

河北兴隆中元古代硫化物黑烟囱群 发现及其地质成因*

李江海¹ 初凤友² 牛向龙¹ 冯 军¹ T. M. Kusky³

1. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012;

3. Department of Earth and Atmospheric Sciences, St. Louis University, St. Louis MO 63103, USA

摘要 报道了河北兴隆高板河中元古代硫化物矿床中保留完好的古海底黑烟囱群。高板河古海底黑烟囱群呈柱状、锥状、圆丘状、尖顶状及复合状等形态, 显示良好的热水通道, 一些烟囱顶部还保留明显的喷口以及放射状纹理, 记录了海底成矿热水以多种活动方式喷溢。它们的形态和组成类似现代洋底黑烟囱及世界其他地区发现的古海底黑烟囱。研究认为, 该区黑烟囱发育于地堑深水盆地, 与海底同沉积断裂活动密切相关。结构构造对比分析表明, 含矿热水与海水作用形成黑烟囱外壁, 通道内含矿热水持续运移及圈闭造成烟囱内部分带性及交代结晶过程。该区保留了不同形态和结构的烟囱类型, 表明海底成矿过程中涉及含矿热水的集束喷溢及弥散喷溢。

关键词 硫化物 黑烟囱 地堑 中元古代 喷流作用 华北

海底黑烟囱是近 20 年全球大洋科学调查取得的重大发现, 极大地改变了人类对深海底资源及成矿过程的认识^[1-4]。目前已在太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋、部分浅海和裂谷(贝加尔、东非)深水湖泊中发现约 140 余处黑烟囱及其金属硫化物分布区^[5-15]。黑烟囱内部及其周围极端环境下发育化能自养古生菌及其他多种生物类型, 其中, 化能自养古生菌最接近于地球早期原始生命的祖先^[4, 6, 7, 16, 17], 科学家提出生命起源于海底黑烟囱的新理论^[18-27]。由于海底黑烟囱大多处于 1000—4000 m 的深海底, 无论是实地寻找和直接观察都要求高技术手段并且费用高昂。

古海底硫化物黑烟囱能在地层中侥幸保留下来, 成为研究当时成矿过程及其生物活动的重要样本。因此, 陆上开展古海底黑烟囱及其生物记录研究及其对比, 对于探讨海底成矿过程及极端环境下

生命活动具有积极意义。由于海底黑烟囱形成后常经历海底氧化或构造破坏, 大型完整的黑烟囱难以保存下来, 目前仅在陆上少数地区发现硫化物黑烟囱(多为厘米级尺度), 如俄罗斯乌拉尔南部、爱尔兰、澳洲皮尔巴拉、加拿大、日本等地硫化物矿床均有报道(图 1)^[28-35]。上述研究表明地史上海底黑烟囱活动与现代海底非常类似。

古海底黑烟囱是研究地史时期成矿过程、古海底环境及热水活动的典型样本。黑烟囱周围还可能保留极端环境下形成的微生物和生物化石, 对探讨生命起源也具有重要价值。借鉴现代海底及古海底黑烟囱研究经验, 围绕河北兴隆高板河硫化物矿床我们开展了古海底黑烟囱的深入研究(图 2)^[36]。在 2001 年以来的 20 余次野外工作的基础上, 在硫化物矿床中发现典型的古海底黑烟囱样本 40 余件。本文报道这些古黑烟囱群的特征形态、组成、结构

2004-05-10 收稿, 2004-08-31 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40472097, 40172066, 40242014)和北京大学“九八五”资助项目

E-mail: jhli@pku.edu.cn

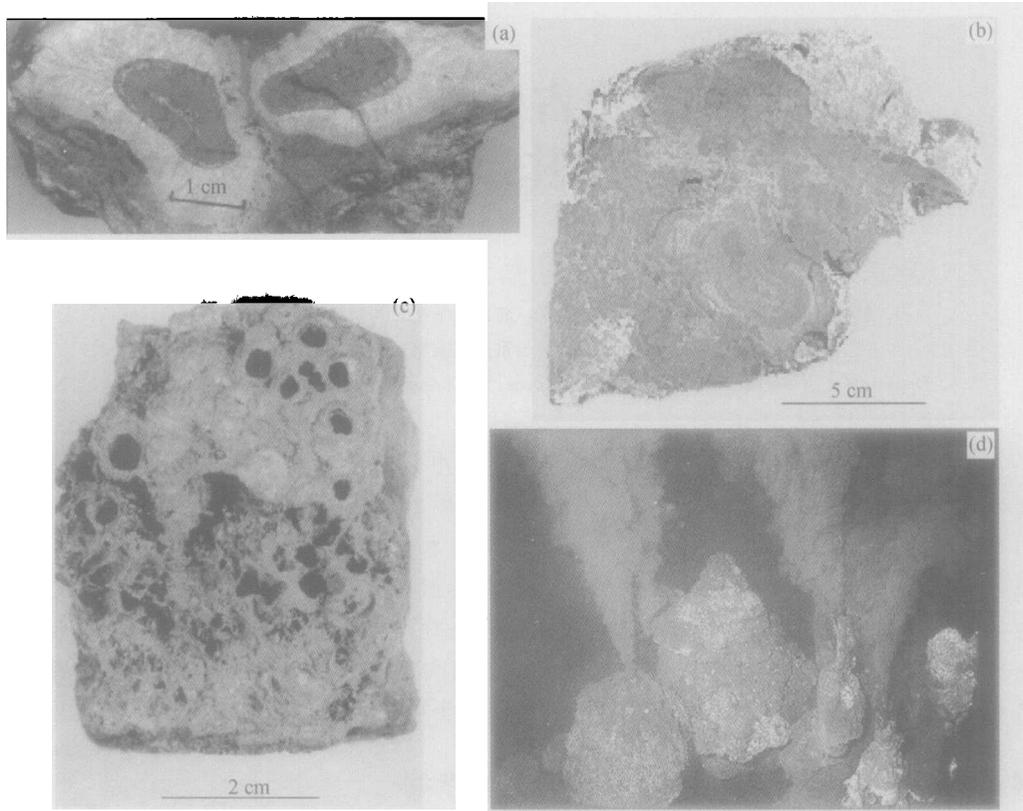


图1 古今海底黑烟囱对比^[33,45]

(a), (b), 俄罗斯乌拉尔古生代硫化物黑烟囱; (c) 爱尔兰古生代硫化物黑烟囱; (d) 东太平洋洋隆活动的硫化物黑烟囱

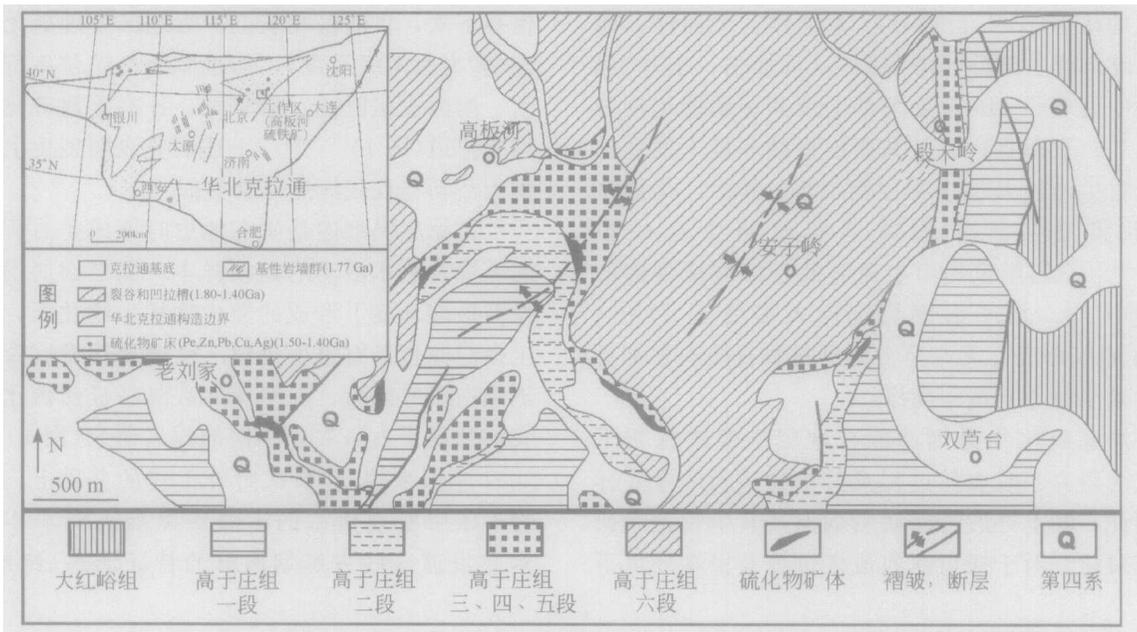


图2 河北兴隆高板河硫铁矿地质简图(插图为华北中元古代区域构造图)

