸盐沉积(高达60%以上),这可能与位于新不列颠岛东部热带雨林中的Nakanai洞穴独特的喀斯特石灰岩地貌有关。该溶洞中地下河水流非常湍急,水量可达20 t/s^[38]。同时,Audra和Richard^[39]已证实,地震会导致该区域喀斯特洞穴的严重垮塌,碳酸盐岩剥蚀率可达400 m³/km²/yr;且该洞穴中灰岩的U-Th系列存在显著不平衡,²³²Th/²³⁸U仅为0.02。柱样9~20 cm沉积物中²³²Th/²³⁸U偏低,但明显高于Nakanai灰岩的²³²Th/²³⁸U,可能是由于该层段仍含有少量长英质岩(20%)和黏土矿物(10%)^[13]。由于颗粒活性核素²³²Th吸附于此类碎屑颗粒物,导致了²³²Th/²³⁸U高于Nakanai洞穴中的灰岩。此外,9~10 cm沉积物中²³²Th比活度相对更高,应含有较10 cm以下层位更多的陆源和/或火山物质。

陆源物质中的母子体核素²³⁸U和²²⁶Ra通常接近平衡状态(²²⁶Ra/²³⁸U=1);同时,海水中的²²⁶Ra和²³⁸U都拥有较为保守的生物地球化学行为。²²⁶Ra/²³⁸U的比值仅与区域地质环境特征密切相关,因此²²⁶Ra/²³⁸U常被用来作为识别沉积物来源的良好指示剂^[29]。图5为新不列颠海沟轴部NBT 01柱样2~20 cm各层²²⁶Ra/²³⁸U与²³²Th比活度的分布。NBT 01柱样中,顶部2~4 cm,中部4~4.5 cm、9~10 cm的²²⁶Ra/²³⁸U比值最接近1。根据核素比可判断其与陆源沉积物同源,这与上文根据²³²Th/²³⁸U比值得出的结论相一致。中部5~5.5 cm、7~8 cm的²²⁶Ra/²³⁸U为1.1~1.2,与周边火山²²⁶Ra/²³⁸U相近。底部10 cm以下²²⁶Ra/²³⁸U偏高,范围为1.1~1.4。Papadopoulos^[40]指出,²²⁶Ra/²³⁸U>1是由于水通过裂隙扩散渗透,U从岩石中浸出、损失而导致U贫化。在含有方解石的沉积物中,U受到明显的化学风化作用

影响, 流动性更高, 能够以稳定且可溶的碳酸盐络合物形式迁移到水体中^[41]。同时, 虽然研究区濒临巴布亚湾的珊瑚礁碳酸盐沉积区, 但 Lin 等^[28]在南海珊瑚礁区获得的珊瑚礁碳酸盐具有较低的 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ (<0.1), 说明新不列颠海沟 NBT 01 底部碳酸盐并非来自周边的珊瑚礁区。由于新几内亚大陆的阻隔, Coral Sea Current (CSC, 珊瑚海流) 难以将巴布亚湾内珊瑚礁沉积物运输至新不列颠海沟附近。因此, 根据 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 同样推断底部 10 cm 以下沉积物主要来自邻近的碳酸盐岩区。

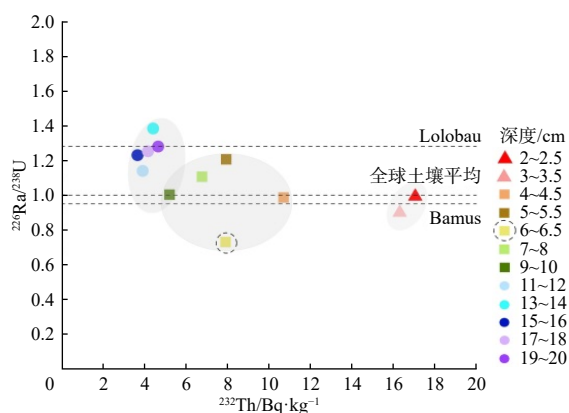


图 5 NBT 01 柱样各层、周边区域^[33] 及全球平均^[31] 沉积物中 ^{232}Th 和 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 比活度关系

Fig. 5 Relationship between ^{232}Th and $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ in sediments from NBT 01, surrounding areas, and world average

