

太平洋 CC 区构造特征与 多金属结核成矿条件研究*

王述功 刘忠臣 刘保华 吴金龙

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

提要 1994年4—11月,国家海洋局组织和实施了DY85-4航次中国开辟区(太平洋CC区)多金属结核(下简称结核)勘探,海上勘查历时225d,勘查面积达 $65 \times 10^3 \text{km}^2$,其中,用重力、磁力和单道地震等方法对测区进行了地球物理调查。结果表明,火山和浅层侵入体是提供结核生成的重要物质来源。区域性的沉积间断是造成结核丰度偏高的重要因素。断块活动强烈的地区,断裂活动有利于金属元素在海底的富集。不同时代形成的海底,地幔原岩在成分上的差异或在洋壳形成过程中构造活动的差异,对结核的形成有着一定的控制因素。而上述地质构造活动,在地球物理特征上都有着明显的反映。由此可见,地球物理特征与结核的形成和富集规律有着明显的相关关系。

关键词 克拉里昂-克里帕顿断裂带 火山活动 断块活动 多金属结核成矿条件

学科分类号 P738

太平洋CC区蕴藏着丰富的结核等矿产资源。60年代后期以来,德国、法国、日本和韩国等先后在该区进行了结核的调查和研究。中国的结核调查研究虽起步较晚,但由于近十年内对该地区完成了10多个航次的调查,并取得了可喜的成果,故于1991年被联合国正式批准为“先驱投资者”。依据DY85-4航次调查资料,本文对太平洋CC区的构造特征以及结核的成矿条件作进一步的探讨。

1 资料来源和研究方法

1994年4—11月在太平洋CC区进行了DY85-4航次多金属结核调查,地球物理调查包括重力、磁力和单道地震。获得了高分辨率的地震剖面和高精度的重磁剖面。本文依据DY85-4航次的调查结果,对高分辨率的地震资料首先进行计算机处理,然后再进行地层划分;利用实测的重力异常,使用 Sin/x 法反演莫霍面深度;使用二维板状组合体理论公式,计算了理论磁异常剖面,并与实测的磁异常剖面进行对比,最后确定出洋底的年龄。

2 研究结果

2.1 地震层序划分及其分布规律

DY85-4航次在中国开辟区的调查分东、西两区,均位于东赤道太平洋海域的CC区,西邻北西走向的莱恩群岛,东接东太平洋海隆(扩张脊)的西翼,南北以近东西向的克拉里

*“九五”中国大洋协会“资源评价与地质研究”项目, DY95-02-04号。王述功,男,出生于1948年10月,副研究员, Fax: 0086-0532-2879562

收稿日期:1997-10-09,收修改稿日期:1998-11-18

昂和克里帕顿转换断层为界,属东太平洋海隆与莱恩群岛的接合部(James,1979)(图1)。Beiersdorf(1987)认为,148°W线为一区域性的突变线,而东、西两区分别位于其两侧(图1)。根据实测地震剖面反射波的振幅、频率和连续性,西区可划分成3大层序,自上而下分别由海底、反射界面A、B和声波基底所限定,其典型剖面见图2a。上部的层I为透明层,层内主要由中始新世以来的有孔虫和放射虫软泥组成,局部地区发育有良好的浊流沉积,层内可能缺失中、晚中新世和渐新世沉积;层II包括上部层状层和下部半透明层,主要含中始新世燧石和放射虫软泥互层,并夹有玄武岩流;层III为不透声散射层,为老第三纪和白垩纪的火山浊流岩和玄武岩流。层I和层II的反射时间分别为100—150ms(双程反射时间,下同)和140—160ms,它们除受火山侵入活动的影响地层发生中断或变薄外,可在全区连续追踪;层III顶部反射清楚,由两个强相位组成,但层内反射杂乱,由于反射界面B的强反射作用,从而降低了声波基底的穿透力,致使声波基底难以辨认,故连续追踪困难,且其厚度也不好确定。西区实测地震剖面与邻近的德国SO25-1区(同在148°W以西,为同一构造单元)(Beiersdorf,1987)的地震剖面(11-1线)相比(图3b),尽管在地层厚度上有着一定差别,但各层地震相均可对比。DSDP163孔位于西区近东(图1),实测实料的地层年代与DSDP163孔相类似(图3b)。