构造等, 在现代洋底(大西洋、东太平洋、西太平洋)黑烟囱样本对比的基础上, 初步探讨其地质

成因模式。

1 地质背景

黑烟囱构造发现于冀东兴隆县高板河硫化物矿区(图2)。高板河硫化物矿床属于典型的中元古代层控矿床(1.43 Ga),围岩是长城系高于庄组第五段的黑色页岩夹含锰白云岩(图2)^[37-39]。含矿地层从下向上依次为:(1)含锰黑色页岩、凝灰岩-泥质碳酸盐;(2)含锰泥质白云岩;(3)黑色碳质粉砂质页岩及瘤状灰岩,顶部硫化物矿化;(4)中厚层白云岩和黑色页岩,中下部为主要含矿层;(5)含结核板状灰岩、瘤状灰岩、页岩互层,伴随硫化物矿化。高于庄组沉积于北北东向的燕辽地堑深水盆地(图1)^[40,41],沉积-成矿过程受同沉积正断层活动所控制^[39]。矿体厚度30—80 m,上部主要由硫铁矿组成,下部为铅锌矿,两种成分的矿体均发现黑烟囱及喷口构造。含矿围岩顶底板及其硫化物矿层保留丰富的同沉积构造及角砾岩,广泛出现瘤状-鼓状灰岩,它们被认为是深水环境沉积标志,记录补偿面以下碳酸盐溶蚀作用^[42]。

2 高板河古海底黑烟囱地质特征及保存状态

依据现代和古代海底黑烟囱地质对比,提出的古海底黑烟囱鉴别标志包括^[43],特征的柱状、锥状、圆丘状等烟囱形态,硫化物同心状分带构成的通道构造,以及顶部喷口构造等。黑烟囱外壁常显示特征矿石构造(树枝状构造、孔洞构造、胶体构造等),而烟囱内部以矿物重结晶、流体通道发育以及后期充填等为特点。上述结构构造记录海底成矿热水喷涌,与海水混合冷却、矿物沉淀堆积,以及烟囱内高温流体交代重结晶等演化阶段。借鉴上述特征,在排除后期构造变形(紧闭褶皱、叠加褶皱)、后期岩浆热液活动(脉体、裂隙)、海底同沉积构造扰动(局部突起)、微生物叠层石(柱状-穹隆构造)、成岩压实构造等可能性的基础上,可以有效鉴别出高板河硫铁矿内的古海底黑烟囱。

在先前发现黑烟囱残片基础上^[36],在高板河矿区持续的野外调查又发现40余个完整硫化物黑烟囱及其黑烟囱残片。它们保存于厚层矿体内,完整黑烟囱常见于巨大规模硫化物丘体表面,而黑烟囱残片常见于丘体内部,代表早期垮塌的烟囱。烟囱底部矿体出现硫化物、碳酸盐等细脉,或浸染状-角

砾化矿石,代表含矿热水补给带。井下及地表调查表明,高板河地区保存了丰富的黑烟囱类型,从成分上可以划分为:硫铁矿型(主要由黄铁矿、闪锌矿、少量方铅矿及后期碳酸盐充填组成)和铅锌矿型烟囱(主要由方铅矿、闪锌矿及黄铁矿组成)。它们分别出现于相关成分矿体内。

高板河黑烟囱显示柱状、锥状、圆丘状、尖顶状及各种复合形态,形态常向上收敛或在顶部出现喷口或喷孔构造。烟囱常可以划分为外壁和通道(内核)两部分。许多烟囱保留通道构造,它们为轴部通道,或显示分支的复杂通道,围绕通道显示矿物成分和结构的分带性。通道内壁生长或充填黄铁矿、碳酸盐,通道内常见自形程度较高黄铁矿。有的通道被后期泥质或碳酸盐物质充填,使通道形态完好保留。有的烟囱通道已被大量自形黄铁矿颗粒充填,残留孔隙被后期碳酸盐愈合。锥状、柱状及部分圆丘状烟囱顶部常保留喷口构造,并被硫化物和碳酸盐充填。上述烟囱的形态、组成完全可以与现代海底黑烟囱对比^[5,6,8-12,44]。

小规模烟囱常被原地直立埋藏,见于硫化物丘体顶部,侧翼逐渐被硫化物和泥质纹层超覆,表明烟囱形成期间伴随微弱的海底沉积作用。在小型锥状烟囱之间低洼部位,常堆积细粒黄铁矿,来源于烟囱喷溢。较大烟囱常呈倒伏状包裹于硫化物内,与周围块状硫化物层显示整合关系。黑烟囱残片与周围硫化物具有明显界面,并易于剥离,与烟囱倒塌时已固结有关,它们与周围硫化物成分结构有明显差异。在横切面上,黑烟囱显示特征的同心状矿物成分或结构分带性。烟囱通道内交代及重结晶较普遍,并被闪锌矿、碳酸盐及硅质充填。上述特点表明,黑烟囱最初形成于海底与海水界面附近,小烟囱之间纹层记录了深海底沉积作用。随着黑烟囱的生长发育和体积增长,同沉积构造活动或重力作用使之破坏破坏,倒塌并被埋藏成为矿体组成部分。

黑烟囱在纵向和横向上常与低缓硫化物丘体过渡,后者显示胶状黄铁矿外壳,丘体内常见烟囱及其外壳残片、硫化物-围岩角砾、硫化物胶结物、黄铁矿-闪锌矿脉体(2—30 mm厚)及晚期方铅矿-碳酸盐细脉。丘体厚度达10—20 cm以上,直径为几十厘米至2 m以上。黑烟囱残片被自形和半自形黄铁矿充填、愈合或胶结。硫化物角砾形态不规则,大

小可达几厘米, 闪锌矿及方铅矿充填角砾空隙, 硫化物脉体平行或切过丘体外壳. 硫化物丘体记录了黑烟囱倒塌后持续的热水成矿过程.

3 硫化物黑烟囱类型

依据其保存状态及其形态类型可以初步划分为

以下类型:

3.1 锥状黑烟囱

烟囱为直立圆锥状(图3), 顶部保留喷口构造

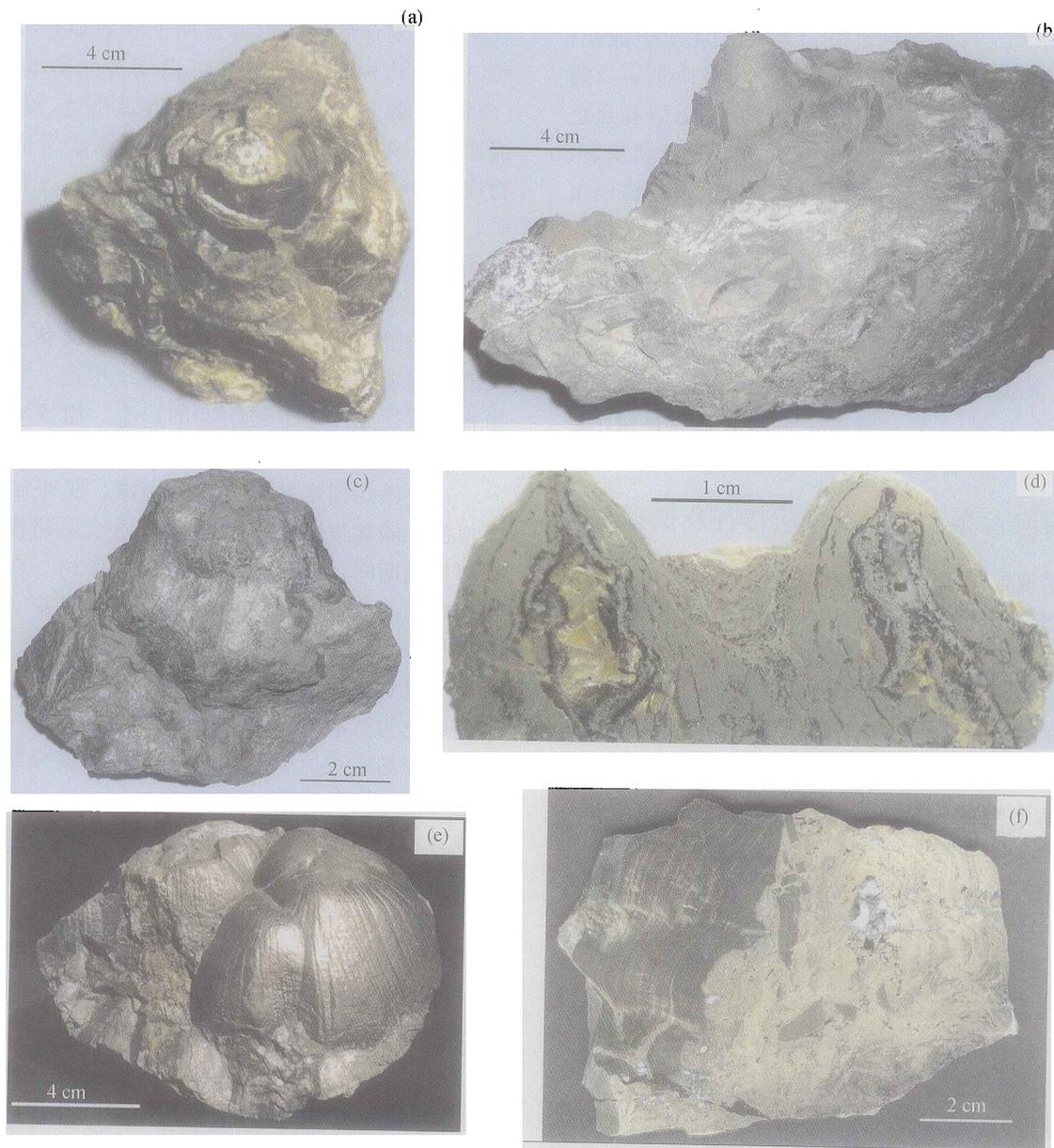


图3 锥状黑烟囱及其切面

(a), (b) 锥状黑烟囱, 轴部通道被碳酸盐充填; (c) 微型锥状黑烟囱显示垂向生长黄铁矿圈带; (d) 微型锥状黑烟囱纵切面. 烟囱内部具有矿物成分分带、通道内生长闪锌矿和黄铁矿, 并充填碳酸盐, 喷孔明显保留. 烟囱之间为喷溢堆积的黄铁矿细颗粒物; (e), (f) 圆钝的锥状黑烟囱及其纵切面, 烟囱表面显示热水喷溢放射状纵向纹理. 切面显示胶状黄铁矿外壁与结晶黄铁矿内核的分带性, 内核出现外壁残片, 孔洞构造被碳酸盐充填

(图3(a)). 烟囱直径3—20 cm, 高度为3—30 cm. 烟囱较小时呈聚集形态, 烟囱之间低洼处堆积细小黄铁矿颗粒(图3(d)), 烟囱基座为硫化物角砾. 喷口被同心状硫化物、碳酸盐交替的纹层或硫化物颗粒充填. 锥状烟囱表面光滑, 局部有微小突起, 有的烟囱显示向上生长的水平纹带. 有的钝锥状烟囱顶部保留喷孔(图3(e)), 并在喷孔周围形成放射状纹理, 与烟囱喷溢过程中向外流动溶蚀有关. 喷口周围外壁厚度明显变薄(图3(a), (d)), 以敞口或密集狭缝与海水沟通, 使烟囱内部热水呈半封闭状态, 向外高速喷涌, 造成外壁生长及内部重结晶交代. 显微镜下观察表明, 喷孔上方堆积细粒疏松的黄铁矿, 向喷孔周围硫化物重结晶作用增强, 结构变致密.

烟囱外壁由多孔、细粒或胶状黄铁矿圈层组成, 有时出现淬火构造, 极细粒黄铁矿形成复杂树枝形态. 外壁外侧孔洞发育, 其中充填自形黄铁矿和方铅矿. 因此, 外壁由细粒黄铁矿沉淀堆积而成. 外壁内侧光滑致密, 向内重结晶增强. 烟囱内部通道常充填粗粒闪锌矿. 通道内壁内生长自形黄铁矿

和闪锌矿晶体, 核部常被后期碳酸盐充填.

锥状黑烟囱具有明显的成分及结构分带性, 由外向内依次为: 胶黄铁矿颗粒层、多孔黄铁矿、粗粒自形-半自形黄铁矿镶边、核部充填闪锌矿(方铅矿)、碳酸盐及硅质等, 它们记录通道内含矿热水成分演化过程. 通道孔洞发育并且尺度较大, 常充填碳酸盐和硅质, 粗粒自形-半自形黄铁矿散布其中.

3.2 柱状黑烟囱

硫化物显示特征的长管状构造, 多为单柱体(图4), 发育直立的中央通道, 表面发育局部突起, 纵向流动纹理发育. 已发现的柱状烟囱残片长约10—30 cm, 直径为5—30 cm. 其中一个柱状烟囱残片高12 cm(投影高度可达25 cm以上)(图4(a)), 上端直径10 cm, 向下加粗, 底部直径达16 cm. 粗大柱状烟囱常由多个烟囱复合而成, 直径达30 cm以上, 残留高度大于1 m. 完整柱状烟囱非常罕见, 多以倒伏状见于硫化物内(图4(b)). 随着烟囱高度增加, 重力上不稳定使其难于保存.

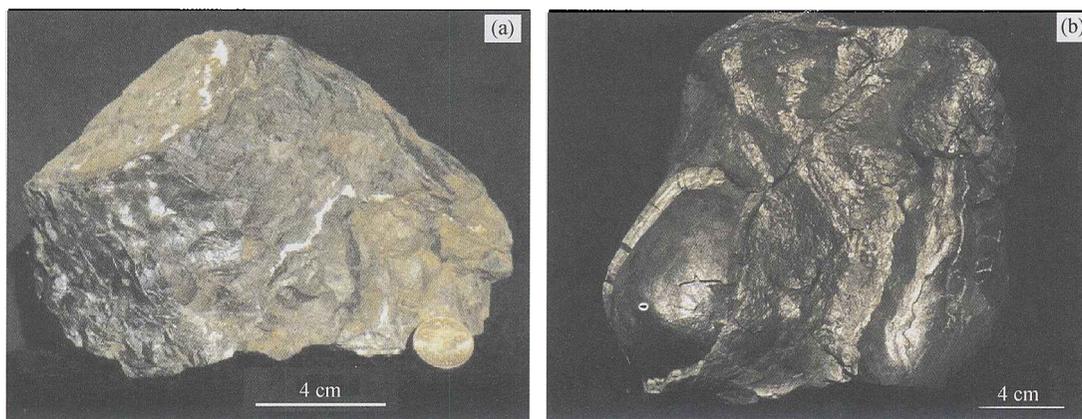


图4 柱状黑烟囱及其横断面

(a) 柱状黑烟囱及其横断面, 外壁表面纵向纹理记录热水作用, 柱体向下部直径逐渐增大. 轴部通道同心圈状, 被黄铁矿及碳酸盐充填; (b) 柱状-锥状复合黑烟囱残片被整合地包裹于块状硫铁矿内

烟囱可以划分为外壁和内核两部分(图4(a)). 黄铁矿外壁较薄、致密坚硬, 向内重结晶增强, 厚度为0.5—10 cm, 由同心圈状胶状黄铁矿组成, 纹圈之间常以孔隙连通, 记录热水活动. 外壁内侧常见同心状通道构造, 通道周围黄铁矿结晶良好, 并充填黄铁矿、闪锌矿及碳酸盐等. 烟囱通道上下贯通, 以多孔洞密集为特点, 孔洞尺度达1—

2 cm, 常充填碳酸盐. 烟囱内部还出现外壁碎片, 表明持续热水活动对内壁溶蚀破坏. 烟囱核部孔隙向下增大, 孔隙周围显示黄铁矿镶边构造, 充填粗粒自形黄铁矿或闪锌矿. 烟囱底部出现围岩角砾和烟囱残片, 其间孔洞也明显增大. 烟囱根部具有角砾化特征, 表明柱状烟囱的形成与海底构造活动相关.