值得注意的是, 6 ~ 6.5 cm 沉积物中的 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 为 0.7, 接近 3 ~ 3.5 cm 的 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$, ^{232}Th 比活度值也与 2 ~ 4 cm 相接近, 指示沉积物中可能含有陆源物质。该层段的 ^{238}U 异常富集(图 4), 在一些土壤沉积物中, ^{238}U 的较高值也受到研究区地质结构变化或高化肥利用率的影响^[42]。在柱样 7 cm 附近检测到人工放射性核素 ^{241}Am , 证明 7 cm 附近沉积物年代在 1954 年以后^[6]。20 世纪 60 年代以前, 巴布亚新几内亚(PNG)经济以农业活动为主^[43], 在 NBT 01 柱样中, 6 ~ 6.5 cm 所含陆源沉积物可能记录到化肥使用所导致的较高 ^{238}U 比活度。此外, 在 PNG 区域, 当地农民常在火山喷发后通过引入有机材料作为覆盖物, 迅速在火山灰基底上创造出可用于耕作的土壤^[44]。4 ~ 10 cm 沉积物以火山来源为主, 该

层段内, 有机肥料在火山事件后的大量使用也可能是导致 6 ~ 6.5 cm 的 ^{238}U 比活度异常高的因素之一。

对于 ^{40}K 的来源, 如图 6 所示, NBT 01 柱样顶部 6 cm 以上的陆源沉积物记录到 ^{40}K 的高比活度。PNG 地区具有丰富的矿产资源(Au、Cu、Ni 和 Co 矿)及炼油厂^[45]。20 世纪 60 年代以后, PNG 经济活动中采矿业的贡献急剧上升, 1972 年, 世界最大的铜金矿 Panguna 矿场开始生产, 当地矿产量激增^[46], 由于污染严重, 20 世纪 90 年代后一部分矿区逐渐关闭^[46-47]。受采矿活动影响, 沉积物中一些亲石元素(Ti、Al 和 V 等)的浓度会表现得异常高^[48]。NBT 01 柱样中 ^{40}K 与 Ti、Al^[13] 具有良好的相关性($R^2>0.7$)(图 7), 顶部 2 ~ 6 cm 沉积物中可能记录到人类采矿活动对 ^{40}K 的贡献。此外, ^{40}K 在藻类中具有高含量特征^[49], 沉积物中藻类等海洋生物也是导致 ^{40}K 高比活度值的可能因素^[49-52]。Furnas 等^[53] 对研究区附近的澳大利亚与新几内亚岛之间海域海洋初级生产力(NPP)的相关研究指出, 20 世纪 90 年代以后该区域初级生产力平均值比 20 世纪 60 年代高 2 倍多。20 世纪 70 年代以后, 研究区周边工业化的快速发展与近年来全球气候的变化可能使得河流与沿岸水体营养物质增加, 从而导致能够富集 ^{40}K 的海洋藻类的爆发。

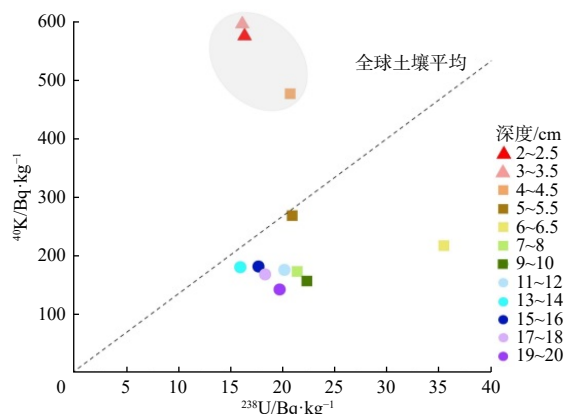


图 6 NBT 01 柱样各层及全球平均^[29] 沉积物中 ^{40}K 和 ^{238}U 比活度关系

Fig. 6 Relationship between ^{40}K and ^{238}U in sediments from NBT 01, and world average