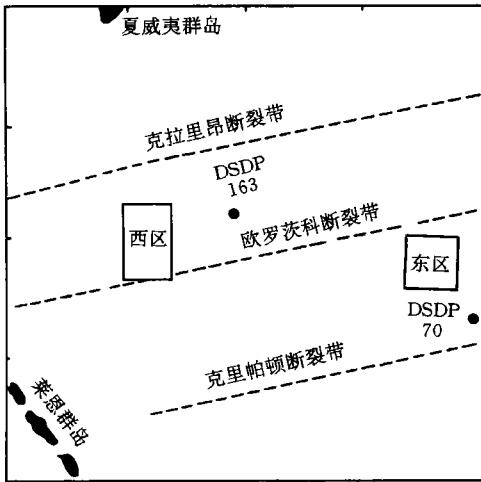


图1 测区位置和周边构造略图

Fig.1 The position of the survey regions and surrounding tectonic features

SO25-2区(Beiersdorf,1987)位于东区西北260km处,DSDP70孔位于东区以东300km处(图1),它们均位于148°W以东海域,属同一构造单元,故可进行对比。图3a给出了DSDP70孔的岩性地层和SO25-2区(VA08线)的地震地层,经比较发现,地层与实测的地震结果有较好的吻合。

2.2 构造活动

2.2.1 火山活动 西区位于莱恩海山链以东,水深通常在5200m左右,除由海山组成

实测地震剖面显示,东区沉积层的总反射时间约为400ms,由上往下可划分为3层,分别由海底、反射界面A、B和基底限定。各层虽因断裂和火山活动而不连续,但其相位组合和反射强度等特征仍可在全区追踪,其典型剖面见图2b。其中层I由两个亚层组成,上部一层为上透波层,反射时间一般为30ms,主要由第四纪/上新世的放射虫和沸石粘土及软泥所组成,其中缺失中中新世地层;下部为上层状层,反射时间为120—170ms,其内又可分为3个细层,主要为超微化石和放射虫软泥互层,时代为早中新世。层II为下透明层,反射时间为110ms,主要由放射虫、超微化石软泥和白垩组成,底部含燧石层,层II下部含渐新统;层III(下层状层),反射时间约为60—70ms,其内主要为中-晚始新世硅质(放射虫)超微化石白垩,夹燧石层。西德的