3.3 圆丘状烟囱

烟囱形态浑圆，起伏明显，常群体出现，上下叠覆或侧向丛生(图5)。它们常出现于锥状或柱状黑烟囱外围，但高度较低。单个烟囱直径多为5—10 cm，高度为5—20 cm。外壁致密，呈同心圈状环绕烟囱通道，核部出现同心状多孔构造或狭窄不规

则通道，孔洞被闪锌矿、方铅矿、碳酸盐或泥质充填(图5(a)–(c))。这类烟囱表面常见微小突脊及网状沟纹，后者与通道沟通，代表含矿热水喷涌狭缝。有的烟囱形成圈状纹理，记录喷溢生长过程。个别高耸圆丘向锥状烟囱状渐变，顶部出现喷孔及放射状纹理，记录喷孔溢流作用。

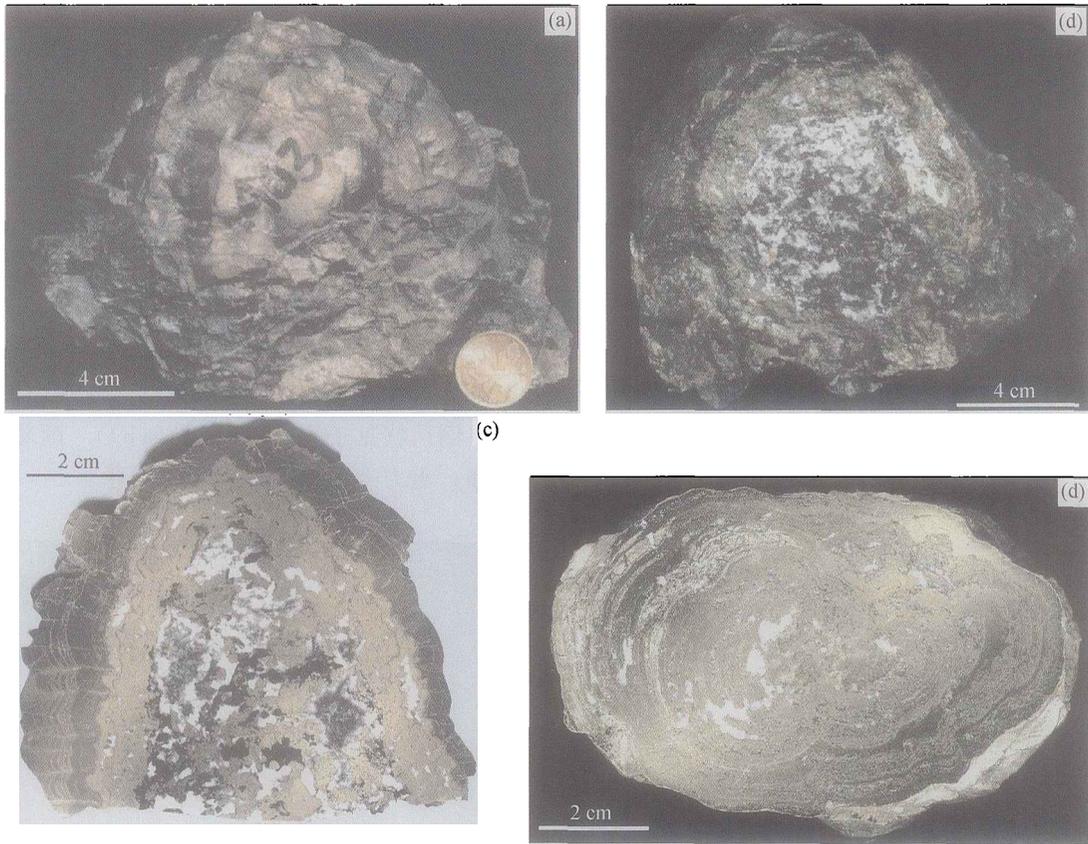


图5 圆丘状黑烟囱及其纵横切面

(a)–(c) 圆丘状烟囱侧翼、底部横断面及纵切面。烟囱表面发育脊线和缝隙，外壳同心圈状。核部通道复杂，并被碳酸盐和黄铁矿交替充填。烟囱由外向内显示明显的结构构造分带性，核部通道不规则，并被碳酸盐充填；
(d) 圆丘状烟囱横切面，核部显示同心圈状分布的热水通道，核部孔隙被碳酸盐充填

烟囱可以划分为外壁和内核两部分。外壁厚度为0.5—4 cm，普遍比圆柱状和圆锥状烟囱外壁厚。另外，其外壁厚度/内核半径比值为 $3/4$ — $1/4$ ，也普遍大于柱状和锥状烟囱。随着圆丘直径增加，外壁减薄，外壁厚度/内核半径比值逐渐减小，核部孔隙也增多。上述特征可以解释为喷溢速率的减缓有利于烟囱外壁生长加厚。

圆丘状烟囱普遍缺乏主通道以及顶部大口径喷孔，以分支状通道缝隙与外界沟通。通道同心圈状断续分

布或不规则状，各通道层横向上贯通。向烟囱核部硫化物结晶程度增强，孔隙内充填碳酸盐或泥质(图5)。因此，它们为多孔隙渗流产物，而非顶部集束喷溢。圆丘状烟囱造成内部热水圈闭，使核部重结晶作用增强，有利于成矿作用，以此区别于其他烟囱类型。

圆丘状烟囱外壁由胶状黄铁矿组成，致密坚硬，纹层发育，胶状构造记录了喷口活动相关的快速结晶(图5(c))。外壁向内部重结晶作用增强，胶状黄铁矿纹层与同心圈状孔洞交替出现，表明烟囱生长过程中

沿外壁发生弥散渗流. 烟囱内部充填黄铁矿颗粒, 孔洞内生长自形-半自形黄铁矿、闪锌矿及方铅矿等, 有时出现少量黄铜矿. 外壁纹层记录了渗流造成烟囱外壁向外加厚过程. 烟囱外壁内侧常发生破裂, 向烟囱顶部尤其明显, 外壁残片落在烟囱内部, 记录烟囱内部圈闭热水的溶蚀作用. 有的圆丘状烟囱由2—3个烟囱横向上聚集而成, 其间隔壁减薄或相互贯通, 它们与流体溶蚀、内部通道改变有关. 圆丘状烟囱通道还显示分支特点. 一些分支通道突破外壁, 使外壳发生破裂, 表明热水圈闭造成局部流体压力升高.

圆丘状烟囱内部通道具有圈层状特点(图5(d)), 记录烟囱生长、圈闭、破裂等多个旋回. 少数圆丘状烟囱显示从中心向外的放射状流体通道, 充填黄铁矿和闪锌矿, 指示热水渗流作用. 与其他类型的烟囱相比, 圆丘状烟囱以较厚黄铁矿外壁(3—4 cm)及复杂流体通道为特征, 核部孔洞较小, 渗流作用使其易于愈合充填, 造成通道形态改变. 低速喷发还造成硫化物颗粒就近沉淀堆积. 圆丘外壳曲率由内向外逐渐变

平滑圆钝, 沟纹被平滑而消失, 记录渗流喷溢使外壁向外生长. 这也是现代海底蜂巢状黑烟囱的普遍特征.

