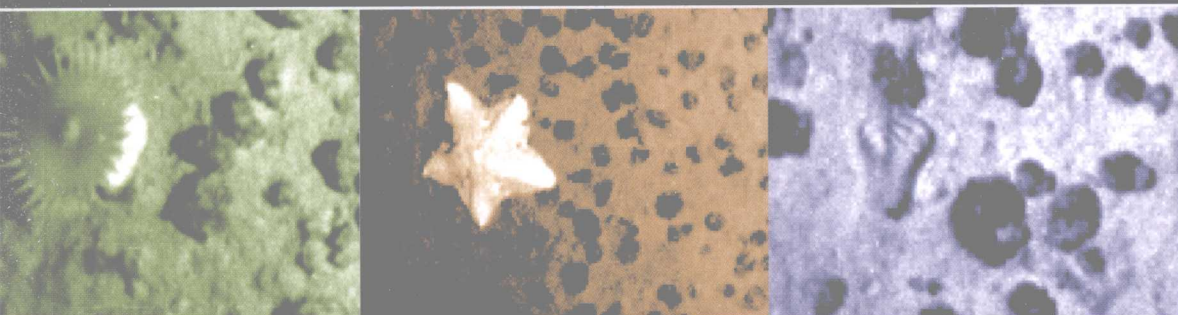




太平洋多金属结核 中国开辟区矿床地质



吕文正 黄永样 张国桢 包更生 主编

 海洋出版社

太平洋多金属结核 中国开辟区矿床地质

吕文正 黄永样 张国桢 包更生 主编

海洋出版社

2008年·北京

图书在版编目(CIP)数据

太平洋多金属结核中国开辟区矿床地质/吕文正等主
编. —北京:海洋出版社,2008. 10

ISBN 978-7-5027-7124-9

I. 太… II. 吕… III. 太平洋-海底矿物资源-多金属
矿床-采矿地质学-中国 IV. P736.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第152798号

责任编辑:王 溪

责任印制:刘志恒

TAIPINGYANG DUOJINSHU JIEHE ZHONGGUO KAIPQU KUANGCHUANG DIZHI

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2008年11月第1版 2008年11月第1次印刷

开本:889mm×1194mm 1/16 印张:23.5

字数:601.6千字 定价:150.00元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《太平洋多金属结核中国开辟区矿床地质》

编写人员名单

主 编：吕文正 黄永样 张国楨 包更生

主要编写人员（按姓氏笔画排列）：

王洪法	刘季花	吕文正	朱克超	何高文
杨胜雄	郑彦鹏	韩喜球	蔡毅华	黄奕普
何拥华	宋连清	李延河	华祖根	张国楨
张 胜	初凤友	陈建林	陈冠球	陈小玲
黄永样	钱江初	滕云业	吴学文	

前言

1982年联合国通过的《联合国海洋法公约》已于1994年11月16日生效,公约庄严宣布:国际海底及其资源是人类共同继承财富。依据公约有关规定设立的国际海底管理局同时宣布成立,标志着国际海底区域开发制度的最终确立。我国作为先驱投资者之一,在1991年已将“大洋多金属结核资源勘探开发”列入国家长远发展项目,并制定了《大洋多金属结核资源研究开发第一期(1991—2005年)发展计划》和《大洋多金属结核资源研究开发“八五”计划》。随后又制定了国际海底矿产资源研究开发规划(1996—2010年)目标和“九五”计划(1996—2000年)纲要。

“八五”期间,中国大洋协会组织原地质矿产部和国家海洋局利用“海洋四号”和“向阳红09”号、“大洋一”号进行了五个航次的调查,在15万 km^2 的开辟区内进行了 $7.5' \times 7.5'$ 网距的地质采样; $3.75' \times 3.75'$ 网距的多频、浅剖测量、地球物理和海底照相调查,以及全区多波束全覆盖地形测量和深拖试验性剖面调查。在此基础上于1996年3月5日完成了30%矿区的区域放弃工作,获得了共计7.5万 km^2 的勘探合同区。在区域放弃工作中充分利用了多波束海底地形全覆盖测量调查结果,优先考虑地形因素,圈出海底地形坡度大于等于 5° 的海山、海山链和部分陡坡等不利于多金属结核开采的海底障碍物。我国开辟区30%区域放弃报告已于1998年8月获国际海底管理局批准。

鉴于我国开辟区东、西两矿区的海底地形地貌特征、结核类型、分布变化规律和成因机制都具有明显差异的实际情况,“九五”期间在进一步加密勘查的基础上,依靠科技进步,充分利用高科技手段进行海底电视和照相调查为主的近海底视像观测,基本查清我国开辟区多金属结核的分布规律。中国大洋协会委托原地质矿产部、国家海洋局于1997、1998和1999年,使用“海洋四”号、“大洋一”号在我国开辟区 $10.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的第二阶段勘查区内分别执行了大洋多金属结核勘查DY95-6、DY95-7、DY95-8、DY95-9和DY95-10五个航次。在 $7.5' \times 7.5'$ 网距的基础上进行井字型中心加密地质采样,完成了约1850 km深拖海底电视和照相光学连续剖面调查,以及6000 m水下自治机器人试验调查。同时,对我国开辟区多金属结核矿床特征,多金属结核矿床储量动态评价体系,与采矿有关的综合地质条件和对有突破前景的基础地质方面进行了综合研究,上述调查研究成果为20%的区域放弃工作提供了充分依据。1999年3月5日我国政府代表团向国际海底管理局提交了开辟区剩余20%区域的放弃报告,并获国际海底管理局批准。至此,我国开辟区的放弃工作已按照《联合国海洋法公约》有关规定全部完成。