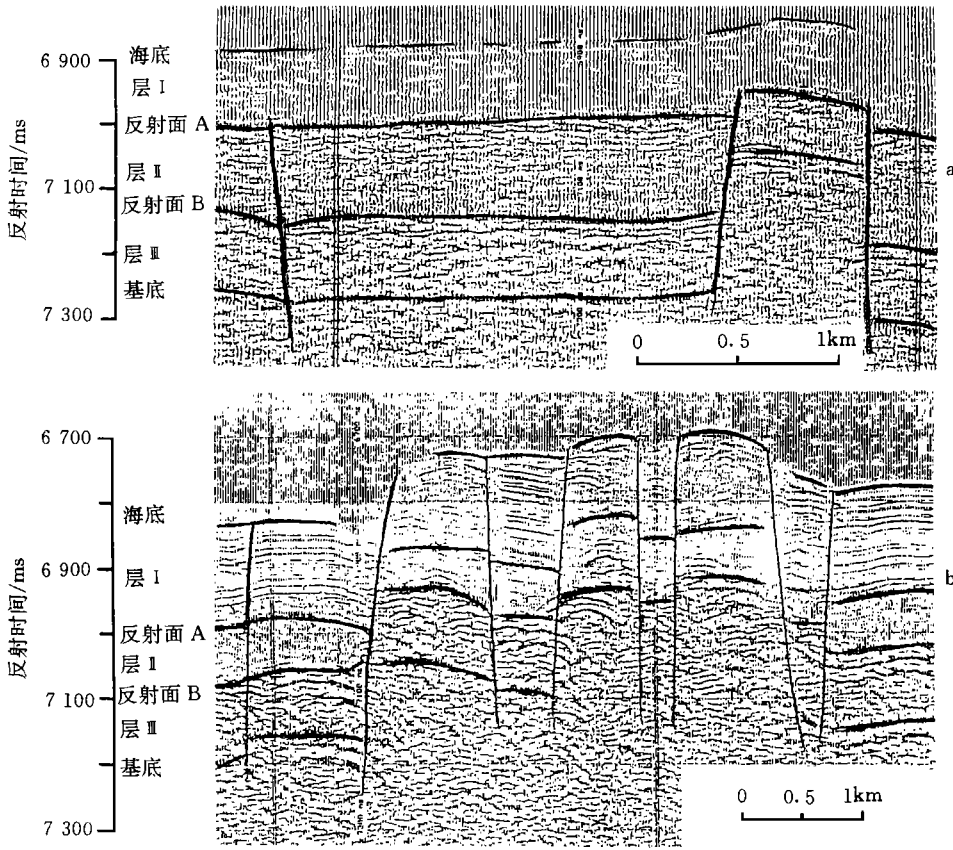


图2 CC区典型地震剖面及层序划分

Fig.2 Typical seismic profiles and sequences in the CC area

的海山链和个别孤立海山(海丘)外,地形比较平坦,全区自北向南有 5 条海山链贯穿于测区,它们是 SMC-1、SMC-2、SMC-3、SMC-4 和 SMC-5,前两条为北西西向,后三条在 154° 15' W 以东海域呈近东西向展布,以西转向北西西或北西向。西区的构造活动以火山活动为主,在地震剖面上火山呈杂乱、不透明反射结构。大部分火山活动以喷溢形式在海底形成规模不等的海山(链),其中较大的海山在海底之上的反射时间约为 1 400ms。有的海山陡峭,有的圆滑,形态各异。有些火山活动规模较小,以“穿刺”状已出露海底或接近海底。另外,区内还存有一种浅层侵入体,在地震剖面上,分布范围比较宽广,岩体形成的“声波基底”直接和层 II 或层 I 接触,局部还可到达海底,在海底地形上为低缓高地。

西区的火山活动受断裂控制,通常呈线性展布,形成具不同走向的海山链,但火山活动在区内分布不均匀。10°N 以北的两条海山链,单个海山规模小,10°N 以南的火山活动比较发育,主要由三条海山链组成,其中 SMC-3 海山链东段大部分海山在海底之上的反射时间为 400—500ms,东西连绵 100km,构成规模宏大的海底山脉。

西区的火山活动具有多期性,从海山链的走向可分为北西西向、北西向和近东西向三组。根据海山与其周围地层的接触关系,通常近东西向海山链在海山周围层 II 增厚;北西、北西西向海山链层 I 增厚或海底下沉。沉积层增厚表明,火山活动已停止,火山开始

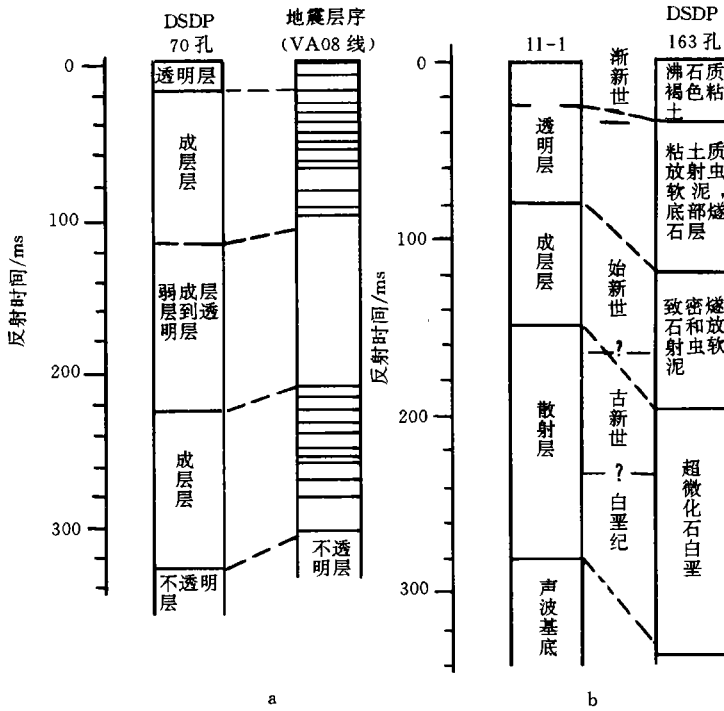


图3 SO25区的地震地层和DSDP孔的岩性地层

Fig.3 The seismostratigraphy in area SO25 and lithostratigraphy from DSDP Site

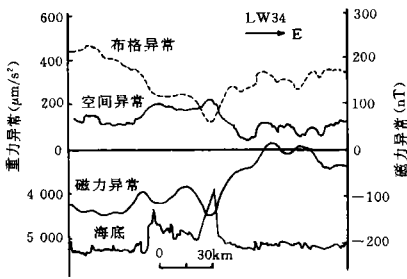


图4 西区重力、磁力、水深综合剖面图 (布格异常: +3 300 $\mu\text{m}/\text{s}^2$)