3.4 尖顶状烟囱

它们外壁陡立, 多呈孤立塔状-尖顶形态, 喷孔发育(图6). 烟囱表面粗糙, 内部矿物分带性较差, 高度3—5 cm, 直径为2—4 cm, 主要由铅锌矿及黄铁矿组成. 这类烟囱以较小尺度区别于其他类型的烟囱, 见于铅锌矿体内. 烟囱由外向内依次为黄铁矿角砾、细粒多孔闪锌矿外壁、黄铁矿及闪锌矿通道及充填的方铅矿. 烟囱向下渐变为硫化物角砾及基质, 表明烟囱生长始于硫化物角砾堆积基础上, 与海底构造活动相关. 外壁由致密细粒铅锌矿、胶状黄铁矿组成, 有时出现淬火构造, 黄铁矿集合体或角砾覆盖其上, 孔洞内充填硅质、方铅矿或微球状黄铁矿. 烟囱常显示分支及复杂形态的通道构造, 通道周围交代重结晶增强, 显示黄铁矿镶边, 并被铅锌矿充填. 烟囱与底部丘体热水通道相贯通.

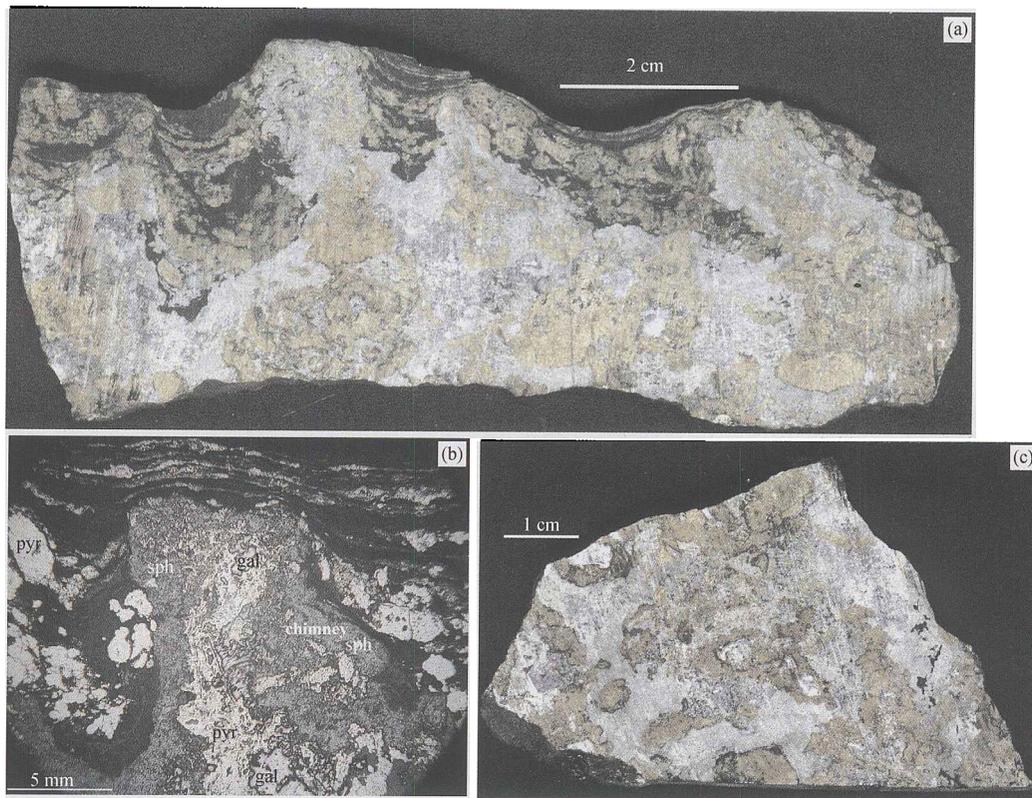


图6 尖顶状黑烟囱及其纵横切面

(a), (b) 尖顶状微型烟囱纵切面. 外壁主要由细粒铅锌硫化物组成. 通道以狭孔发育为特点, 具有黄铁矿镶边, 并充填方铅矿和碳酸盐; (c) 尖顶状微型烟囱横切面显示圈闭状外壁及其通道构造, 可以识别出多个被充填的烟囱通道

烟囱侧翼和喷口上方出现黄铁矿微球组成的纹层，它们由喷口向上重结晶逐渐减弱，粒径也逐渐减小。一些微球体可以追溯到喷口内，并延伸到喷口间低洼位置上。纹层厚度由喷口向外明显增加，为烟囱喷发向洼地聚集的结果。大量黄铁矿微球粒出现于喷口附近，可能与烟囱喷发诱发的局部湍流作用有关，流体高速喷发使其聚集、悬浮生长。烟囱侧翼纹层超覆于烟囱上，主要由粘土、碳酸盐及硫化物与黄铁矿微球层交替组成，记录烟囱喷发、生长、熄灭埋藏的生长过程。烟囱之间的纹层记录了古海底位置的变化。由于烟囱尺度很小时就停止发育，被深海底沉积纹层覆盖。

3.5 复合形态的烟囱

除上述典型的单一形态烟囱外，本区还发现尺度较大的复合烟囱及其残片(图7)。它们总体上呈

锥形，外壁陡立，直径为20—30 cm，高度为15—30 cm。表面形态起伏较大，圆丘状突起发育，并形成丰富的构造组合形态。烟囱表面低洼处保留热水喷溢狭缝，与烟囱内部分支通道沟通。它们构成柱状、锥状、圆丘状复合形态，烟囱显示分段特点。底部为圆丘-圆锥形，与下伏硫化物丘体过渡，直径较大，可达20—30 cm以上，向上变为锥形-柱形，直径为5—10 cm。向烟囱顶部形态明显收敛，出现喷口构造。复合烟囱常构成简单烟囱的底座。烟囱垂向形态变化和衔接，记录较长期的生长发育过程，以及含矿热水喷溢过程中物理化学性质的变化。这些烟囱内部通道复杂，具有分支以及不规则延伸特点，主通道有时保留，并被泥质充填。它们与现代海底蜂巢状烟囱形态及其内部构造非常类似，多缝隙造成弥散状热水喷溢活动。

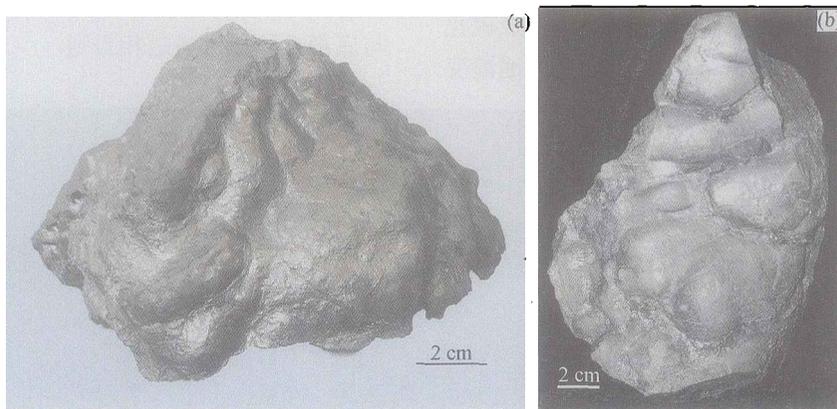


图7 复合形态的黑烟囱及其硫化物丘体构造

- (a) 圆锥状烟囱及其喷口构造，表面上收敛，显示热水流动改造形态；
(b) 柱状烟囱外壁残片，外壁形态陡立起伏，显示垂向生长分带性

3.6 硫化物丘体及其围岩同生变形

黑烟囱下伏硫化物丘体及下盘同沉积变形构造发育，块状矿石内常见中小尺度滑塌构造、同生角砾、微型生长正断层、同生紧闭褶皱等(图8)。上述变形限于矿层内发育，向上逐渐消失，变为层理平直的顶板围岩。硫化物丘体横向上过渡为层状、层纹状矿石，直到矿层尖灭。同生变形构造发育表明矿床形成过程中海底断裂活动。区域构造分析也表明，矿体分布受地堑内同生断裂活动所控制^[40]。同沉积断裂活动还为海水下渗淋滤矿物质及含矿热水上涌提供良好通道。在矿体下盘出现硅化蚀变、

浸染状黄铁矿及闪锌矿-方解石细脉带等，代表含矿热水补给带。

硫化物矿床围岩为含黄铁矿黑色页岩-泥晶碳酸盐韵律沉积。矿床顶底板广泛出现瘤状灰岩(图9)，呈孤立透镜状-鼓状，直径15—30 cm不等，但在同一层位内，大小一致，其成分主要为泥灰质，和黑色页岩层交互出现。这些瘤状灰岩形态变化均限于层内，不同岩层之间未见物质机械运动，表明它们是补偿深水沉积成岩的产物^[42]，而非后期构造变形产物。它们与下盘围岩及矿体同生构造发育相对应，指示矿床形成于构造活动的深水沉积环境。根

据本区流体包体研究,成矿流体不发生沸腾要求水深大于660 m^[39].因此,局部深水及封闭的构造凹陷,为硫化物矿床形成提供了还原环境和抑制含矿

流体沸腾的高静水压力.区域古地理恢复也表明^[40,42],硫化物矿床出现于深水地堑内,并受同生断裂控制.