基于上文讨论, 根据沉积物核素 (^{232}Th 、

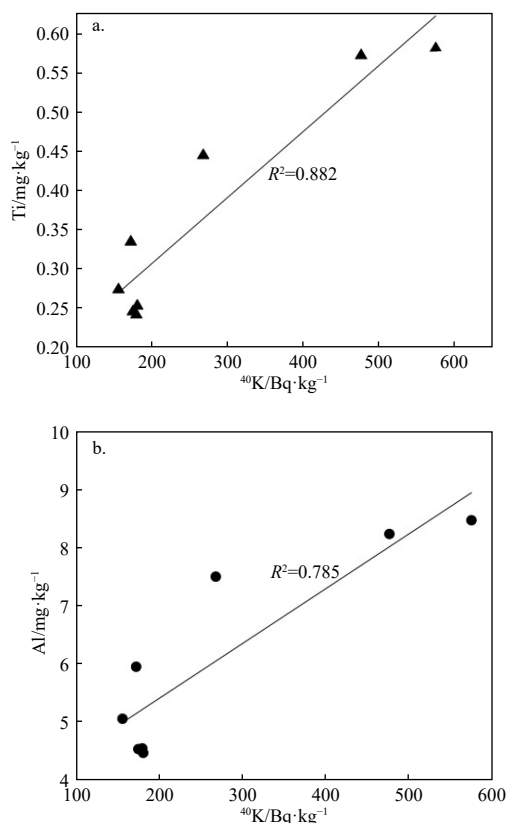


图7 NBT 01 柱样各层 ^{40}K 和金属元素 $\text{Ti}^{[13]}$ (a)、 $\text{Al}^{[13]}$ (b) 的相关性分析

Fig. 7 Liner relationship between ^{40}K and metal elements Ti (a), Al (b) of NBT 01

^{226}Ra 、 ^{238}U 比活度, 新不列颠海沟沉积物具有陆源(河流沉积物、火山岩碎屑)、海源(海洋生物碎屑)和浅海陆架(碳酸盐岩穴)三类主要来源; 来自陆地的大量沉积物记录到人类活动的影响(图8)。

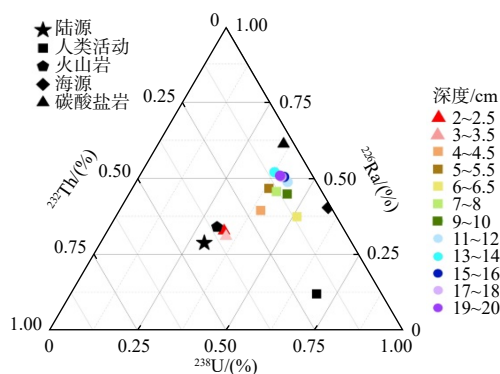


图8 海沟沉积物核素的三端元图

Fig. 8 Three terminal element diagram of nuclides in trench sediments

2.3.2 基于磁学参数的物源分析

磁性矿物多富集于黏土和细粉砂组分($<16\ \mu\text{m}$), 磁性特征可能受到粒度效应的影响。利用沉积物的平均粒径和磁性参数进行相关性分析(图9), 以确定粒度效应对磁学参数的影响程度。结果显示: χ 和 SIRM 与平均粒度的相关性均较差。该结果指示沉积物受到粒度效应的影响有限, 沉积物磁性特征的差异主要受控于物源差异, 即磁性矿物的不同来源导致磁性特征的不同。

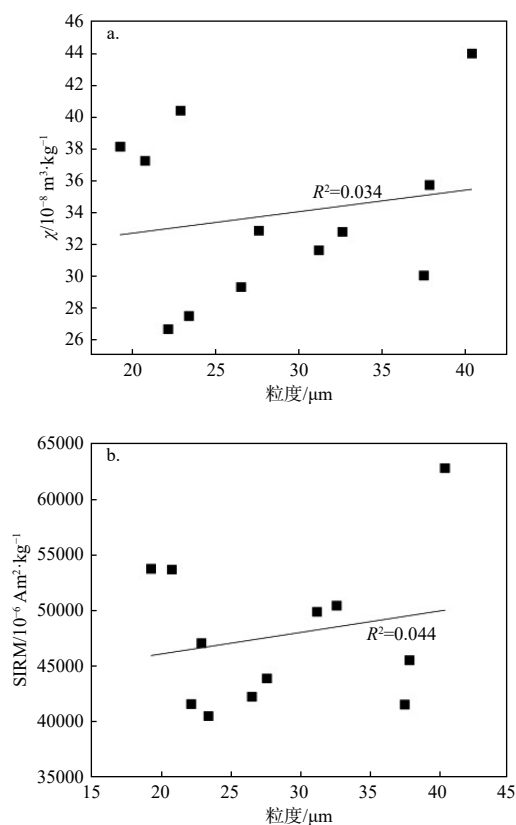


图9 NBT 01 柱样各层磁学参数 χ (a)、SIRM (b) 和粒度的相关性分析

Fig. 9 Liner relationship between magnetic parameters χ (a), SIRM (b) and particle-size of NBT 01