Fig.4 The synthetic profile of gravity, magnetics and water depth in the west area (Bouguer anomaly: +3 300 $\mu\text{m}/\text{s}^2$)

冷却下沉。

西区的地层年代较老(史君贤等, 1998)。根据深海钻探资料(Watts *et al.*, 1989)和海茨勒的洋底等时线图(刘肇昌, 1985), 洋壳年龄 80Ma 为白垩纪。推测西区火山活动可能受热点控制, 并且大规模的火山活动早已停止, 伴随着洋底向西漂移, 达到现今的位置。

实测的重力和磁力异常对火山活动有着明显的反映(图4)。海山链之上, 空间异常普遍升高, 一般为 200 $\mu\text{m}/\text{s}^2$, 最大可达 380 $\mu\text{m}/\text{s}^2$, 布格异常在海山链上为一明显的低值带。该区存在的大量岩体顶部接近海底的浅层侵入体, 空间异常达 200 $\mu\text{m}/\text{s}^2$, 布格异常亦相对升高, 这种异常组合与海山异常明显不同。

在本区, 磁力异常鉴别出两种类型的火山岩体, 一种磁化方向为正极性; 另一种为负极性。它们代表了两期活动所产生的不同的火山作用, 这种岩体磁化极性相反, 正是代表了其生成时代地球极性发生倒转。

东区的火山活动不如西区强烈, 但仍可识别出一些规模不同的火山岩带(图4), 如贯穿于测区中部的近东西向火山岩带(图6b), 明显是火山活动的产物。地震剖面对火山侵溢活动也有显示, 但在本区只是局部出现。

2.2.2 底流活动 西区的底层流活动强烈,作用明显。受其侵蚀,在底流通过的地区形成宽深不等的槽谷,而且使地层,特别是层 I 的厚度减薄且横向发生变化,有的凹形槽谷的槽底直接位于层 II 的顶部,槽深的反射时间达 170ms,形成明显的底流通道。根据实测地震资料,可推断出自赤道方向底流北上的三个通道(图6a)。底流的冲蚀是造成沉积层,尤其是上部透波层变薄或缺失的主要原因之一。但由于受 SMC-3海山链的阻隔作用,使区内的底流冲蚀作用南部高于北部。

东区的底流活动不如西区强烈,在地形上没有象西区那样形成明显的底流通道。

2.2.3 断裂、断块活动 根据实测地震剖面,东区的断裂、断块活动强烈而普遍。本区的断裂体系可分为两组,一组为北北西向,另一组为近东西向,并成为本区主要的构造活动形式。断层为高角度张性正断层,绝大多数断裂从基底一直穿到海底,说明断块活动已经持续了一个相当长的时间,而且现代活动仍然比较强烈。断块作用在本区形成了规模不等的地垒和地堑,这些地垒和地堑在海底形成了近于平行的北北西走向脊、槽系,表明本区在构造上应属东太平洋海隆(扩张脊)的一部分。本区的地震剖面上显示出的最大断裂位于 $7^{\circ}52.5'N, 142^{\circ}31.0'W$ 处,在海底地形图上表现为西高东低的陡坎,并可一直延伸到测区中部。

测区位于克拉里昂断裂带和克里帕顿断裂带之间,而这两条大断裂带向西延伸远远超过测区。根据在东区实测的磁力资料,识别出了 31—28 号磁条带异常(图 5),磁条带的走向和主断裂的走向完全一致,并将海底划分成若干个不同生成时代的断块区,其时代自东向西逐渐变老。根据磁条带异常序号,基底年龄约在 72—67Ma 之间,洋壳年龄比西区年轻 3—8Ma。本次计算的结果与海茨勒(1968)的海底等时图(刘肇昌,1985)吻合较好。计算结果还表明,东区板块形成后,向西漂移了大约 20° ,进一步说明东区是太平洋海隆向西扩张的结果,并控制了东区的构造活动。

根据磁条带、地震剖面并结合海底地形图在全区共追踪出 5 条东西向转换断层,其编号由北向南分别为 EE_1 、 EE_2 、 EE_3 、 EE_4 和 EE_5 (图 5),断层之间洋底扩张速率存在一定差别。随着洋底远离洋中脊系,岩石圈不断冷却,北北西走向的块体发生差异沉降,使洋底之上的沉积层发生错移,从而在海底地表形成北北西走向的脊和槽。