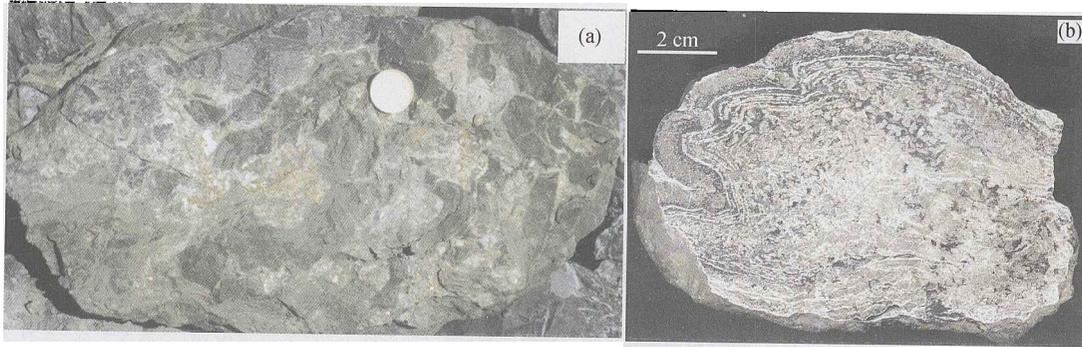


图8 硫化物丘体同生构造变形

(a) 硫化物丘体内部发生破裂,并被闪锌矿脉胶结愈合(硬币直径约2.5 cm);(b) 硫化物丘体表壳形成滑塌褶皱,内部角砾化,并被细粒铅锌硫化物愈合胶结,向下变形减弱.上述特点记录硫化物未固结状态的同生变形

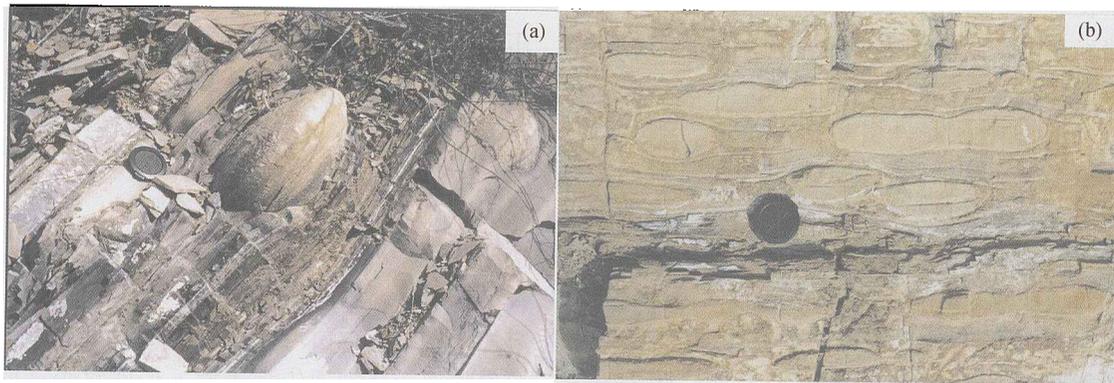


图9 黑烟囱硫化物顶板的深水沉积记录

(a) 发育瘤状(鼓状)灰岩的地层平直延伸,泥页岩夹层之间出现瘤状灰岩(照相机镜头盖直径约5 cm);(b) 瘤状(鼓状)灰岩孤立或断续出现于平直泥页岩内,未见穿层的机械变形

4 黑烟囱形态变化及其地质意义

高板河黑烟囱显示良好的矿物成分和结构构造,可以简化为外壁和内核两部分.圆丘状烟囱外壁厚度较大,而柱状和锥状烟囱外壁较薄.从柱状到锥状到圆丘状烟囱,外壁厚度/内核半径的比值逐渐增大,高度/底部直径的比值逐渐减小(表1).广泛的研究对比表明,各种烟囱的组成、结构构造、内部重结晶程度等,有明显差异(表1).上述特征记录了含矿热水的温度、喷溢速率及喷溢方式的差异^[6].柱状和锥状黑烟囱外壁和通道陡立,残

片高度常大于十余厘米,顶部喷口发育,表明热水集束喷发.围绕轴向通道出现同心环状结构及成分分带.中央通道常被黄铁矿-碳酸盐交替纹层或碳酸盐充填.次级通道见于烟囱侧翼或下部,形态复杂狭小(直径多为厘米级以下),伴随通道周围黄铁矿重结晶.圆丘状烟囱外壳较厚,内部通道复杂多变,与低速渗流堆积作用相关.锥状烟囱内充填闪锌矿,与高温流体交代相关.从锥状和柱状烟囱向圆丘状烟囱,烟囱集束喷发逐渐减弱,而表面沉淀作用增强.

表1 河北兴隆高板河硫铁矿黑烟囱类型及其地质特征

| | 锥状烟囱 | 柱状烟囱 | 圆丘状烟囱 | 尖顶状烟囱 |
|--------|----------------------------------|---------------------------|--|----------------------------|
| 形态特征 | 为直立圆锥形,孤立或聚合出现.烟囱间堆积喷溢的硫化物颗粒. | 以单个柱体出现,向下直径增大、角砾增多. | 多为等轴状圆丘、钝锥形到矮柱状,常见复合形态.向下为块状硫化物,交代增强. | 多孤立出现,顶部被沉积纹层埋藏超覆. |
| 高度/直径比 | 高度/底部直径比约1. | 高度/直径比>3. | 高度/直径比<1. | 高度/直径比<6. |
| 喷口构造 | 顶部保留狭小喷口. | 顶部喷口敞开. | 表面低洼有处缝隙,无明显喷口.顶部有时保留喷孔及其放射状纹理. | 顶部保留喷孔. |
| 内部结构构造 | 外壁为多孔状黄铁矿,内部分带性明显,轴向通道发育,并充填闪锌矿. | 外壁为胶状黄铁矿,轴向通道发育,核部由黄铁矿组成. | 外壁主要为胶状黄铁矿,内部结构复杂,通道为同心圈、放射状孔隙或者不规则狭缝.核部由黄铁矿组成,侧向通道发育. | 外壁为铅锌矿,轴向通道狭窄,核部充填黄铁矿和方铅矿. |
| 主要成分 | 黄铁矿、闪锌矿、白云石、方解石、硅质. | 黄铁矿、白云石、方解石、硅质. | 黄铁矿、白云石、方解石、硅质,少见铅锌矿. | 闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、白云石、方解石、硅质. |
| 形成方式 | 集束喷溢,内部交代重结晶. | 集束喷溢,内部交代重结晶. | 弥散喷溢,由内向外生长,内壁破裂溶蚀,并重结晶. | 集束喷溢,发育于角砾基础上,生长缓慢. |

烟囱形态差异反映其生长方式的变化,锥状和柱状烟囱以集束喷溢纵向生长为主,而圆丘状烟囱以横向生长为主.另外,烟囱喷口构造的差异使含矿热水喷发高度及其沉淀方式也不同.锥状和柱状烟囱集束喷发热水高度较大,易造成矿物质在海底扩散,因此烟囱(特别是外壁)生长缓慢,不利于原地成矿作用.圆丘状烟囱喷射热水高度低、流速缓慢,喷溢硫化物颗粒局限于喷口周围,有利于烟囱外壳生长,有助于海底表层聚集成矿.上述烟囱之间常存在过渡类型,如圆丘状向锥状烟囱渐变,锥状烟囱向柱状烟囱渐变.一些烟囱外形近圆丘状,但具备锥状烟囱的其他特点(顶部近锥形,发育喷孔及放射状纹理等).不同烟囱类型记录了海底复杂的热热水喷溢方式和成矿热水物理化学演化,这也是矿体上下分带、形成不同结构构造矿石类型的重要原因.