为了进一步系统评价我国开辟区多金属结核资源和开展多金属结核矿床的特征和成矿控矿因素研究,完成向国际海底管理局提交的开辟区剩余20%区域的区放报告,“九五”大洋矿产资源评价与地质研究项目(DY95-02)按中国大洋协会办公室“九五”大洋研究项目指南四个方面内容进行设置,即

- (1) CC区及中国开辟区多金属结核特征综合研究和勘探技术路线研究;
- (2) 矿区地质技术经济体系评价;

(3) 与采矿有关的综合地质条件研究;

(4) 有突破前景的基础地质研究。

共安排 20 个研究课题, 课题及负责人分别为:

- 1) 东太平洋勘探区多金属结核矿床局部分布规律研究 (DY95-02-01 黄永样);
- 2) 多金属结核矿床分类及矿床特征综合分析研究 (DY95-02-02 朱克超);
- 3) 多金属结核成矿控制的模型研究 (DY95-02-03 李家彪);
- 4) 中国开辟区地震地层学构造特征与成矿条件研究 (DY95-02-04 吴金龙);
- 5) 中国大洋多金属结核开辟区 (西区) 地形地貌系列图编制及其特征研究 (DY95-02-05 吕文正);
- 6) 中国大洋多金属结核开辟区 (东区) 地形地貌系列图编制及其特征研究 (DY95-02-06 杨胜雄);
- 7) 中国多金属结核勘探区资源动态评价和矿区圈定综合研究 (DY95-02-07 张富元、何高文、殷汝广);
- 8) 浅地层剖面的底质分类和声学特征研究 (DY95-02-08 华祖根);
- 9) 大洋多金属结核矿区工程地质条件研究 (DY95-02-09 宋连清、何树平);
- 10) 中国大洋开辟区沉积物和多金属结核 (壳) 的 Sr、Nd、Ce 同位素组成及其示踪意义研究 (DY95-02-10 刘季花、孟宪伟);
- 11) 锶、氮、硅同位素在寻找富矿结核、结壳中的应用研究 (DY95-02-11 李延河);
- 12) 中国开辟区多金属结核生物成因研究 (DY95-02-12 陈建林);
- 13) 微生物生态与结核生长关系研究 (DY95-02-13 阎葆瑞);
- 14) 太平洋多金属结核保存与富集条件实验研究 (DY95-02-14 陈冠球);
- 15) 大洋多金属结核的化学演化与古海洋学 (DY95-02-15 黄奕普);
- 16) 1nm 锰矿相的人工合成及其特征研究 (DY95-02-16 钱江初);
- 17) 利用深拖资料对中国开辟区结核分布的综合研究 (DY95-02-17 王洪法);
- 18) 多金属结核资源定量评价的多元地质统计方法研究 (DY95-02-18 孟宪伟);
- 19) 太平洋多金属结核矿产 K 值的实验研究 (DY95-02-19 滕云业);
- 20) 深海生物的分子生物学及其应用 (DY95-02-20 曾润颖)。

与“八五”相比较,“九五”大洋矿产资源评价与研究工作在人员、资金投入、勘探技术手段和研究的深度和广度上都有了长足进步。本书是在项目总报告基础上完成的,全书分两篇八章,试图利用“九五”5 个航次勘探资料和综合各研究课题主要研究成果,重点突出高新技术手段所取得的新发现和新认识;强调东、西区对比研究,着重探讨在中国开辟区多金属结核矿床地质特征和结核矿床内起主导作用的成矿、控矿条件。深海生物基因属于另一种性质的资源,深海生物的分子生物学及其应用 (DY95-02-20) 课题内容将单独成册,本书未收入其内容。结核资源评价方法和中国开辟区多金属结核矿区资源评价部分 (DY95-02-07、DY95-02-19) 另有专著,也未收入本书。由于涉及专业多,研究工作中还存在不少不足之处,希望读者批评指正、以促进和加快我国大洋矿产资源调查和海底科学研究工作朝更广、更深的方向迈进。

本书的编写工作得到中国大洋协会总工程师郭世勤研究员、项目处处长周宁教授级高工的大力支持;周建平、李金蓉参加了文字编辑和图件处理工作,特此表示感谢!

目 次

绪论	1
第一节 东太平洋 CC 区成矿地质和环境背景	1
一、构造	1
二、沉积地层	2
三、海流特征	4
四、生物生产力	6
第二节 太平洋 CC 区多金属结核分布特征	7
一、各国多金属结核勘探合同区分布	7
二、太平洋 CC 区多金属结核分布特征	9
第三节 中国开辟区海上勘探情况	13
一、“八五”期间海上勘探简况	13
二、“九五”期间海上多金属结核勘探情况	13
三、研究方法和技术设备	14
第一篇 地质及构造特征	17
第一章 地形地貌特征	19
第一节 地形地貌特征与分区	19
一、地形地貌特征	19
二、地形地貌分区	20
第二节 坡度参数	27
一、坡度分布特征	28
二、坡度与水深的关系	29
第三节 不利开采地形区和地形障碍物特征与分布	30
一、东区	31
二、西区	33
第二章 构造与火山作用	36
第一节 区域地层	36
一、东区	38
二、西区	40
第二节 浅地层特征	44
一、反射地震相特征分析	44
二、浅地层剖面的地层对比与解释	48
第三节 构造特征	51
一、东区	51
二、西区	54