2.3 结核的成矿条件及控制因素

构造活动强弱是造成结核丰度高低的重要因素。东西两区上述构造活动上的差异决定了西区结核丰度(图6a)比东区高(图6b)。无缆结核取样结果显示,西区最高结核丰度值达 $21\text{kg}/\text{m}^2$,而东区为 $12\text{kg}/\text{m}^2$;西区 $12\text{kg}/\text{m}^2$ 丰度等值线圈出的面积为全区的 30%,而东区 $12\text{kg}/\text{m}^2$ 丰度值呈零星分布;西区 $6\text{kg}/\text{m}^2$ 丰度值圈出的面积为全区的 90%,而东

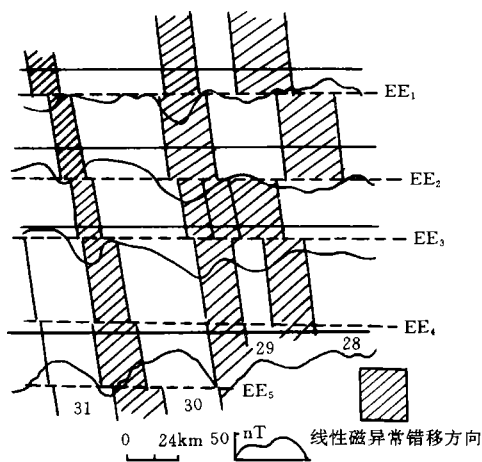


图5 东区海底年代及转换断层分布图

Fig.5 The ocean bottom age and transform faults distribution map of the east area

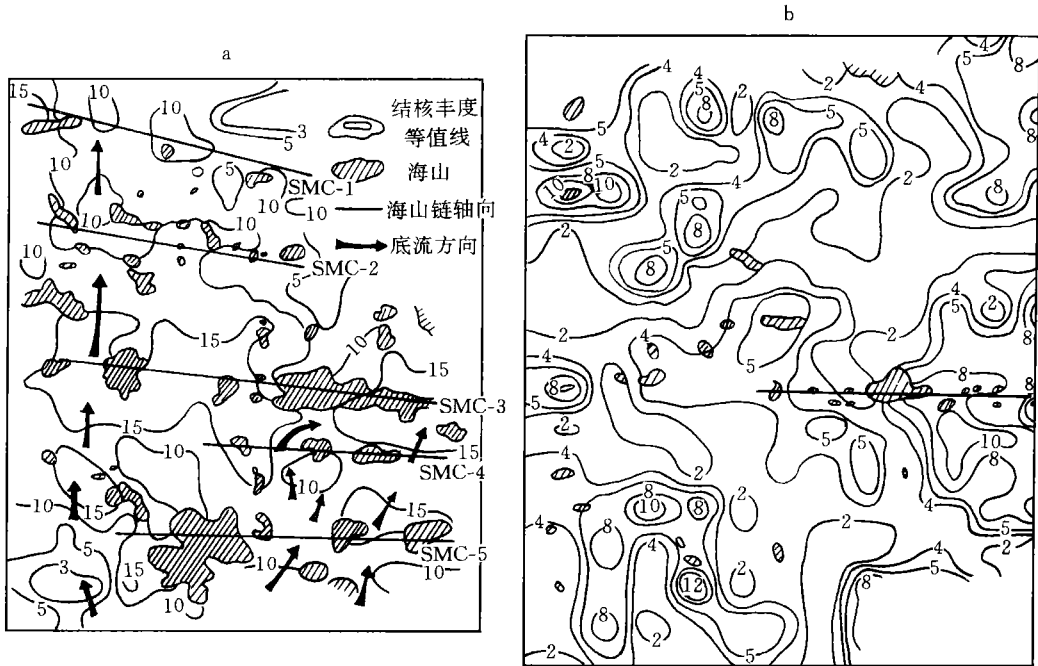


图6 CC区火山岩带分布及结核丰度(kg/m²)等值线图

Fig.6 The volcanic rock zone and the nodule abundance (kg/m²) contour map of the CC area

区仅占30%。

对东、西两区多频探测获得的结核丰度值与地质取样所获得的结核丰度值之间的相关性进行了统计分析。选取西区 $n = 137$ 站, 均方差 $\sigma = 3.45$, 相关系数 $r = 0.81$ (图 7a); 选取东区 $n = 163$ 站, 均方差 $\sigma = 2.5$, 相关系数 $r = 0.74$ (图 7b), 统计结果表明, 两区内多频探测丰度值与取样丰度值比较一致¹⁾。