烟囱外壁的形成使热水圈闭于烟囱内部,并保持高温,有利于铅锌硫化物结晶生长.圆丘状烟囱合并或分支现象非常普遍,常见多个圆丘状烟囱聚集成复杂形态,或一个烟囱由多个次级烟囱组成,硫化物通道显示多孔或韵律构造,指示含矿热水发生脉动式喷溢或物理化学性质变化.烟囱分带性与从外壁向通道中央含矿热水温度逐渐增加以及氧化还原条件梯度变化相关^[3].本区各种烟囱总体显示的结晶顺序依次为白铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、碳酸盐-硅质等.随着烟囱热水活动减弱,通道及孔隙最终被碳酸盐-硅质成分充填.

现代海底观察表明,随着热水活动减弱和停止,海底黑烟囱将不断溶解和坍塌,形成硫化物角砾堆积.黑烟囱形成后在海底存在的寿命仅有几千-几万年,仅是成矿过程短暂的地质现象^[6].为此,地史时期的块状硫化物黑烟囱,特别是大尺度黑烟囱难以保留下来.高板河古海底黑烟囱主要为几厘米至几十厘米的尺度(直径、高度),对应于现代海底烟囱中小尺度烟囱及其顶端喷口,这也是世界其他地区(日本、乌拉尔、英国等)块状硫化物保留的古海底黑烟囱的共同特点(图1)^[28,29,33,36,45].从尺度对比上看,高板河地区保留了已知最大尺度的古海底黑烟囱.黑烟囱生长缓慢、尺度较小,以及大陆基底是本区广泛保留不同规模烟囱及其丰富类型的重要原因,造成其生长间隙和停止喷发后被沉积物迅速埋藏保存.本区烟囱规模小,圆丘状烟囱较发育,还与大陆裂谷环境热水运移速率和地温梯度较低有关,对现代大陆裂谷(东非、贝加尔、冲绳海槽)热水活动观察支持也上述认识^[13,15].

5 讨论与结论

在对现代海底活动黑烟囱(录像、图片资料、烟囱样品)研究对比基础上^[43],提出海底活动黑烟囱(喷口)具有柱状、锥状、圆丘状、蜂巢状、分支状、不规则复合状等形态.对大量现代海底黑烟囱样品及其图片分析后发现,海底黑烟囱及其下伏丘体高度大小从数厘米到60m以上,但烟囱顶部的热水喷口直径及其高度多为数厘米至20cm.海底黑

烟囱常座落于已垮塌的硫化物角砾丘体上. 本区发现的烟囱构造主要对应于上述硫化物丘体顶部的喷口构造, 尽管下伏丘体也很发育, 并且保留完好.

本区烟囱形态及其组成与爱尔兰、乌拉尔等地发现的古海底硫化物黑烟囱非常类似(图1)^[29,30,45], 并且保留更大尺度和完整的烟囱构造形态. 它们显示多种形态类型、内部结构构造保存完好, 具有特征的喷口、喷孔、矿物分带及通道构造, 证实前人提出的高板河硫铁矿为海底喷流成因的认识^[37-39], 为深入研究海底喷流成矿过程提供了新线索.

本区硫化物烟囱常保留上覆沉积纹层, 形成于海水与海底交界处. 黑烟囱代表古海底含矿热水的喷出构造. 柱状、锥状烟囱常保留喷口、喷孔构造、陡立外壁、通道直立, 表明成矿热水集束喷发. 圆丘状烟囱喷口不明显, 形态圆钝, 外壁较厚、内部结晶程度较低、涉及密集微细孔缝渗流, 热水喷

流速率及温度较低.

矿床顶板广泛出现瘤状灰岩、含锰页岩、富有机质黑页岩以及矿体显示丰富的同生构造变形, 表明黑烟囱形成于地堑深水凹陷^[42]. 高板河黑烟囱群的发现提供了大陆裂谷深水盆地喷流成矿的直接证据, 类似的现代热水成矿曾在红海、希腊、冲绳海槽、东非及贝加尔裂谷有报道^[13-15]. 黑烟囱的形成明显与同生断裂关系密切(图10). 地堑深部岩浆侵位、大红峪组火山活动或裂谷地壳高地热温梯度均有利于海水发生热循环. 与现代大洋底黑烟囱相比, 本区保留的古黑烟囱规模较小, 烟囱通道内部成分异性较差, 少见黄铜矿等高温硫化物, 并且广泛出现渗流为主的圆丘状烟囱. 上述特征表明大陆裂谷内成矿热水温度较低^[11], 成矿热水运移速率较小.

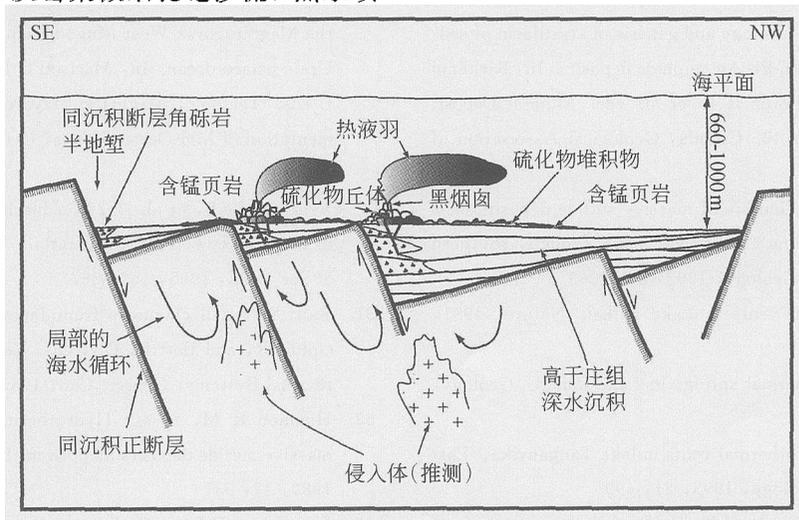


图10 兴隆中元古代黑烟囱及其块状硫化物形成的区域构造模式

围绕上述典型烟囱类型, 开展其结构构造、矿物组成和同位素地球化学的深入研究, 将提供大陆地堑早期热水喷流成矿过程的新认识. 另外, 围绕古海底黑烟囱微生物化石的鉴别和对比研究, 可能认识前寒武纪极端环境下生命活动及其演化.

致谢 感谢陈晶、石井辉秋、陈永顺、顾连兴、蒋少涌、周怀阳、曾志刚、肖湘、姚锦仙、赖勇、夏学惠、P. A. Rona, A. Polat, M. J. Russell等教授以及金翔龙院士在论文写作过程中给予

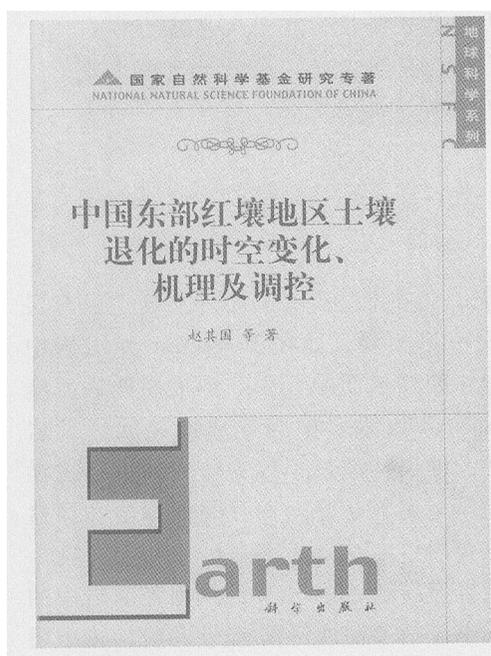
的帮助和指教. 参加野外工作的还有陈征、任昊佳、郑金武、陈变珍、李翔宇等.

