

大洋多金属结核的生长韵律 与全球变化

DAYANG DUOJINSHU JIEHE DE SHENGZHANG YUNLÜ

YU QUANQIU BIANHUA

韩喜球 著



地质出版社

大洋多金属结核的生长 韵律与全球变化

韩喜球 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书在系统阐述大洋多金属结核的形态、结构构造、矿物组成、生长速率和年代及分布特征和形成机制等基本特征的基础上,深入研究了多金属结核的显微韵律生长结构。通过原位提取多金属结核生长剖面的气候与环境替代指标,进行谱分析和分形维数比较,发现多金属结核的生长韵律是地球轨道周期所驱动的全球气候与环境变化打下的烙印,提出了利用地球轨道周期印记法确定多金属结核的高分辨率生长速率和年龄新方法,并利用高分辨率放射性测年法进行了验证。最后提出多金属结核韵律生长的机制与模式。

本书可供从事海洋地质、海洋矿产、古海洋学、全球变化研究的专业人员及有关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大洋多金属结核的生长韵律与全球变化/韩喜球著.
北京:地质出版社,2009.3
ISBN 978-7-116-06017-3

I. 大… II. 韩… III. 海底矿物资源-多金属矿床-研究 IV. P744

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 045731 号

责任编辑:蔡卫东
责任校对:李 玫
出版发行:地质出版社
社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083
电 话:(010) 82324508 (邮购部);(010) 82324571 (编辑室)
网 址:<http://www.gph.com.cn>
电子邮箱:zbs@gph.com.cn
传 真:(010) 82310759
印 刷:北京印刷学院实习工厂
开 本:787 mm × 960 mm^{1/16}
印 张:7.5
字 数:150 千字
印 数:1—600 册
版 次:2009 年 3 月北京第 1 版·第 1 次印刷
定 价:40.00 元
书 号:ISBN 978-7-116-06017-3

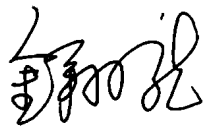
(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

《大洋多金属结核的生长韵律与全球变化》一书是韩喜球博士多年研究的成果。书中将多金属结核显微结构成因与生长机制的认识向前推进了一大步，并拓宽了多金属结核对古环境和古海洋研究的应用领域。

大洋多金属结核是国际海底区域的一种重要矿产资源，它蕴含着古气候与古海洋演变的丰富信息。如何从多金属结核中提取这些信息，特别是如何为结核生长剖面建立高分辨率的年代序列一直是个国际性的难题。作者通过对东太平洋多金属结核生长剖面内部显微结构的详细观察研究，认为多金属结核的生长受到生物作用与沉积作用的共同控制，其显微结构、矿物组成与含量、地球化学及灰度显示等特征在生长剖面上均表现出一定的韵律性和自相似性。为了揭示这种韵律所隐含的周期信息，作者原位提取结核生长剖面上的多维元素含量序列和灰度变化序列数据进行谱分析，发现其主要韵律周期的谱系结构与地球轨道周期及深海沉积物气候敏感指标的谱系结构非常相似，推断多金属结核的纹层韵律里可能包含了地球轨道周期印记。为了验证这个推论的可靠性，作者对结核表层进行高分辨率铀系测年，获得了相同的结果；并对多金属结核地球化学序列与灰度序列进行分形分析，发现其 Hurst 维数和分维数与深海沉积物岩心氧同位素序列的 Hurst 维数和分维数接近，从而揭示出多金属结核的生长受着地球轨道力驱动的潜在关系。然后利用所提出的地球轨道周期法为多金属结核建立起高分辨率的年代标尺，并从机理上探讨多金属结核生长与地球轨道周期所驱动的全球气候及环境变化之间的响应关系，提出了多金属结核的韵律生长模型。

此书从多金属结核微观研究出发，深入探讨了地球宏观作用与地质体微观结构之间的因果关系，是研究地球系统内相互作用的有益尝试，开辟了新的研究思路，值得借鉴。



2009 年 1 月 8 日

前 言

在深邃的大洋底，小小的多金属结核在顽强地生长着，历经千万年，几经沉浮，几经侵蚀，岁月的痕迹均化成密密匝匝的美丽花纹，蕴藏着万千奥秘。它们不仅是大自然馈赠给人类的珍贵礼物，而且是造化的黑匣子，为我们洞开了一条时光隧道，从第四纪到上新世、中新世、渐新世甚至始新世。一个多世纪以来，有多少科学家被它吸引，为它迷恋……多年来，作者在这条时光隧道里忙碌穿梭，想听懂多金属结核对人类的晦涩诉说，有关地球和海洋的过去、现在和将来的故事。