第四节 火山活动	55
一、东区	55
二、西区	58
第三章 新生代地层及沉积特征	62
第一节 沉积物类型及特征	62
一、表层沉积物	62
二、柱状沉积物	63
第二节 新生代地层划分对比	67
第三节 晚新生代沉积地球化学特征	70
一、表层沉积物的地球化学特征	70
二、柱状沉积物地球化学特征	84
第四节 沉积物工程地质特征	107
一、沉积物土层工程分类及特征	107
二、海底土层工程地质特征	112
三、沉积物声学特性	121
四、现场实验与原位测试结果比较	123
五、土的动力学性质及承载力	125
六、矿区工程地质条件评价	126
七、结论	129
第二篇 多金属结核矿床特征和成矿作用	137
第四章 海底探测与多金属结核分布特征	139
第一节 深拖和水下自治机器人海底探测技术	139
一、深拖探测技术	139
二、水下自治机器人探测技术	144
第二节 声学探测结核赋存分布特征	150
第三节 光学探测数据处理方法	154
一、覆盖率计算	154
二、粒径计算	159
三、丰度计算	160
第四节 结核分布特征	163
一、覆盖率分布特征	163
二、粒径分布特征	168
三、丰度分布特征	170
四、海底地形与结核分布的关系	176
第五章 中国开辟区多金属结核矿床特征	203
第一节 矿床分类	203
一、分类原则	203
二、多金属结核矿床分类	204
第二节 矿床特征	206
一、矿相特征	206

二、矿石品位与地球化学特征	218
三、结核矿床评价指标	221
第三节 多金属结核矿床分布特征	223
一、结核的区域分布特征及与地形地貌的关系	223
二、不同类型结核矿床分布范围	231
三、不同类型结核矿床的丰度和覆盖率	234
四、不同类型结核矿床的品位分布特征	246
第六章 多金属结核地球化学研究	252
第一节 多金属结核常微量元素地球化学	252
一、元素在沥取相中的分布	252
二、元素的聚类分析	253
三、太平洋 CC 区多金属结核稀土元素地球化学	255
四、多金属结核和沉积物中稀土元素的富集机制	258
五、多金属结核壳层地球化学特征	259
第二节 多金属结核中放射性同位素地球化学	264
一、多金属结核中放射性核素的地球化学行为与深度分布特征	264
二、基于铀系不平衡的生长速率测定及若干相关的问题	272
三、东太平洋多金属结核中放射性核素的不破坏 γ 谱分析	275
四、多金属结核的不破坏 α - 能谱分析	276
第三节 多金属结核中稳定同位素地球化学	277
一、太平洋 CC 区多金属结核 Ce、Nd 和 Sr 同位素地球化学	277
二、多金属结核(壳)中的 He 同位素	282
第七章 多金属结核成矿和保存实验研究	291
第一节 S1nm 锰矿相的人工合成及其特性的研究	291
一、S1nm 锰矿相的合成方法	291
二、实验器材与化学试剂	292
三、1nm 锰矿相的合成反应	292
四、结果与讨论	293
五、S1nm 锰矿相的离子交换能力	295
第二节 结核保存实验研究	299
一、水动力学实验	299
二、压力试验	302
三、氧化环境条件模拟试验	303
四、酸碱度模拟试验	304
五、氨基酸模拟试验	305
六、微生物模拟试验	307
第八章 多金属结核矿床成矿地质作用	311
第一节 成矿环境	311
一、氧化还原电位	311
二、大洋多金属结核记录的海水化学演化	317

三、海底构造运动—多金属结核中的 $\text{CaCO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MgCO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比值	323
四、 $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}/^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ 比值与海洋古生产力演化	326
第二节 多金属结核的纹层韵律与生长速率	328
一、叠层石纹层韵律	329
二、锰结核中的地球轨道印记	329
三、锰结核的生长速率推测	332
第三节 控矿模型	332
一、多金属结核丰度和覆盖率分布的分形模型	332
二、人工神经网络模型	334
第四节 火山活动与成矿作用	337
一、火山活动	337
二、洋中脊活动	338
第五节 生物成矿作用	339
一、多金属结核中的微生物化石	339
二、生物及有机化学沉淀作用机制	342
三、洋底多金属结核微生物成矿方式	343
四、微生物化石与多金属结核成矿的关系	347
第六节 成矿模型	348
一、成矿物质来源	348
二、结核类型与生长过程	349
三、生物和化学成矿作用	350
四、结核形成与分布的控制因素	351
图版 I	358
图版 II	359
图版 III	360
图版 IV	361
图版 V	362

绪 论

研究区位于东太平洋夏威夷东南海域的多金属结核我国开辟区, 该区处于东太平洋海盆 CC 区西部。中国开辟区大致以 150°W 为界, 分为东、西两矿区 (图 13)。东矿区地理坐标大致为: $7^{\circ}\text{N} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $141^{\circ}\text{W} \sim 149^{\circ}\text{W}$; 西矿区为 $8^{\circ}\text{N} \sim 11^{\circ}30'\text{N}$, $151^{\circ}\text{W} \sim 155^{\circ}\text{W}$, 总面积为 $150\,000\text{ km}^2$ 。东区中心距火奴鲁鲁港约 $2\,050\text{ km}$, 西区中心距火奴鲁鲁港约 $1\,800\text{ km}$ 。

第一节 东太平洋 CC 区成矿地质和环境背景

一、构造

东太平洋海盆 CC 区位于克拉里昂断裂带以南, 莱恩群岛海山链以东、克里帕顿断裂带以北, 东太平洋海隆以西海域 (图 1), 区内海底地形和地质构造特征主要受这四大构造带的控制。