NBT 01 柱样沉积物的磁性主要受到亚铁磁性矿物控制, 利用 SIRM- χ 散点图可以初步判断沉积物中亚铁磁性矿物的来源是否一致^[54]。如图10所示, NBT 01 柱样各层沉积物的拟合优度为0.83, 说明各层磁铁矿物的性质差异相对较小。

相比于10~20 cm沉积物, 2~8 cm沉积物

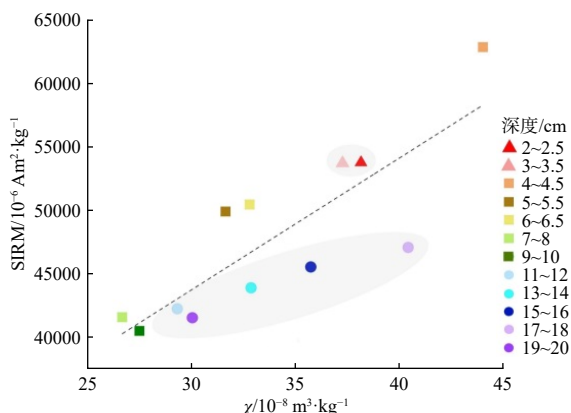
图 10 NBT 01 柱样各层沉积物中 χ 和 SIRM 的关系

Fig. 10 Relationship between χ and SIRM in sediments from NBT 01

的 SIRM 和 χ 偏高, 其中 4~4.5 cm 沉积物的 SIRM 和 χ 显著偏高, 且明显不在拟合线上, 考虑到周边采矿活动频繁, 可能是采矿产生的粗颗粒磁性矿物使沉积物中磁性矿物的含量增加所致, 印证上文所述沉积物中的核素对当地采矿活动的记录。9~20 cm 沉积物的 SIRM/ χ 和 χ 的值较低, 表明顺磁性铁硫化物相对于铁磁性矿物的贡献增加, 或者铁磁性颗粒的供应量较低^[54]。整体上, 表层 2~8 cm 与底部 10 cm 以下沉积物中磁性矿物的性质差异较大, 物源存在明显差异, 可明确将其分为两类来源。此外, 9~10 cm 沉积物的 SIRM- χ 基本落在拟合线上, 处于 7~8 cm 与 11~12 cm 之间, 可能受到不同来源沉积物混合的影响。

2.3.3 沉积物中 TOC 来源解析

海洋沉积物中的总有机碳 TOC 可分为陆源 (来自陆地植被) 和海源 (来自海洋藻类), 通过 TOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以判断陆源和海源的贡献。新不列颠海沟柱样 NBT 01 的 TOC 主要包括海洋藻类浮游植物、巴布亚新几内亚及新不列颠岛上老且难降解的土壤有机质(SOM)和 C_3 维管植物^[6]。

$\delta^{13}\text{C}$ 主要反映光合作用下有机碳的合成以及碳源的同位素组成, 不同类型光合作用固定的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 不同^[55]。通常, 陆地 C_3 维管植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -27‰, 海洋有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -19‰ ~ -22‰, 均值为 -20.5‰^[56-57]。新不列颠海沟 NBT 01 柱样中 TOC 的含量为 0.52%~0.84%, $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 -26.68‰ ~ -23.58‰ (图 11)。顶部 2 cm

的 TOC 含量 (0.69%~0.79%) 较高, 中部 4~10 cm 的 TOC 含量 (0.52%~0.67%) 较稳定, 底部 10~20 cm 的 TOC 含量在 15~16 cm 出现高值 (0.84%)。