本书是作者在所完成的博士学位论文（浙江大学，2001）、国家海洋局青年科学基金资助课题（1996~1998；资助号：96103）和国家自然科学基金资助课题（2002~2004；资助号：40106005）研究成果的基础上整理而成的。研究过程中，曾经得到导师金翔龙院士（国家海洋局第二海洋研究所）和杨树锋教授（浙江大学）的悉心指导。同时，还承蒙国家海洋局第二海洋研究所陈建林研究员、沈华悌研究员、钱江初研究员、初凤友研究员，南京大学张富生教授、林承毅教授、边立曾教授、张文兰教授、王德滋院士和凌洪飞教授，浙江大学兰玉琦教授、叶英教授、陈汉林教授，中国科学院地质与地球物理研究所丁仲礼院士，中国科学院海洋研究所苍树溪研究员，青岛海洋地质研究所许东禹研究员，德国莱布尼茨海洋科学研究所（IFM-GEOMAR）的 Erwin Suess 教授、Anton Eisenhauer 教授和 Jan Fietzke 博士的热情帮助和指教。在此一并致以深切的谢意！

由于作者学识尚浅，本书的不当或错漏之处敬请广大读者批评指正。

著 者

2009年1月10日

Abstract

The Growth Rhythm of Pelagic Polymetallic Nodules and the Global Changes

HAN Xiqiu

Key Laboratory of Submarine Geosciences & Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Pelagic Polymetallic nodules are a type of microbiolith with typical stromatolithic texture. They are growing on the seabed at a rate of a few mm/Ma since the late Cenozoic era. These nodules are an ideal object to study the global climatic and oceanic change over time scales of 10^5 to 10^8 years.

This book firstly summarizes the morphology and type, microtexture, mineral composition, formation mechanism, growth rates and age, the regional distribution of the Pacific polymetallic nodules, as well as the global tectonic, palaeoceanography and palaeoclimate patterns of the Pacific Ocean during the Cenozoic era. Secondly, the microtexture of polymetallic nodules from the East Pacific Ocean is studied and documented in detail. It is proposed that both microorganism and sedimentation control the growth of polymetallic nodules. The characteristics of microtexture, mineral compositions, geochemistry and reflectance along growth profile change rhythmically and are correlatable. To reveal the cyclic information hidden in the rhythm, the time series of the major elements (e. g. Mn, Fe, Si, and Al) of Nodule 1783 ($142^{\circ}22.34'W$, $8^{\circ}22.39'N$, water depth 4974 m) and Nodule 2392 ($154^{\circ}37.516'W$, $9^{\circ}626'N$, water depth 5194 m) are obtained by line scanning electron microprobe with scan steps of $0.5\ \mu m$, and the gray-scale series are obtained from micrographs by digitization technology. The method of power spectrum analysis (Fast Fourier Transform) is used to distinguish their hidden oscillatory cycles. Features of the FFT spectra for Si, Al, Fe, and Mn as well as gray-scale series in the $0.00 \sim 0.10$ cycles/ μm frequency band bear strong resemblance to those of spectra of orbital and insolation variations during the Quaternary and of climatical-

ly-sensitive variables in deep-sea sediment cores. This result supports the hypothesis that the spectra for the nodule record the Milankovitch orbital signatures of eccentricity (100 ka), obliquity (41 ka) and precession (23 ka and 19 ka). The rhythmic laminae can act as time scale similar to a geochronometry. Using the orbital imprint, the growth rates of the nodules can be calculated, which is 4.5 mm/Ma for Nodule 2392, and 2.7 mm/Ma for Nodule 1783. The $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ method is used to date the uppermost layer of Nodule 2392 and yield the growth rate of 4.6 mm/Ma, which coincides perfectly with the results obtained from orbital pacing. Meanwhile, the fractal dimensions of the elemental geochemistry series and gray scale series are computed and compared with those of polymetallic crust from the Central North Pacific Ocean and climatically-sensitive variables in deep-sea sediment cores from the Indian Ocean. Since their values are close to each other ($D = 1.20 \sim 1.32$), it is suggested that the basic factors controlling the growth of polymetallic nodules and deep-sea sedimentation are similar. All of them are forced by orbital cycles and express climate changes.