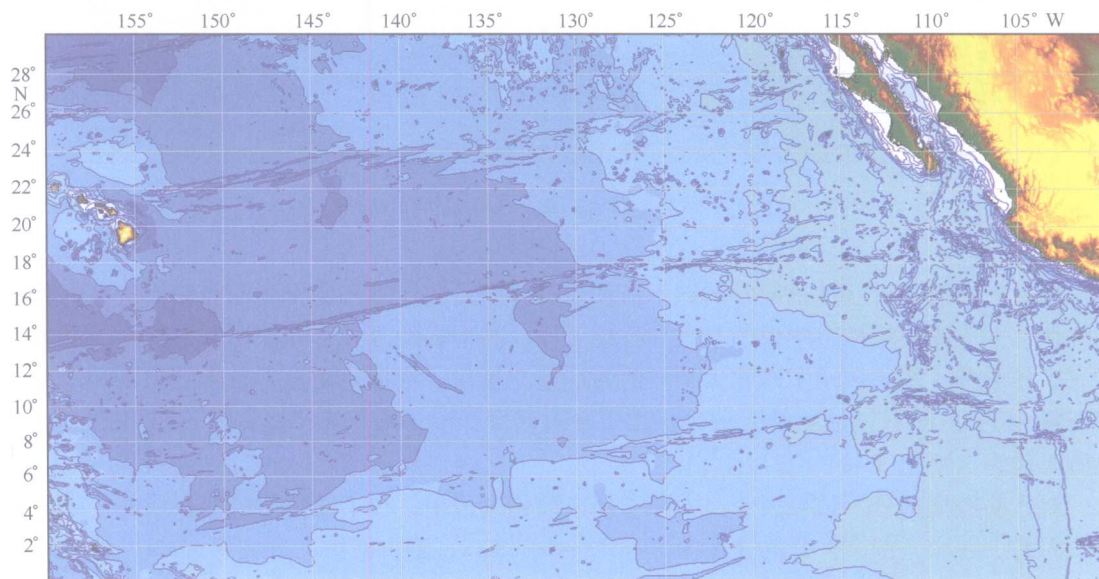


图 1 东北太平洋海底地形

在海底地形图上莱恩群岛海山链和东太平洋海隆为北北西向延伸的正向线形构造, 克拉里昂断裂带和克里帕顿断裂带为近东西展布的负向线形构造。在东太平洋海隆的北部地区断裂峡谷中水深约 $2\,600\text{ m} \sim 2\,700\text{ m}$, 海隆斜坡从 $2\,900\text{ m}$ 到大约 $3\,500\text{ m}$ 深, 而海盆底部的深度从 $4\,000\text{ m} \sim 5\,000\text{ m}$ 到 $5\,500\text{ m} \sim 6\,000\text{ m}$, 海隆高度 $2\,000\text{ m}$ 到 $3\,000\text{ m}$ 以上。莱恩群岛海山链一般认为是热点和板块运动相互作用形成的, 成因上与夏威夷海山链相似。而克拉

里昂和克里帕顿二组断裂带是由于转换断层作用形成相对海盆低数百米的深海槽。

玄武质洋壳在洋中脊——太平洋海隆处不断形成并向两侧扩张，在洋中脊形成的热洋壳在扩张漂移和冷却过程中保留和记录了地质时期地磁场的强度和方向的变化。通过对洋壳板块所特有的这些正负相间地磁异常的识别，人们对洋壳板块的形成、运动和消亡过程得以清晰认识。

伴随板块的漂移，变冷下沉，以及岩浆、断裂活动和沉积盖层的增厚，地壳的构造形态、厚度和莫霍面深度的变化，在自由空间重力异常和布格重力异常的形态和特征上都有所反映，由于大洋地区沉积速率低，盖层薄，自由空间重力异常这些特征与地形特征基本对应，反映的主要是基底构造的特征（图2）。

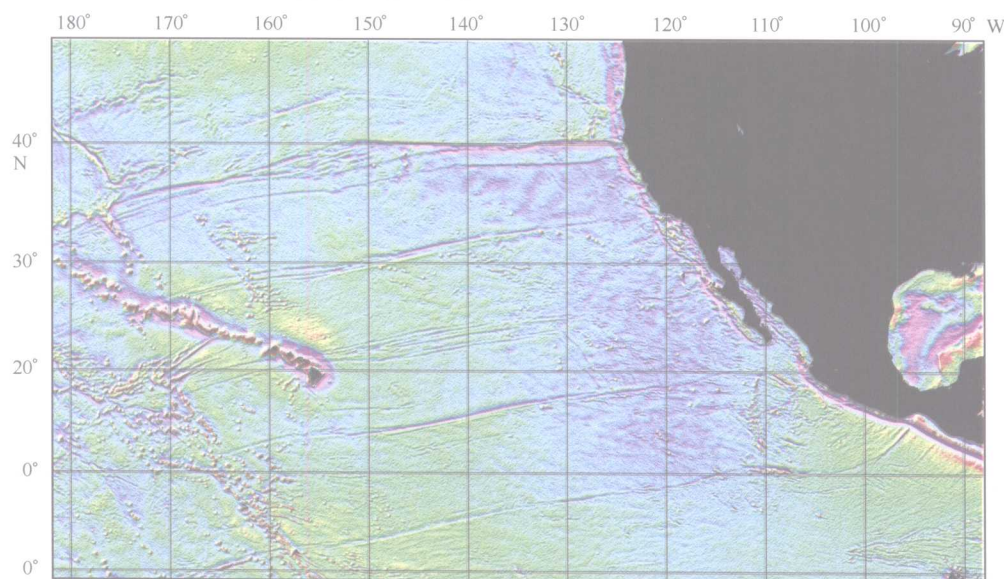


图2 东北太平洋卫星重力异常（Sandwell 和 Smith 2003）

通过对海底条带状地磁异常的识别所获得的洋壳基底年龄已经得到深海钻探资料的验证和确认，并成为板块构造学说的基础和佐证。图3为根据地磁异常和深海钻探资料编制的全球海底年龄图。图4展示了东北太平洋的海底地质年代。根据对磁异常条带的识别和深海钻探资料确定的CC区地质年龄大致为：洋中脊附近更新世，莱恩海山链附近海域基底对应的地质时代为白垩纪（80Ma年以上）。

对这些数据的分析结果表明：太平洋形成演化过程中，在不同地质时期板块的扩张速率是不同的。在白垩纪，扩张的速度为3 cm/a ~ 10 cm/a，到古新世上升到5 cm/a，最大达到8.5 cm/a；晚第三纪—上新世，扩张速度的差异最大，加利福尼亚湾为1.5 cm/a，南部为6 cm/a ~ 8 cm/a。