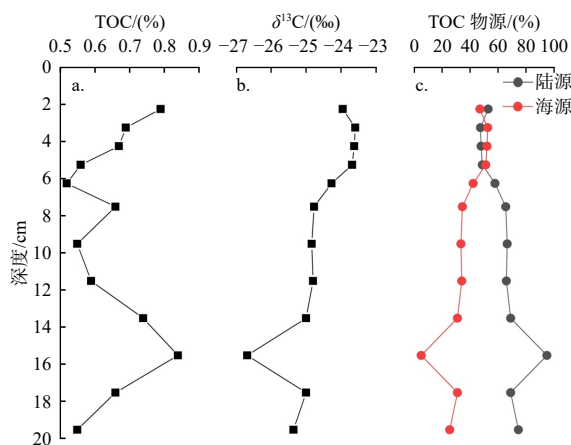


图 11 NBT 01 柱样中 TOC(a)^[6]、 $\delta^{13}\text{C}$ (b)^[6] 和 TOC 物源贡献比例(c)剖面图

Fig. 11 Vertical profiles of TOC(a), $\delta^{13}\text{C}$ (b) and contribution of TOC resource(c) in the sediment core of NBT 01

假设陆源和海源 TOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 端元值分别为 -27‰和 -20.5‰, 根据公式(5)、(6)的 $\delta^{13}\text{C}$ 二端元混合模型, 即可获得沉积物柱样中海源和陆源 TOC 贡献量的变化。

$$f_T(\%) = (\delta^{13}\text{C}_M - \delta^{13}\text{C}_S) / (\delta^{13}\text{C}_M - \delta^{13}\text{C}_T) \cdot 100\% \quad (5)$$

$$f_M(\%) = 100\% - f_T(\%) \quad (6)$$

式中: f_T 和 f_M 分别为陆源和海源有机物的贡献比例(%); $\delta^{13}\text{C}_M$ 和 $\delta^{13}\text{C}_T$ 分别为海源和陆源有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 的端元值; $\delta^{13}\text{C}_S$ 为样品有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 。

定量计算结果表明, NBT 01 柱样沉积物中陆源和海源有机碳贡献比例范围分别为 47.4%~95.1% 和 4.9%~52.6% (图 11 c)。10 cm 以下沉积物中, 除 15~16 cm 的陆源 TOC 含量出现极高值 (95%) 外, 陆源 TOC 含量稳定在 (70±5)%, 较顶部 10 cm 陆源 TOC 含量 [(57±9)%] 有所增加。

对柱样顶部 2~10 cm 的沉积物, ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 与 TOC 显著相关 ($R=0.814$, $R=0.784$, $R=0.784$, $P<0.05$), ^{40}K 与 $\delta^{13}\text{C}$ 显著相关 ($R=0.765$, $P<0.05$) (表 3), 表明这些参数间具有同源性。根据上文所述, 核素 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 主要与陆源输入相

关,⁴⁰K 则与藻类等海洋浮游生物吸附密切相关。上文已指出,研究柱样顶部 2~4 cm 的²³²Th/²³⁸U 和²²⁶Ra/²³⁸U 指示沉积物的强陆源性,而该层段的陆源 TOC 含量仅为 47%~53%,在全柱样中陆源 TOC 占比相对较小,该层段中⁴⁰K 所表现出的高比活度值可能指示藻类作为海

源 TOC 的大量输入。董良等^[58]指出,新几内亚区域内各类浮游生物含量较高,总浮游藻类生物量可达平均 3.19 ng/L,新不列颠岛南部尤其属于高浮游生物量区,叶绿素浓度可达 0.21 μg/L,且降雨量的增加,以及来自周边大陆的营养物质的输入,对浮游植物生物量都有显著影响。

表 3 NBT 01 柱样的核素比活度与粒度、TOC、TOC 的 δ ¹³ C 之间的 Pearson 相关系数									
Tab.3 Pearson correlation coefficient between nuclear radiation and particle size, TOC, δ ¹³ C of the sediment core									
		²¹⁰ Pb _{ex}	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	粒度	TOC	δ ¹³ C
柱样 2~10 cm	粒度	0.572	0.099	0.263	0.003	-0.334	1	0.189	-0.758
	TOC	-0.343	-0.750	-0.851	-0.580	0.741	0.189	1	-0.697
	δ ¹³ C	-0.029	0.200	0.309	0.512	-0.185	-0.758	-0.697	1
柱样 10~20 cm	粒度	0.922**	0.451	0.472	-0.330	-0.124	1	-0.413	0.353
	TOC	-0.042	-0.742	-0.810*	0.814*	0.784*	-0.413	1	0.333
	δ ¹³ C	0.599	-0.340	-0.436	0.654	0.765*	0.353	0.333	1