The fractal evolution processes of the main elements of polymetallic nodules and deep-sea sediments are studied through computing their correlation dimensions in different embedding space. The results show that there are attractors in both geochemistry series of nodule and sediments with values of 11 and 3, respectively. It indicates that Fe_2O_3 and MnO of a deep-sea sediment core can be described by 3 variables, which probably represent volcanic, organic and terrestrial sources. However, 11 variables are needed to describe Fe, Mn in polymetallic nodule, which imply that the sources or existences of these elements in the nodules are very complicated, and complex biochemical processes must have taken place during the formation of the nodules.

Lastly, the relationship between the characteristics of stromatolithic texture of the Pacific polymetallic nodules and the growth environment is discussed. It is suggested that microbes are the builders of the polymetallic nodules. Hydrodynamic condition and dissolved oxygen content in water body control the types of stromatolithic texture, morphology and distribution of pelagic nodules.

According to the growth rates inferred from the orbital pacing, a time scale extending to 570 ka of Nodule 2392 is reconstructed. The relationship between the growth of polymetallic nodules and climate, the evolution of AABW (Antarctic Bottom Water) as well as earth's orbital cycles is discussed, and a formation model for growth rhythm of polymetallic nodule is given. It is suggested that the changes in inso-

lation brought about by the earth's orbital perturbations control the incidence of glacial episodes and development of AABW, which in turn would lead to the periodic changes of redox conditions, mass fluxes, and influence the growth habitat of microorganisms. Growth of microbes, metal precipitation and trapping of inorganic and biogenic sedimentary particles act simultaneously, resulting in a complex stromatolitic texture of the deep-sea polymetallic nodules driven by environmental changes. The prominent long cycles in polymetallic nodule growth may be mainly related to physical-chemical condition of the environment and mass fluxes, while the short ones are probably related to the growth and propagation of microbes. The superposition of these cycles forms the cyclical alternation of laminae in polymetallic nodules.

Key words: polymetallic nodule, growth rhythm, Milankovitch cycles, global climate change, fractal, late Cenozoic era, Pacific Ocean

目次

序

前言

英文摘要

1 绪论	(1)
1.1 大洋多金属结核研究概况	(2)
1.2 全球变化研究概况	(4)
1.2.1 超长尺度气候周期 (构造尺度 $>10^6$ a)	(4)
1.2.2 长尺度气候周期 (轨道尺度 $10^4 \sim 10^5$ a)	(5)
1.2.3 小尺度气候周期 (海洋-大气尺度 $<10^3$ a)	(6)
1.3 研究区域与样品	(7)
2 多金属结核的基本特征及其形成环境	(9)
2.1 多金属结核的基本特征	(9)
2.1.1 多金属结核的形态和类型	(9)
2.1.2 多金属结核的结构与矿物组成	(10)
2.1.3 多金属结核的年龄与生长速率	(13)
2.1.4 多金属结核的分布及其主要控制因素	(13)
2.2 多金属结核的形成环境	(14)
2.2.1 太平洋新生代全球构造、古海洋及古气候演化格局	(14)
2.2.2 古海洋溶解氧演化	(15)
2.2.3 多金属结核的生长期与间断期	(17)
2.3 多金属结核的成因	(17)
3 多金属结核的韵律生长特征	(20)
3.1 多金属结核的叠层石特征	(20)
3.2 多金属结核生长的韵律性	(20)
3.2.1 结构韵律	(21)
3.2.2 矿物成分韵律	(25)
3.2.3 化学成分韵律	(25)
3.3 纹层韵律的统计	(26)
4 多金属结核生长韵律的时间序列分析	(28)
4.1 时间序列及其谱分析的基本原理与方法	(28)