二、沉积地层

根据深海钻探资料（Tracey 等 1971），东太平洋沉积厚度从赤道向北逐渐减薄，到克拉里昂断裂沉积厚度只有100m（图1-2-3）。东赤道太平洋海域地层由老到新可划分为四个建造：未定名的富含沸石和铁氧化物的钙质软泥层；由燧石、燧石化灰岩、钙质超微化石软泥、褐色放射虫软泥组成的莱恩群岛层；由含有孔虫的超微化石钙质软泥组成的马克萨斯

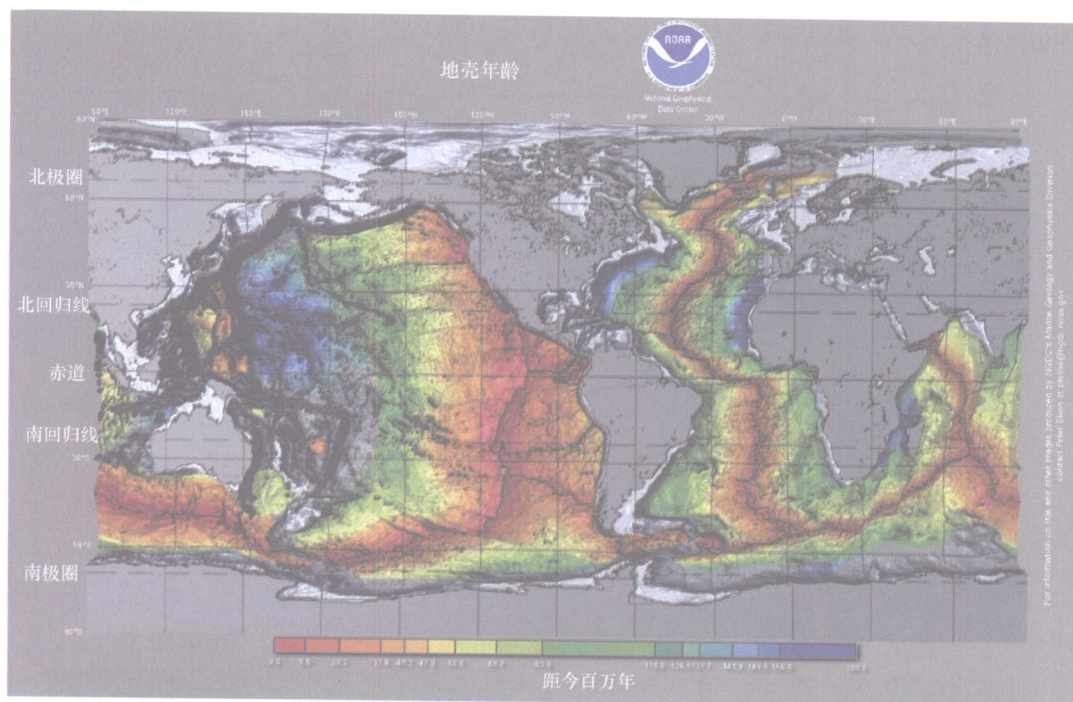


图3 全球海底年龄 (Muler R. D. et al. NOAA)

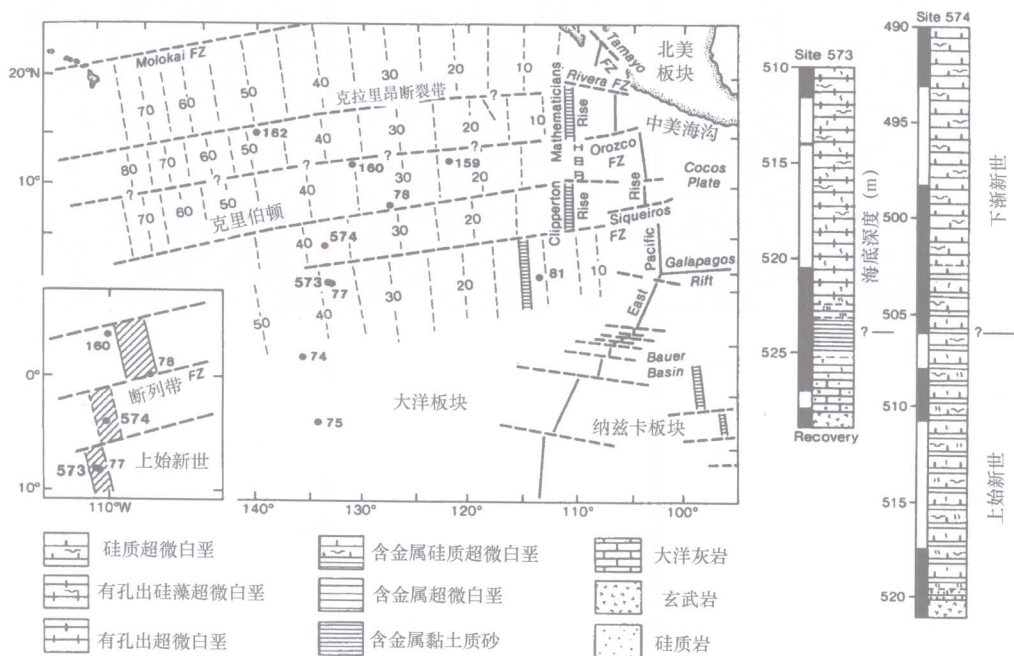


图4 东北太平洋海底地质年代 (DSDP Leg 85 Report)

(Marquesas) 层；由褐色放射虫软泥、超微化石及放射虫软泥和超微化石软泥互层组成的克里帕顿层。区域分布以 148°W 为界，西部地层年代老，缺失上部的克里帕顿层和马克萨斯