注: **为在 0.01 级别,相关性显著; *为在 0.05 级别,相关性显著

对柱样 10~20 cm 沉积物,各核素、粒度、TOC,与 TOC 的 δ¹³C 之间均不具有相关性(表 3),说明沉积物与 TOC 的来源可能不一致。由于沿岸 Nakanai 喀斯特地貌被茂密的植被所覆盖,集中了巨大的陆源生物量^[28],是间接导致陆源 TOC 贡献较大的可能因素。在 15~16 cm,沉积物具有较大的平均粒径与 TOC%,陆源 TOC 贡献达 95%,但颗粒活性核素²¹⁰Pb 比活度在该层位并未表现出高值,且²³²Th/²³⁸U、²²⁶Ra/²³⁸U 等指示沉积物来源的参数并未表现出与该层段中其他层位的差异,推测该层位 TOC 来源与 10~20 cm 中其他层位也是一致的。

3 结论

(1)新不列颠海沟(NBT)与陆地较近的距离(55 km)及其特殊的漏斗形地形,导致陆源物质能够快速搬运至海沟轴部。海沟轴部 NBT 01 柱样的沉积物来源可分为三部分:顶部 2~4 cm 是来自陆源的河流沉积物为主;中部 4~10 cm 是以火山沉积物为主的稳定沉积阶段,同时含有一定量的陆源沉积物;底部 10~20 cm 是以碳酸盐岩为主的沿岸喀斯特地貌沉积物。基于柱样中 TOC 来源贡献量的变化,以及核素与 TOC、TOC 的 δ¹³C 的相关性,认为对于 NBT 01 柱样,2~10 cm

沉积物中的 TOC 与核素所指示的沉积物来源较一致;10~20 cm 沉积物中的 TOC 则伴随着碳酸盐岩的快速输入,由覆盖于岩穴的热带雨林植被与土壤有机碳提供。

(2)海沟轴部 NBT 01 柱样顶部 10 cm 以上沉积物中的放射性核素具有明显的垂向差异,可能受到当地人类活动的影响。

参考文献:

[1] ARISTEGUI J, GASOL J M, DUARTE C M, et al. Microbial oceanography of the dark ocean's pelagic realm[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(5): 1501-1529.

[2] 李三忠, 索艳慧, 朱俊江, 等. 海沟系统研究的进展与前沿[J]. *中国科学:地球科学*, 2020, 50(12): 1874-1892.

[3] SMITH C R, DE LEO F C, BERNARDINO A F, et al. Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(9): 518-528.

[4] DANOVARO R, CROCE N D, DELL'ANNO A, et al. A depocenter of organic matter at 7800 m depth in the SE Pacific Ocean[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2003, 50(12): 1411-1420.

[5] WENZHÖFER F, OGURI K, MIDDELBOE M, et al. Benthic carbon mineralization in hadal trenches: Assessment by in situ O₂ microprofile measurements[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 116: 276-286.