4.2	地球化学序列中的周期信息	(31)
4.2.1	多金属结核的地球化学序列资料的获得	(31)
4.2.2	地球化学序列的功率谱分析及其周期	(37)
4.2.3	地球化学序列中周期的稳定性	(42)
4.3	多金属结核灰度序列中的周期信息	(44)
4.3.1	多金属结核中灰度序列的获取	(44)
4.3.2	多金属结核灰度序列中的周期	(45)
5	多金属结核生长韵律中的地球轨道周期印记及其年代与生长速率的确定	(48)
5.1	地球轨道周期与米兰柯维奇 (Milankovitch) 理论	(48)
5.2	多金属结核生长韵律中的地球轨道周期印记及其生长速率的计算	(52)
5.3	对多金属结核生长速率的检验	(55)
5.3.1	多金属结核的定年方法	(55)
5.3.2	$^{230}\text{Th}_{\alpha}/^{232}\text{Th}$ 和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 高分辨率测年	(58)
5.3.3	Sr 同位素法	(61)
5.3.4	经验公式法	(64)
5.3.5	对地球化学时间序列的功率谱验证	(64)
5.4	与深海沉积物气候替代指标的功率谱比较	(66)
5.5	多金属结核的年代标尺	(75)
6	多金属结核生长韵律的分形研究	(77)
6.1	分形理论	(77)
6.2	分形维数的定义及计算方法	(78)
6.3	多金属结核与深海沉积物中气候替代指标的分形比较	(82)
6.4	主要元素的分形演化	(83)
6.4.1	多金属结核中主要元素的分形演化	(83)
6.4.2	深海沉积物中 Fe、Mn 元素的分形演化	(84)
6.5	多金属结核韵律生长的主控因子及分形动力学模型	(85)
7	多金属结核的韵律性生长与气候及环境的关系	(88)
7.1	多金属结核的生长与南极底流的关系	(88)
7.2	多金属结核的生长与全球气候的关系	(90)
7.3	多金属结核韵律性生长的机制	(94)
8	结 论	(96)
	主要参考文献	(98)
	后 记	(106)

Contents

Preface

Foreword

Abstract

1 Introduction	(1)
1.1 Current state-of-the-art of polymetallic nodule studies	(2)
1.2 Current state-of-the-art of global climate change studies	(4)
1.3 Study region and samples	(7)
2 Basic Characteristics of Polymetallic Nodules and Their Growth Environment	(9)
2.1 The Basic Characteristics of Polymetallic Nodules	(9)
2.1.1 Morphology and type	(9)
2.1.2 Micro-tecture and mineral composition	(10)
2.1.3 Ages and growth rates	(13)
2.1.4 Distribution and their controlling factors	(13)
2.2 The growth environment of polymetallic nodules	(14)
2.2.1 The evolution of global tectonics, paleoceanograpy and paleoclimate of the Pacific Ocean in the Cenozoic era	(14)
2.2.2 The evolution of dissolved oxygen of seawater in the Cenozoic era	(15)
2.2.3 The growth periods and hiatus of polymetallic nodules	(17)
2.3 The gorigin of polymetallic nodules	(17)
3 Characteristics of Rhythmic Growth of Polymetallic Nodules	(20)
3.1 Characteristics of stromatolite-like structure of polymetallic nodules	(20)
3.2 Rhythmicity in the growth of polymetallic nodules	(20)
3.2.1 Rhythmic micro-tecture	(21)
3.2.2 Rhythmic mineral composition	(25)
3.2.3 Rhythmic chemical composition	(25)
3.3 Statistics of the rhythmic laminae	(26)

4 Time Series Analysis for Growth Rhythm of Polymetallic Nodules	(28)
4.1 The basic principles and methods of time series and spectral analysis	(28)
4.2 The cyclic information of geochemical series in polymetallic nodules	(31)
4.2.1 The acquisition of geochemical series data	(31)
4.2.2 The power spectral analysis of geochemical series and their cyclicities	(37)
4.2.3 The stability of the cyclicities recorded in the geochemical series	(42)
4.3 The cyclic information of gray-scale series in polymetallic nodules	(44)
4.3.1 The acquisition of gray-scale series data	(44)
4.3.2 The cyclicities in gray-scale series data	(45)
5 The Earth Orbital Imprints on the Growth Rhythm of Polymetallic Nodules and the Determination of Their Ages and Growth Rates	(48)
5.1 The earth orbital cycles and the milankovitch theory	(48)
5.2 Imprint on the growth pattern of polymetallic nodules and the calculation of their growth rates	(52)
5.3 Validation and discussion on the growth rates	(55)
5.3.1 The methods of age dating	(55)
5.3.2 The high resolution $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}/^{232}\text{Th}$ and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ dating	(58)
5.3.3 Sr isotope for age determination	(61)
5.3.4 Empirical equation for age determination	(64)
5.3.5 Validation of geochemical time series with power spectral analysis	(64)
5.4 Power spectral comparison with climatically-sensitive variables in deep-sea sediment cores	(66)
5.5 A time scale of polymetallic nodule	(75)
6 Fractal Analysis of the Growth Rhythm of Polymetallic Nodules	(77)
6.1 The fractal theory	(77)
6.2 Definition of fractal dimensions and calculation methods	(78)
6.3 Fractal comparison of geochemistry and gray-scale series in polymetallic nodules and climatically sensitive variables in deep-sea sediment	(82)