(Marquesas) 层, 东部则缺失老的未定名的钙质层 (图 1-2-2)。

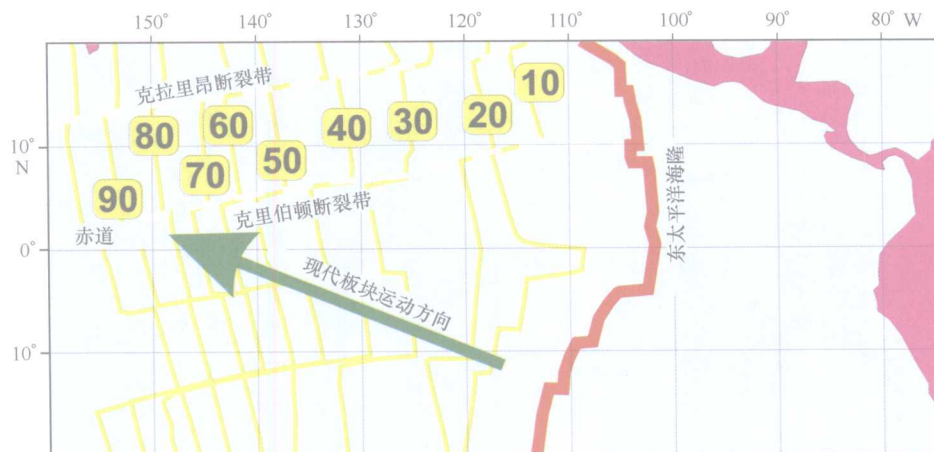


图 5 东北太平洋海底地质年代与现代板块运动方向 (Morgan 2003)

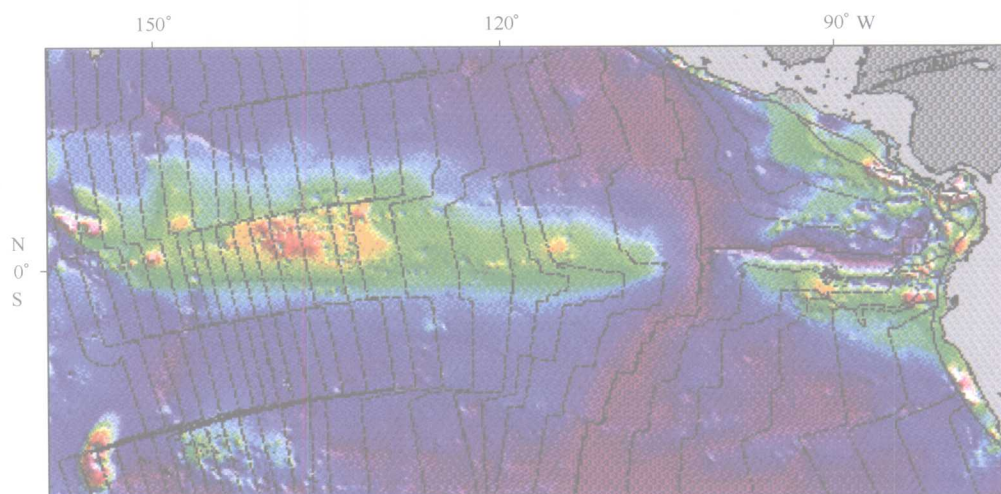


图 6 东北太平洋沉积厚度 (Morgan 2003)

在深海钻探 574 井附近的地震剖面 (图 7) 揭示了东太平洋海盆地震地层特征。反射地震剖面显示在 CC 区中部, 从海底到声学基底的双程反射时间约 500 ms, 即沉积盖层的厚度大约为 400 m。反射地层以平行、亚平行状覆盖全区, 上部反射界面清晰、分层好, 下部地层反射较弱、成层性较差。

三、海流特征

太平洋 CC 区处在北赤道流 (North Equatorial Current)、南赤道流 (South Equatorial Current) 和北赤道逆流 (North Equatorial Counter Current) 的控制区 (参见图 8), 其西面为西太平洋暖池, 南面为赤道冷水舌, 其东北方向是加利福尼亚冷水区, 该区域的上层海洋水文特征主要受这些洋流和水团的影响。

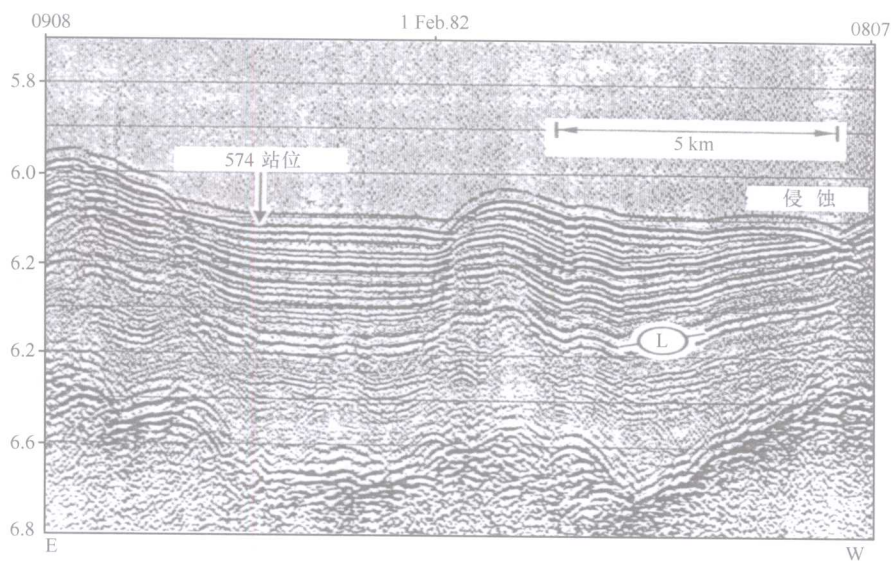


图7 深海钻探 574 站位附近地震剖面 (DSDP Leg 85 Report)