东、西区单次照相和现场模拟结核覆盖率的数学统计结果见表 1¹⁾, 统计结果表明, 东、西两区单次照相和现场模拟得出的结果基本相同。

表1 单次照相与现场模拟结核覆盖率的数学统计

Tab.1 Mathematical statistics for the nodule covering rate from single photograph and spot analog

区域	方法	总站位数	平均值 (%)	中值 (%)	均方差 (%)	最大值 (%)	最小值 (%)
东 区	现场模拟	52	9.7	8.0	9.6	35.0	0.0
	单次照相	52	8.8	6.0	9.2	36.0	0.0
西 区	现场模拟	84	44.8	50.5	24.2	100.0	0.0
	单次照相	84	46.8	54.0	25.4	85.0	0.0

从无缆海底取样、多频探测、海底照相结果的比较不难看出, 三者对结核富集程度的反映是一致的。这些统计结果表明, 高丰度结核区与海山关系密切, 海底岩浆活动为结核的生长提供了大量的物质来源, 其中也包括了作为结核生长中心的岩石碎屑。

1) DY85-4航次“勘探报告”(上册), 86-88, 92-94

2.3.1 火山活动对结核分布的控制作用

因火山作用而形成的海山,通常玄武岩直接出露海底,其上的沉积层很薄或完全缺失。本次的无缆取样结果表明,在海山及其附近多有高丰度的结核产生,并以S型结核为主,西区的火山活动比较强烈,在测区中部偏南的三条火山岩带(图6a),火山规模大、分布范围广,与结核分布丰度等值线对比,两者无论在分布范围和走向上都十分吻合。实际取样结果,区内结核平均丰度可达 $12\text{kg}/\text{m}^2$,最高达 $23\text{kg}/\text{m}^2$ 。测区北部的二条火山岩带(图6a),海山出露面积和规模较小,高于 $10\text{kg}/\text{m}^2$ 的结核丰度区面积小,29个站的统计,其平均丰度为 $8.3\text{kg}/\text{m}^2$ 。东区火山活动虽然不如西区,但海山附近仍为相对高丰度的结核区,如在 $8^{\circ}20'$ 和 $8^{\circ}40' \text{N}$ 之间,该带为一东西走向的火山岩带(图6b),受 EE_2 和 EE_3 两条转换断层(图5)控制,火山活动发育,出露海底的火山达20座。38个站位的取样统计,结核平均丰度为 $4.1\text{kg}/\text{m}^2$,最高为 $12\text{kg}/\text{m}^2$ 。

2.3.2 隐伏侵入体对结核分布的控制作用

隐伏的火成岩侵入体在西区比较发育,在东区也有发现。它们通常沿海山链分布,在成因上,可能是与火山活动相伴生的浅层侵入体,在这些岩体之上,沉积厚度明显减薄或缺失,利用本次的地震剖面,结合取样结果,共识别出10个分布于隐伏体之上的取样站,结核丰度普遍偏高,其平均丰度可达 $12.3\text{kg}/\text{m}^2$ 。

2.3.3 底层流对结核分布的控制作用

南极底流因富含氧而具有较强的氧化作用。因此,其流经之处海底氧化-还原环境发生较大变化。这种作用更新世和渐新世时期比目前更强烈(Johnson *et al.*, 1977)。西区底层流作用明显,在区内形成3个底流通道(图6a)。根据本次的地震剖面,结合海底地形图,可识别出数条冲蚀槽沟,它们的方向近南北,是底流作用的结果。这种冲蚀作用主要使上部透明层明显减薄,引起区域性的沉积间断或低速的沉积作用。沿底流通道,结核丰度普遍偏高(图6a)。

2.3.4 断块活动对结核分布的控制

断块活动控制了东区地形,同时还控制了上部透明层的厚度。本次调查在东区的东南部设立了一个详查区,加密取样网格为 $1.875' \times 1.875'$,区内地形为北北西向,中间高,东西两则为槽沟,断槽和断丘之间为北北西向正断层。25个取样点的结核平均丰度为 $5.64\text{kg}/\text{m}^2$,最大为 $14\text{kg}/\text{m}^2$ 。从图6可以看出,结核丰度大于 $5\text{kg}/\text{m}^2$ 的主要与中部地形高和断层相对应,而小于 $3\text{kg}/\text{m}^2$ 的主要分布于东部的断槽内。但无论在高丰度的断丘上,还是沿断裂带上,结核丰度仍有较大的离散性。