[6] LUO M, GIESKES J, CHEN L Y, et al. Sources, degradation,

- and transport of organic matter in the new Britain shelf - trench continuum, Papua new guinea[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2019, 124(6): 1680-1695.
- [7] KIOKA A, SCHWESTERMANN T, MOERNAUT J, et al. Event stratigraphy in a hadal oceanic trench: the Japan trench as sedimentary archive recording recurrent giant subduction zone earthquakes and their role in organic carbon export to the deep sea[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 319.
- [8] GLUD R N, BERG P, THAMDRUP B, et al. Hadal trenches are dynamic hotspots for early diagenesis in the deep sea[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 21.
- [9] KIOKA A, STRASSER M. *Oceanic trenches*[M]//SHRODER J F. *Treatise on Geomorphology*. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2022: 882-900.
- [10] BAO R, STRASSER M, MCNICHOL A P, et al. Tectonically-triggered sediment and carbon export to the Hadal zone[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 121.
- [11] OGURI K, MASQUÉ P, ZABEL M, et al. Sediment accumulation and carbon burial in four hadal trench systems[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2022, 127(10): e2022JG006814.
- [12] LIN G, LUO M, CHEN L Y, et al. Geochemistry and mineralogy of the sediments in the New Britain shelf-trench continuum, offshore Papua New Guinea: insights into sediment provenance and burial in hadal trenches[J]. *Deep Sea Research Part I:Oceanographic Research Papers*, 2021, 177: 103621.
- [13] XIAO W J, XU Y P, HAGHIPOUR N, et al. Efficient sequestration of terrigenous organic carbon in the New Britain Trench[J]. *Chemical Geology*, 2020, 533: 119446.
- [14] AUDRA P. The role of seismic activity in the formation of large underground cavities in the Muruk System, Nakanai Mountains, New Britain, Papua New Guinea[J]. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 2011 (10): 46-51.
- [15] DAVIES H L, HONZA E, TIFFIN D L, et al. Regional setting and structure of the western Solomon Sea[J]. *Geo - Marine Letters*, 1987, 7(3): 153-160.
- [16] WU J W, LIU Z F, ZHOU C. Late quaternary glacial cycle and precessional period of clay mineral assemblages in the western pacific warm pool[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(28/29): 3748-3760.
- [17] AIELLO I W, BOVA S C, HOLBOURN A E, et al. Climate, sea level and tectonic controls on sediment discharge from the Sepik River, Papua New Guinea during the Mid- to Late Pleistocene[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105954.
- [18] 林武辉, 余克服, 王英辉, 等. 海洋沉积过程的铀系放射性核素示踪技术: 物源识别、沉积、再悬浮[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 60-70.
- [19] YU L Z, OLDFIELD F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements[J]. *Quaternary Research*, 1989, 32(2): 168-181.
- [20] CHARLES M. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2001, 21(1): 83.
- [21] DÍAZ-ASENCIO M, HERGUERA J C, SCHWING P T, et al. Sediment accumulation rates and vertical mixing of deep-sea sediments derived from ^{14}C and ^{210}Pb in the southern gulf of Mexico[J]. *Marine Geology*, 2020, 429: 106288.
- [22] SMITH J N, SCHAFER C T. Bioturbation processes in continental slope and rise sediments delineated by Pb-210, microfossil and textural indicators[J]. *Journal of Marine Research*, 1984, 42(4): 1117-1145.
- [23] MÜLLER P J, SUESS E. Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans—I. Organic carbon preservation[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1979, 26(12): 1347-1362.
- [24] OFFICER C B. Mixing, sedimentation rates and age dating for sediment cores[J]. *Marine Geology*, 1982, 46(3/4): 261-278.
- [25] NOZAKI Y, COCHRAN J K, TUREKIAN K K, et al. Radiocarbon and ^{210}Pb distribution in submersible-taken deep-sea cores from Project FAMOUS[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 34(2): 167-173.
- [26] YANG Z F, QIAN Q K, CHEN M, et al. Enhanced but highly variable bioturbation around seamounts in the northwest Pacific[J]. *Deep Sea Research Part I:Oceanographic Research Papers*, 2020, 156: 103190.
- [27] 肖春风, 孙启顺, 陈亮, 等. 南海西北部16 kaBP以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(1): 13-26.
- [28] LIN W H, YU K F, WANG Y H, et al. Radioactive level of coral reefs in the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 43-53.
- [29] WANG J L, DU J Z, BI Q Q. Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 602-608.
- [30] MISSIAEN L, PICHAT S, WAELBROECK C, et al. Down-core variations of sedimentary detrital ($^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$) ratio: implications on the use of $^{230}\text{Th}_{\text{xs}}$ and $^{231}\text{Pa}_{\text{xs}}$ to reconstruct sediment flux and ocean circulation[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(8): 2560-2573.
- [31] 冯禹. 北部湾沉积物中放射性核素: 分布特征、输运机制、生物辐射影响评估[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [32] SCHÖN S J. Nuclear/radioactive properties[J]. *Handbook of Petroleum Exploration and Production*, 2011, 8: 107-148.
- [33] FAURE G, MENSING T M. *Isotopes: principles and applications*[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2004.
- [34] SANTOS R N, MARQUES L S. Investigation of ^{238}U - ^{230}Th