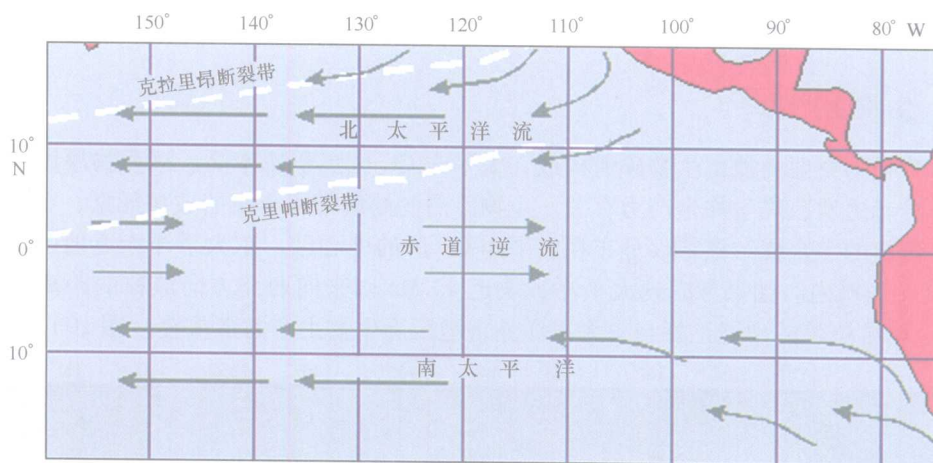


图8 赤道太平洋地区表层流分布特征 (Morgan 2003)

全球海洋的深层水主要来自北大西洋深层水和南极底层水，北大西洋深层水比较温暖，盐度高 (2.5°C , 35)；在威德尔海形成的南极底层水 (AABW) 温度比较低，盐度也较低 (1°C , 34.6)，密度大，富含氧、二氧化碳、不饱和碳酸钙和二氧化硅等。

太平洋的近底层水都来自南极。在南太平洋，南极底层水 (AABW) 向西以深层水边界流的形式扩散流入汤加海沟和科麦德克海沟。深层水的萨摩亚海沟通道是 AABW 从太平洋南部进入到北部的唯一通道。在中央太平洋海盆，AABW 被划分为几股支流延伸进入海盆的西北和东北部。在这些海盆中，底层水的特点是温度变化非常缓慢 ($0.05^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$)。但是在 AABW 进入海盆的深水通道处，底层温度会发生很快的变化 (大约 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{ km} \sim 0.1^{\circ}\text{C}/10\text{ km}$)。来自南极的低温富氧底层水对多金属结核的形成环境起了重要控制作用，大量研究成果表明多金属结核的主要形成时期是南极底流形成并向北扩散到太平洋海盆之后。

CC 区位于 AABW 稳定延伸到的太平洋东北部（图 9）。关于在东北太平洋海盆内 AABW 的路径，向北部和东部扩散的界线，以及深水通道在连接中央太平洋海盆和其他海盆间的作用等问题，尚存在一些不同意见。

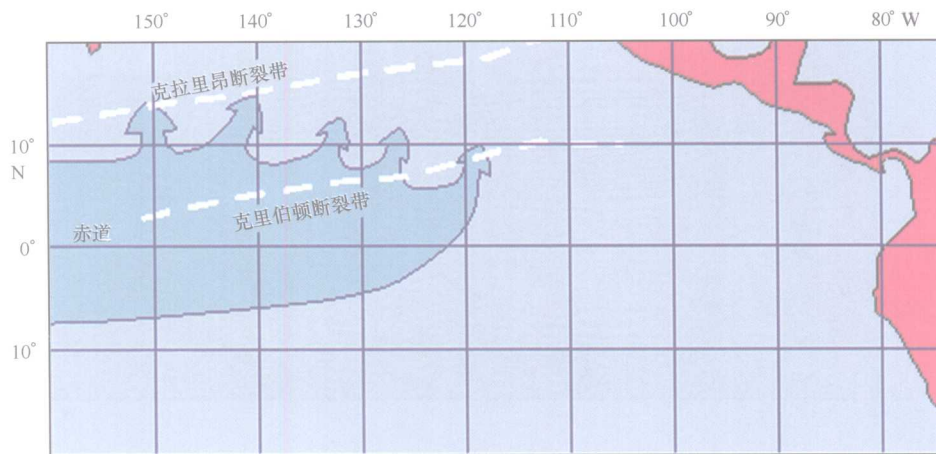


图 9 太平洋 CC 区底层流分布特征 (Morgan 2003)

四、生物生产力

深海沉积物主要由残留生物碎屑构成，太平洋 CC 区沉积速率高、沉积物厚度大，显然与东太平洋赤道地区高生物生产力有关。生物碎屑的溶解带来丰富的成矿元素，全球最具有商业开采价值的多金属结核带仅分布在太平洋 CC 区的中心区，东太平洋赤道地区以北大约 10 个纬度的区域内。如果考虑到太平洋板块近 42 Ma 以来向西北方向漂移的距离，太平洋 CC 区多金属结核带的位置正好与东太平洋赤道地区高生物生产力带重叠（图 10）。