6. 4	Fractal evolution behavior of major elements	(83)
6. 4. 1	Fractal evolution behavior of major elements in polymetallic nodules	(83)
6. 4. 2	Fractal evolution behavior of Fe and Mn elements in deep-sea sediments	(84)
6. 5	Main controlling factors for the growth of polymetallic nodules	(85)
7	The Relationship Between the Rhythmic Growth of Polymetallic Nodules and the Global Climate and Environment	(88)
7. 1	The relationship between the growth of polymetallic nodules and the Antarctic Bottom Water	(88)
7. 2	The relationship between the growth of polymetallic nodules and the global climate	(90)
7. 3	The mechanism of the rhythmic growth of polymetallic nodules	(94)
8	Conclusions	(96)
	References	(98)
	Postscript	(106)

1 绪 论

国际社会特别是国际科学界已广泛地认识到人类正面临着严重的全球环境问题,为了维持人类自身生存和可持续发展,全球变化研究已成为当今人类社会共同关注的研究“热点”。恢复地质时期全球气候的变化历史,是了解气候变化的原因与机制、建立可靠的预测模型的基础。

气候系统是一个包括了大气圈、水圈、岩石圈和生物圈等子系统的复杂系统。这些系统除了受到外界不同时间尺度的周期的或非周期的强迫作用外,内部之间还通过能量和动量交换及生物和化学循环,进行不同时间尺度的线性和非线性的相互作用,从而可以出现时间尺度从天到 10^8 a、空间尺度从微米到全球尺度的变化,即气候系统具有多层次结构。人们一般比较关注全新世以来较小尺度的气候与环境变化(年际—千年),因为该尺度与人类的经济生活密切相关。但为了更好地把握当前的环境和估计今后的变化趋势,了解所研究的小尺度的气候变化处在长尺度气候变化(数千年—数万年)的什么相位或背景是非常重要的。因此,在研究小尺度气候变化的同时,也需要研究气候系统的长尺度变化,小尺度和长尺度之间的关系是一种局部与整体的关系。虽然研究地史时期的长尺度气候变化,对于现在人类所关心的全球变化问题似乎有些遥远,但是通过研究,了解地质历史上气候系统对自然扰动的恢复力和反馈机制,可以作为评估未来气候变化的基础。

大洋多金属结核自从 20 世纪 60 年代被确认为有巨大的经济价值以来,科学家们较普遍地从矿产资源角度对它进行调查研究。由于多金属结核在漫长的生长过程中记录了大洋环境的演化信息,因此又是研究新生代以来长尺度全球气候变化的较理想对象。20 世纪 90 年代以来,已有越来越多的科学家对其所包含的古气候与海洋信息感兴趣(如 Banakar et al., 1993; Abouchami et al., 1995; von Blanckenburg et al., 1996; Feussner et al., 1997; K. W. Burton et al., 1997)。

利用大洋多金属结核研究大尺度全球气候变化及古海洋演化问题有其优越性,首先是它所记录的气候与环境演变历史档案的时间跨度较长(一般达上千余万年)。其次是它记录的信息高度浓缩而且纯净,同样记录大洋新第三纪(新近纪)以来的历史档案,前者可能是数千米的岩心,而后者则把历史浓缩在一直径数厘米的结核的生长纹层中。再次,它是对沉积物岩心的有价值补充。深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)资料表明,第三纪以