- ^{226}Ra and ^{232}Th - ^{228}Ra - ^{228}Th radioactive disequilibria in volcanic rocks from Trindade and Martin Vaz Islands (Brazil; Southern Atlantic Ocean)[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2007, 161(3): 215-233.
- [35] ALLEGRE C J, CONDOMINES M. Fine chronology of volcanic processes using ^{238}U - ^{230}Th systematics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28(3): 395-406.
- [36] CONDOMINES M, HEMOND C, ALLÈGRE C J. U-Th-Ra radioactive disequilibria and magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3): 243-262.
- [37] CUNNINGHAM H, GILL J, TURNER S, et al. Rapid magmatic processes accompany arc-continent collision: the Western Bismarck arc, Papua New Guinea[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 164(5): 789-804.
- [38] GABRIEL J, SPECHT J, LEAVESLEY M, et al. The Nakanai mountain ranges of east new Britain, Papua new guinea[R]. Cairns: James Cook University, 2018.
- [39] AUDRA P, RICHARD M. Nakanai caves, Papua new guinea[M]//GUNN J. *Encyclopedia of Cave and Karst Science*. New York: Fitzroy Dearborn, 2004.
- [40] PAPADOPOULOS A, CHRISTOFIDES G, KORONEOS A, et al. Radioactive secular equilibrium in ^{238}U and ^{232}Th series in granitoids from Greece[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, 75: 95-104.
- [41] VON GUNTEN H R, SURBECK H, RÖSSLER E, et al. Uranium series disequilibrium and high thorium and radium enrichments in karst formations[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(4): 1268-1274.
- [42] SANTAWAMAITRE T, MALAIN D, AL-SULAITI H A, et al. Determination of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K activity concentrations in riverbank soil along the Chao Phraya river basin in Thailand[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, 138: 80-86.
- [43] ASAFU-ADJAYE J. Revitalising growth in Papua new Guinea's agricultural sector[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 51(3): 299-316.
- [44] TORRENCE R. Volcanic disasters and agricultural intensification: a case study from the Willaumez Peninsula, Papua New Guinea[J]. *Quaternary International*, 2012, 249: 151-161.
- [45] 姚仲友, 赵宇浩, 朱意萍, 等. 巴布亚新几内亚陆缘火山岛弧成矿带铜金成矿规律[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(6): 1187-1201.
- [46] MUDD G M, ROCHE C, NORTHEY S A, et al. Mining in Papua new guinea: a complex story of trends, impacts and governance[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140375.
- [47] HAYWOOD M D E, DENNIS D, THOMSON D P, et al. Mine waste disposal leads to lower coral cover, reduced species richness and a predominance of simple coral growth forms on a fringing coral reef in Papua New Guinea[J]. *Marine Environmental Research*, 2016, 115: 36-48.
- [48] OROSUN M M, OYEWUMI K J, USIKALU M R, et al. Dataset on radioactivity measurement of Beryllium mining field in Ifelodun and Gold mining field in Moro, Kwara State, North-central Nigeria[J]. *Data in Brief*, 2020, 31: 105888.
- [49] MONIAKOWSKA A, ZHANG D, BLOCK-ŁASZEWSKA K, et al. Radioactive isotopes ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{234}Th in algae supplements – Potential radiotoxicity of aquatic superfoods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 114: 104862.
- [50] MIETELSKI J W, OLECH M A, SOBIECH-MATURA K, et al. ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{90}Sr in biological samples from King George Island (Southern Shetlands) in Antarctica[J]. *Polar Biology*, 2008, 31(9): 1081-1089.
- [51] DESIDERI D, GIULIANI S, TESTA C, et al. ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am levels in terrestrial and marine ecosystems around the Italian base in Antarctica[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2003, 258(2): 221-225.
- [52] ABEDIN M J, KARIM M R, HOSSAIN S, et al. Spatial distribution of radionuclides in agricultural soil in the vicinity of a coal-fired brick kiln[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(7): 236.
- [53] FURNAS M J, CARPENTER E J. Primary production in the tropical continental shelf seas bordering northern Australia[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 129: 33-48.
- [54] BADESAB F, GAIKWAD V, VENKATESHWARLU M, et al. Genesis and preservation of authigenic magnetite and greigite in the cold seep sediments, Bay of Bengal[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 151: 106212.
- [55] 陈法锦, 陈建芳, 金海燕, 等. 南海表层沉积物与沉降颗粒物中有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 对比研究及其古环境再造意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 340-345.
- [56] SMITH B N, EPSTEIN S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1971, 47(3): 380-384.
- [57] FRY B, SHERR E B. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems[C]//*Proceedings of the Conference on Stable Isotopes in Ecological Research*. New York: Springer, 1989: 196-229.
- [58] 董良, 李丽, 王慧, 等. 2008年冬季西太平洋表层海水浮游藻类分布特征——分子有机地球化学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 51-59.