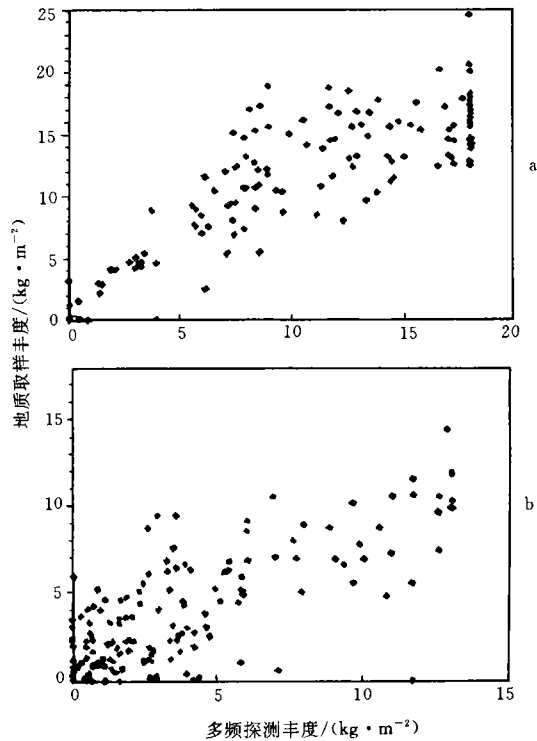


图7 测区多频探测丰度与地质取样结核丰度相关图
Fig.7 The correlative chart of nodule abundance from multi-frequency plumbing with that from geological sampling in the survey area

2.3.5 海底年龄对结核分布的控制作用 大致位于东区 $142^{\circ}20'$ 以东海域,区内水深较大,地形起伏小,并有北高南低的趋势,区内结核丰度偏高,大部分区域超过 $4\text{kg}/\text{m}^2$, 71 个站位的取样平均丰度为 $4.7\text{kg}/\text{m}^2$, 最大为 $17\text{kg}/\text{m}^2$ 。从图 5 和图 6b 可以清楚看到,结核的高丰度区位于 29 号磁条带以东海域,当磁条带受东西向的转换断层错动发生东西向位移时,结核的高丰度区的边界亦发生同步移动,这种相关关系说明,结核丰度可能受海底年龄的控制。

3 结论

太平洋 CC 区的西区以火山活动为主,东区以断裂、断块活动为主,东西两区地层和构造活动不同是造成结核形成、分布、富集程度和类型不同的重要原因。

火山和浅层侵入体是提供结核生成的重要物质来源。海底喷发的熔岩等,通过海底侵蚀作用和水下沥取,不断向水体(包括底层水和间隙水)提供有用金属,有利于结核的形成和富集。

区域性的沉积间断,主要由底流冲蚀作用引起。西区冲蚀作用强,引起中新世以来的区域性沉积间断或低的沉积速率,这是西区结核丰度偏高的重要因素之一。

西区火山活动强烈,尤其在测区的中南部分布有三条近东西向海山链,实测地震资料显示,西区还发育有浅层侵入体;西区底流活动强烈,初步圈出三条近南北走向的海底底流通道,底流作用造成西区中新世沉积间断。这些因素是造成西区结核丰度高、分布较均匀的重要因素。

东区的成矿条件不如西区,这里的火山侵入活动较弱,除在测区中部和西部火山活动较强外,其他地区不发育。东区的沉积层,总反射时间一般为 $200\text{—}300\text{ms}$,且较均一。而西区,大量的浅层侵入体,穿切了层 III、层 II 甚至层 I,使沉积盖层的厚度变薄。另外,东区的底流活动亦不如西区强烈。上述构造背景是造成东区结核丰度偏低且分布不均匀的重要原因。

4 讨论

东区断块活动十分强烈,从实测的地球物理资料分析,断裂可能作为海水循环的通道,有利于金属元素在海底表面富集。但由于在断裂附近上升盘与下降盘之间的斜坡带上冲蚀与再堆积并存,因此,在断裂附近结核富集、分布规模还有待作进一步的研究。

不同时代形成的海底,由于在洋壳形成过程中,地幔原岩在成分上的差别或在洋壳形成过程中构造活动的差异,也可能对结核的形成有着一定的控制作用。但由于掌握的资料有限,还需作进一步的研究。