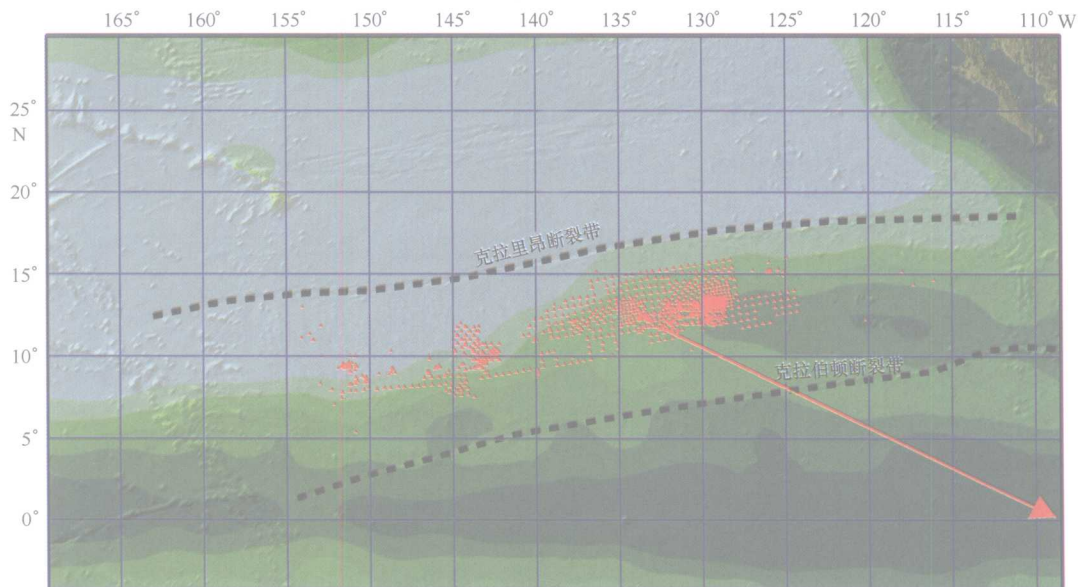


图 10 赤道太平洋 CC 区多金属结核带与生物生产力分布关系 (Morgan 2003)

大量结核测年数据表明 CC 区多金属结核的形成年龄不超过 40 Ma, 大部分早于 20 Ma (韩喜球 2006)。毫无疑问, 太平洋 CC 区多金属结核带的形成和分布与南极底流形成发展和向北扩散到太平洋海盆和东太平洋赤道地区高生物生产力带密切相关。

第二节 太平洋 CC 区多金属结核分布特征

多金属结核有重要经济价值的化学成分主要为锰、铜、钴、镍, 品位高的结核主要分布在水深范围 4 000 m ~ 6 000 m 的大洋海盆区, 碳酸盐补偿深度以下的海底表面, 大洋多金属结核的生长速度很缓慢, 每百万年一到几十毫米。

东北太平洋 CC 区是具有特殊经济价值的结核富集区 ($5^{\circ}\text{N} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W} \sim 150^{\circ}\text{W}$), 结核金属品位锰最高可达 30%、铜 1.5%、钴 1.0% 和镍 2.0%, 铜、钴、镍的总含量最高达 3.5%。这一区域结核的平均丰度 10 kg/m^2 , 干结核资源量大约有 380 亿吨 (另有文献报道为湿结核 700 亿吨)。太平洋其他地区结核平均丰度也可达到 10 kg/m^2 , 但结核品位较 CC 区为低。印度洋是另一个有潜在开采价值的多金属结核分布区, 结核铜、钴、镍金属总含量最高可达 2%, 但结核丰度比太平洋 CC 区低, 全球多金属结核分布区见图 11。

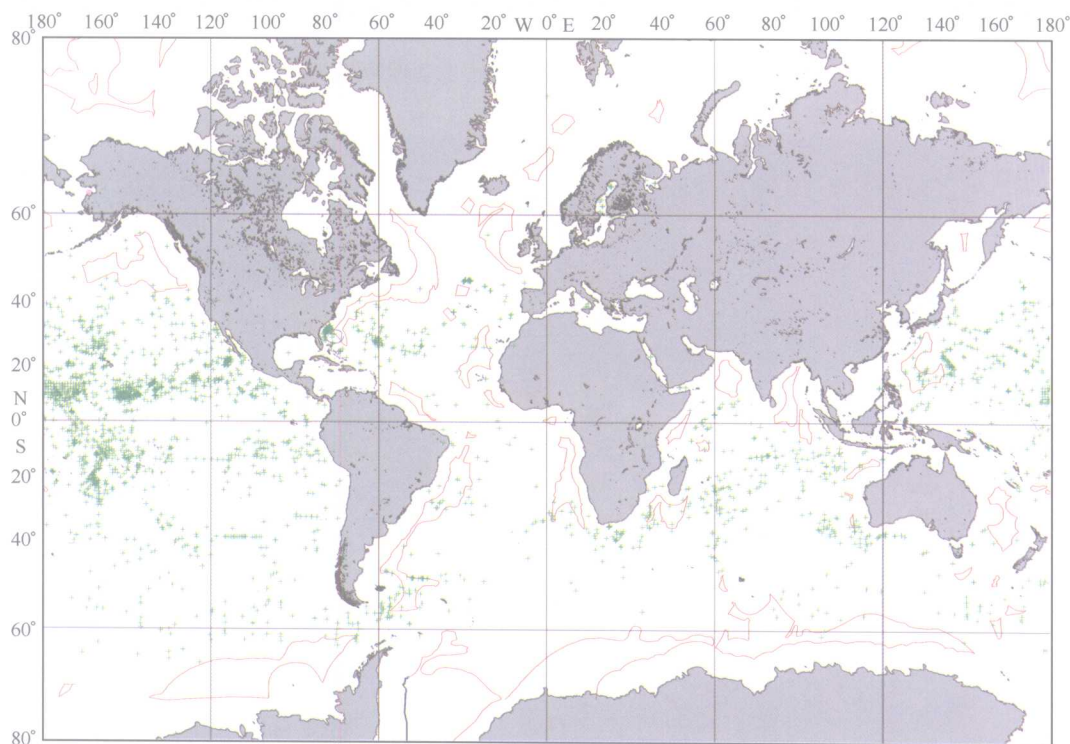


图 11 全球多金属结核主要分布区 (Murton B. J. et al. 2000)

一、各国多金属结核勘探合同区分布

自 1986 年印度第一个向国际海底管理局 (筹委会) 登记成为先驱投资国以来, 现在已