来,在世界各大洋普遍存在若干次区域性沉积间断,间断时间短则数十万年,长则数百万年(Keller et al., 1983),而且沉积记录容易遭受生物扰动和早期成岩作用的影响,使得沉积物中的气候替代指标往往存在某种程度的残缺或失真。而多金属结核的成分主要为金属氧化物,生物扰动等后期改造作用对其影响甚微。第四,人们对于过去南极底流的发育和演化状况知之甚少,因为南极底流的发育往往对应沉积作用的部分残缺或缺失期。相反,太平洋多金属结核的生长与南极底流有密切的关系,多金属结核的生长韵律及结构可能记录了南极底流的发生、发展和演化过程。因此,通过研究多金属结核的生长韵律,有望为古海洋变化包括过去南极底流的发生、发展和演化及大洋循环过程提供证据。

研究多金属结核中所记录的全球变化和古海洋信息,首先需要为多金属结核建立一个准确的时标。但由于多金属结核生长十分缓慢(一般为1~10 mm/Ma),受测年所需最低样品用量及各种测年方法本身的局限性所限制,各种常规的测年方法都难以使它的年代分辨率达到0.1~1 Ma。这严重制约了从多金属结核中有效提取全球变化及古海洋信息。因此,多金属结核的高分辨率定年一直是一个国际性难题。

自从Emiliani(1955)发现深海沉积物剖面上氧同位素的变化与日射率变化密切相关后,越来越多的调查和研究表明,由轨道驱动的气候周期的确已被地质记录中的各种韵律记录下来(Hays et al., 1976; Williams, 1991),使得米兰柯维奇(Milankovitch)的轨道周期理论得到了越来越广泛的证实。多金属结核的纹层韵律及地球化学记录中是否也存在地球轨道周期印记?如果存在,那么地球轨道周期和气候之间的纽带将为多金属结核年代与生长速率的确立提供一个绝好的机会,能使时间分辨率提高1~2个数量级,将为一直困扰人们的多金属结核高分辨率年代学问题的解决另辟蹊径。这有助于我们准确破译多金属结核中的纹层所记录的信息,了解并回答诸如过去约数千年来曾发生过哪些重要的古气候变化事件,控制多金属结核生长的主要因素有哪些等科学问题。

本书围绕以下6个方面内容展开论述:①多金属结核的基本特征及其形成环境;②多金属结核生长韵律的特征与周期;③多金属结核生长韵律的时间序列研究;④多金属结核的高分辨率年代与生长速率;⑤与深海沉积物岩心中气候替代指标的功率谱与分形比较研究;⑥多金属结核的生长同全球气候与环境的关系。

1.1 大洋多金属结核研究概况

1868年,瑞典“索菲娅”(Sophia)号在西伯利亚岸外的北冰洋喀拉海中探险时首次发现多金属结核。之后,英国“挑战者”号在进行环球探险时,

于 1872 年 2 月 18 日在大西洋西非岸外的法罗岛西南约 300 km 处用拖网采集到多金属结核,后来又陆续在大西洋、印度洋和太平洋其他的一些海域采集到了类似的结核样品,发现它在世界上大多数海域都存在(埃尔尼,1990)。但直到 20 世纪 60 年代, Mero (1965) 根据 110 个测站样品的分析结果,估算出仅太平洋海域就蕴藏有结核 16000 多亿 t, 约含 Mn 2000 亿 t、Cu 50 亿 t、Ni 90 亿 t、Co 30 亿 t, 仅太平洋每年新生长的结核就可达 1000 万 t, 从这新生长的结核中提取的 Cu、Co、Ni 等金属量要比每年这些金属的实际消耗量大得多,指出了多金属结核具有巨大的经济远景。从此,各国政府、企业和研究机构竞相开展对该资源进行调查研究。至今,科学家们对多金属结核的形态、结构构造、矿物组成、地球化学特征、成矿来源、控矿因素、生长速率、形成机制、分布规律和区域变化特征等有了较深刻的认识,并对太平洋的地形地貌、地层、沉积物类型与分布、古气候和古海洋环境有了较全面的了解(如 Piper et al., 1977; Usui, 1979; Glasby et al., 1982; Halbach, 1983; Cronan, 1987; von Stackelberg et al., 1991; 许东禹等, 1994; 金翔龙等, 1997; Knoop, 1998 等)。