参 考 文 献

- 刘肇昌, 1985. 板块构造学. 重庆: 四川科学出版社, 60—61
- 史君贤, 陈忠元, 杨季芳等, 1998. 东太平洋铁锰结核区微生物的丰度及其成矿作用研究. 海洋与湖沼, 29(5): 460
- Beiersdorf H, 1987. Interpretation of Seafloor Relief and Acoustic Facies in the Clarion-Clipperton Block Southeast of Hawaii in Terms of Depositional, Diagenetic, and Tectonic Processes. *Geol Jb*, 27—69
- James E A, 1979. Distribution patterns of manganese nodule deposits in the Northeast Equatorial Pacific. *Contributions of the Hawaii institute of geophysics. University of Hawaii*, 1979: 950

Johnson D A, Ledbetter M, 1977. Channel paleoceanography: Pleistocene dissolution cycles and episodic bottom water flow. *Mar Geol*, 5(23): 1—33

Watts A B, Tenbrink U S, 1989. Crustal structure, flexure and subsidence history the Hawaiian Islands. *J G R*, 94(B8): 10 473—10 500

A STUDY ON THE TECTONIC FEATURE AND POLYMETAL NODULE MINERALIZATION CONDITION IN THE CC REGION OF THE PACIFIC OCEAN

WANG Shu-gong, LIU Zhong-chen, LIU Bao-hua, WU Jin-long

(*First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003*)

Abstract According to the Eighth Five-year plan of Oceanic Polymetal Nodule Research and Development of COMRA, the State Oceanic Administration (SOA) organized and carried out a polymetal nodule exploration cruise DY85-4 in the CC region of the Pacific Ocean with a total area of $65 \times 10^3 \text{km}^2$ from April to November, 1994, with a period of 225d.

During the cruise the geophysical investigations including gravity, magnetics and single-channel seismic survey were conducted. A total single-channel seismic profile of 1533.7km with a high resolution and gravity and magnetic profile of 2227km with a high accuracy were obtained. Post-processing and stratigraphical analyses for the seismic profiles have been undertaken. The Moho depth has been calculated by using $\sin x / x$ method based on the surveyed Bouguer anomaly. A theoretical magnetic anomaly profile has been calculated using the two-dimensional plate formula and compared with the measured magnetic profiles, from which the age of ocean bottom was determined.

The results show that technically the volcanic activities dominate the west area and faulting block activities play a leading role in the east area. The difference in the tectonic background in the two areas causes the difference in the formation, distribution, abundance and types of the polymetal nodule.

The volcanics and shallow intrusive bodies provide the material source for the nodule. Especially the melt rock erupted up to the ocean bottom supplies the useful metal to water body (including bottom water and interval water) by the bottom weathering, being advantageous to the formation and concentration of the nodule.

Regional sediment discontinuation is caused mainly by the erosion due to bottom currents. This eroding action is very strong, which leads to the sediment discontinuation or low sedimental rate since the Miocene over the west area. It may be one of the reasons for the relatively high nodule abundance is relatively high in the area.

In the east area the faulting block activities are quite strong. From the analysis on the surveyed geophysical data, the faults may have formed channels for the water circulation, which is also advantageous to the concentration of the metal composition on the ocean bottom. However, since there exist scouring and reaccumulation on the slope zone between the lifting and descending walls

of the fault, the regularity of the nodule concentration and distribution near the faults needs a further study. For the ocean bottoms formed in the different geological periods, the difference in the mantle original rock composition or in the tectonic activity during ocean crust formation could control the nodule forming to some extent.

In the west area the volcanic activities are strong, especially in the middle-south part where three sea mountain chains with a near east-west trend exist. The surveyed data show that the shallow intrusive igneous bodies develop widely. Based on the strong bottom current data three channels have been determined, which made the Miocene sediments discontinue. All these factors are important for the higher abundance and uniform distribution of the nodule.

The mineralization condition in the east area is similar to that in the west area. The intrusive volcanic activities in the east area are weak and do not develop in most areas except the middle and south-west parts. The sediment layers in the east area can generally reach a total thickness of 200—300ms. However, in the west area many shallow intrusive igneous bodies cut off layer III, II and I, which make sediment layers thin. In addition, the bottom water current activities in the east area are not as strong as that in the west area. The tectonic background mentioned above has caused the lower abundance and uniform distribution of the nodule.

Key words Clarion-clipperton fracture zones Volcanic activities Faulting block activities
Polymetal nodule mineralization condition

Subject classification number P738