参 考 文 献

- 1 Hekinian R, et al. Sulfide deposits from the East Pacific Rise Near 21°N. *Science*, 1980, 207: 1433
- 2 RISE Project Group. East Pacific Rise: Hot springs and geophysical experiments. *Science*, 1980, 207: 1421
- 3 Rona P A, et al. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New perspectives, preface. *Econ Geol*, 1993, 88: 1935
- 4 Scott S. Minerals on land, minearals in sea. *Geotimes*, 2002,

- 47: 1
- 5 Fouquet Y, et al. Hydrothermal activity in the Lau back-arc basin; Sulfides and water chemistry. *Geology*, 1991, 19: 303
 - 6 Fouquet Y, et al. Metallogenesis in back-arc environments: The Lau basin example. *Economic Geology*, 1993, 88: 2154
 - 7 Fouquet Y. Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans? In: Cann J R, Elderfield H and Laughton A, eds. *Mid-Ocean Ridges, Dynamics of Processes Associated with Creation of New Ocean Crust*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 211
 - 8 Halbach P, et al. Formation and decay of a modern massive sulfide deposit in the Indian Ocean. *Mineralium Deposita*, 1998, 33: 302
 - 9 Halbach P, et al. Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa trough, Japan. *Economic Geology*, 1993, 88: 2210
 - 10 Bendel V, et al. The White Lady hydrothermal field, North Fiji back-arc basin, Southwest Pacific. *Economic Geology*, 1993, 88: 2237
 - 11 Goodfellow W D, et al. Geology and genesis of stratiform of sediment-hosted(SEDEX) Zn-Pb-Ag sulphide deposits. In: Kirkham R V, Sinclair W D, Thorpe R I, et al. eds. *Mineral Deposit Modeling, Special Paper 40*. Canada: Geological Association of Canada, 1993, 201
 - 12 Zierenberg R A, et al. Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda ridge. *Economic Geology*, 1993, 88: 2069
 - 13 Crane K. Hydrothermal vents in Lake Baikal. *Nature*, 1991, 350: 281
 - 14 Shanks W C, et al. Thermal springs in Lake Baikal. *Geology*, 1992, 20: 495
 - 15 Tiercelin J, et al. Hydrothermal vents in lake Tanganyika, East African rift system. *Geology*, 1993, 21: 499
 - 16 Haymon R M, et al. Fossils of Hydrothermal vent worms from Cretaceous sulfide ores of the Samail Ophiolite, Oman. *Science*, 1984, 223: 1407
 - 17 Farmer J D. Hydrothermal systems; Doorways to early biosphere evolution, *GSA Today*, 2000, 10: 1
 - 18 Davies P. The origin of life I; When and where did it begin? *Scientific Progress*, 2001, 84: 1
 - 19 Nisbet E G. Archean ecology: A review of evidence for the early development of bacterial biomes, and speculations on the development of a global-scale biosphere. In: Coward M P, and Ries A C eds. *Early Precambrian Processes*, *Geol Soc Spec Publ*, 1995, 95: 26
 - 20 Russell M J, et al. The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and PH front. *Journal of Geological Society, London*, 1997, 154: 377
 - 21 张 响. 生物进化. 北京: 北京大学出版社, 1998, 41—86
 - 22 Jannasch H W, et al. Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. *Science*, 1985, 251: 717
 - 23 Jannasch H W. The chemosynthetic support of life and the microbial diversity at deep-sea hydrothermal vents. *Proc R Soc Lond B*, 1985, 225: 277
 - 24 Cook T L, et al. Biogological mineralization in deep-sea hydrothermal deposits. *Science*, 1995, 267: 1975
 - 25 Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3235 Ma old volcanogenic massive sulfide deposit. *Nature*, 2000, 405: 676
 - 26 Russell M J. The generation at hot springs of sedimentary ore deposits, microbialites and life. *Ore Geology Reviews*, 1996, 10: 199
 - 27 冯 军, 等. 黑烟囱与生命起源初探. *北京大学学报(理科版)*, 2004, 40(2): 318
 - 28 Larter R C L, et al. Hydrothermal pyrite chimneys from the Ballynoe Baryte Deposit, Silvermines, county Tipperary, Ireland. *Mineral Deposita*, 1981, 16: 309
 - 29 Zaykov V V, et al. Hydrothermal activity and segmentation in the Magnitogorsk-West Mugodjarian zone on the margins of the Urals palaeo-ocean. In: Macleod C J, Tyler P A, and Walker C L eds. *Tectonic, Magmatic, Hydrothermal and Biological Segmentation of Mid-Ocean Ridges*, *Geol Soc Spec Publ* 1996, 118: 199
 - 30 Vearncombe S, et al. 3.26 Ga black smoker-type mineralization in the Strelley belt, Pilbara craton, Western Australia, *Jour Geol Soc Lond*, 1995, 152: 587
 - 31 Scott S. Small chimneys from Japaneous Kuroko deposits. In: Goldie R, and Bottrill T J, eds. *Seminars on Sea-floor Hydrothermal Systems*, *Geosci, Can*, 1981, 8: 103
 - 32 Haymon R M, et al. Hydrothermal discharge zones beneath massive sulfide deposits mapped in the Oman ophiolite. *Geology*, 1989, 17: 531
 - 33 Herrington R J, et al. Ancient vent chimney structures in the Silurian massive sulphides of the Urals. In: Mills R A, and Harrison K, eds. *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record*. London: Geological Society, London, Special Publications, 1998, 148: 241
 - 34 Little C T S, et al. Late Cretaceous hydrothermal vent communities from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology* 1999, 27: 1027
 - 35 Little C T S, et al. The fossil record of hydrothermal vent communities. In: Mills R A, and Harrison K, eds. *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record*. London: Geol. Soc. Lond. Spec. Publ., 1998, 148: 259
 - 36 李江海, 等. 华北中元古代硫化物黑烟囱发现的初步报道. *岩石学报*, 2003, 19(1): 167
 - 37 冯钟燕, 等. 冀东兴隆一带层状黄铁矿-铅锌矿的地质特征及其

- 成因. 矿床地质, 1985, 4(3): 1—6
- 38 白瑾, 等. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用. 北京: 地质出版社, 1993, 40—110
- 39 夏学惠, 等. 冀东地区元古宙多金属硫铁矿矿床地质及其成矿作用. 化工矿产地质, 1999, 21(3): 129
- 40 和政军, 等. 燕山中元古代裂谷早期同沉积断裂活动及其对事件沉积的影响. 古地理学报, 2000, 2(3): 83
- 41 Kusky T, et al. Paleoproterozoic tectonic evolution of the north China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22(4): 383
- 42 段吉业, 等. 华北燕山裂陷槽中元古代的深水沉积. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(1): 7
- 43 李江海, 等. 海底黑烟囱的识别及其科学意义. 地球科学进展, 2004, 19(1): 17
- 44 侯增谦, 等. 西太平洋冲绳海槽烟囱硫化物矿床矿石化学特征与分带型式. 地球学报, 1997, 18(2): 171
- 45 Boyce A J, et al. Formation of fossil hydrothermal chimneys and mounds from Silvermines, Ireland. Nature, 1983, 306: 545



国家自然科学基金研究专著

《中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控》

赵其国 等著

科学出版社 定价: 58.00 元

本书系作者采用遥感和地理信息系统技术与传统分析方法相结合, 获得大量翔实资料而撰写的科学专著. 共分三篇, 第一篇介绍东部地区红壤退化的时空变化, 叙述了东南丘陵区、典型区域土壤侵蚀的时空变化; 红壤的肥力、酸度、污染的时空演变及其预测. 第二篇论述东部红壤区土壤退化机理. 叙述红壤旱地水土流失规律, 土壤侵蚀退化的演替特征; 红壤肥力退化、酸化、污染退化及生物学退化机理. 第三篇阐明东部红壤区土壤退化的调控. 阐述退化红壤的恢复治理模式和措施体系; 防治土壤酸化和污染的调控对策以及区域治理的调控对策. 书后附有彩照.

本书可供从事农业、土壤、生态学科学工作者及有关院校师生参考.