根据成矿物质来源的不同,多金属结核可分为成岩成因、水成成因和热液成因三类(Chester, 1990)。结核的整体成分反映了结核生长过程中的形成方式和各种形成方式的相对重要性(Dymond et al., 1984), 各种成因的结核在物质成分上存在差异。关于其形成机制,传统看法认为它通过海水和沉积物间隙水中的溶解离子直接或间接沉淀而成,此外,无机催化氧化沉淀、胶体凝聚沉淀及非线性地球化学动力学等机制也相继提出以解释多金属结核中纹层的结构(Usui, 1979; Lyle, 1982; 王成厚, 1986; von Stackelberg et al., 1991; 姚德等, 1994; 张丽洁等, 1998)。最近十多年的研究认为,它是生物成因,生物-化学二元成矿,其内部显微结构与构造具有典型的叠层石特征,太平洋螺球苞菌和中华微放线菌分别是光滑型结核和粗糙型结核的主要建造者(张富生等, 1995; 林承毅等, 1996; 陈建林, 1999, 2002; 韩喜球等, 1997; Han et al., 1997)。

在多金属结核年代学与生长速率研究方面,一般认为多金属结核的生长速率为 1 ~ 10 mm/Ma, 多金属结核的生长年代为始新世—中新世至今(Ku, 1977; Huh & Ku, 1984; 许东禹, 1994)。常用的测年方法有放射性测年(铀系法和¹⁰Be法等)和古生物地层法。此外,也有通过测定结核的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值并和海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr演化曲线进行对比来推测多金属结核的年龄和生长速率,以及用 K-Ar 法和氨基酸消旋法测定结核核心年龄(如玄武岩和鱼牙等)推测多金属结核的平均生长速率(钱江初, 1999)。Heye et al. (1977), Lyle (1982) 和罗尚德等(1989)通过研究多金属结核生长速率与化学组分之间的

关系,建立了经验方程,由结核中主要元素的含量来评价结核的生长速率,使结核不同层位的化学组分经过换算成为结核的生长速率。然而,由于多金属结核的生长速率非常缓慢,受各种测年技术及其最低样品用量的限制,一般常规测年方法均较难使大洋多金属结核的测年精度达到10%,如对一块具有千万年生长历史的结核进行测年往往会存在上百万年的误差。最近几年,我们研究发现结核的生长纹层中包含了地球轨道周期的印记,提出利用地球轨道周期印记法能够获得结核的高分辨率生长速率与年代(韩喜球,2001; Han et al., 2003)。

基于多金属结核年代学的研究,多金属结核在古气候、古海洋和古海水演化等方面的研究得到了应用(Abouchami et al., 1995; von Blanckenburg et al., 1996; Burton et al., 1997; Han et al., 2003)。Kastern et al. (1998)利用多金属结核中的稀土元素Ce/La比值作为氧化还原指示剂示踪海水的溶解氧含量和南极底流的路径。Han et al. (2003)利用地球轨道周期印记法研究了太平洋多金属结核的高分辨率生长速率,认为结核的生长速率与晚第四纪气候变化有关,呈现约10万a的冰期-间冰期周期。

1.2 全球变化研究概况

20世纪90年代,国际科学界已组织了4个大型全球变化研究计划:①世界气候研究计划(WCRP);②国际地圈生物圈计划(IGBP);③全球环境变化的人类因素计划(IHDP);④生物多样性计划(DIVERSITAS)。分别研究物理气候系统、调节地球系统的物理-化学-生物相互作用过程、环境变化的人类因素(人类社会与环境的相互作用)以及养育人类社会的生物多样性等4个方面。随着这些计划的形成和执行,国际全球变化研究已从一般性全球变化问题向既具有区域性特点又具有全球意义的环境问题发展;在研究深度上,已从一般性的理解描述向全球变化的预测和最佳响应方向发展;在研究方式上,从多学科的介绍、联合和渗透向更高层次的综合集成发展。各时间尺度的研究情况大致如下:

1.2.1 超长尺度气候周期(构造尺度 $>10^6$ a)

该尺度气候周期的时限为百万—亿年。在地史时期先后出现过3次大冰期,分别为前寒武纪晚期[6.5亿~7亿a(B.P.)]、石炭二叠纪[2.7亿~3.5亿a(B.P.)]和第四纪,相互之间的间隔约3亿a。有人提出这种长周期变化可能与银河年有关,太阳绕银心公转一周的时间为2.5亿~3亿a(徐道一等,1983)。Fischer(1984)认为可能受地幔对流周期所支配。由于大量地幔柱的快速对流,在地球表面上表现为强烈的火山活动、岩石圈的破裂,以及