

文章编号:1000-0550(2017)03-0480-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.006

遗迹化石 *Rhizocorallium* 中莓状黄铁矿对古环境古生态的指示——以豫西南上泥盆统为例

赵翌¹,张立军^{1,2}

1.河南理工大学资源环境学院,河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室,河南焦作 454003

2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南焦作 454003

摘要 豫西南浙川上泥盆统王冠组地层中发育大量与层面平行且具有蹼纹的U形遗迹化石 *Rhizocorallium*。利用环境扫描电镜对 *Rhizocorallium* 进行微观观察,发现在其边缘管和蹼纹内部发育大量不同形态的莓状黄铁矿及莓状铁氧化物(单晶为五角十二面体,八面体,立方体和近球形),与之对应的围岩中仅见少量黄铁矿单晶颗粒。表面具有覆盖膜的莓状黄铁矿大多存在于潜穴内部,其中边缘管中莓状黄铁矿的单晶直径(0.672~1.603 μm,平均直径1.063 μm)较之蹼纹中部的(0.376~0.877 μm,平均直径0.5 μm)的大。上述特征显示出潜穴中莓状黄铁矿的存在可能与硫酸盐类还原菌有关。*Rhizocorallium* 边缘管和蹼纹中高丰度莓状黄铁矿的发现表明:遗迹化石 *Rhizocorallium* 可能是造迹者精心构筑的觅食—花园。由于食物供应和氧化还原条件的不同,*Rhizocorallium* 造迹者在其潜穴内部培植不同的微生物,形成一个互利共生的群落。

关键词 遗迹化石;*Rhizocorallium*;晚泥盆世;莓状黄铁矿;沉积微环境

第一作者简介 赵翌,女,1989年出生,硕士研究生,遗迹学与地球生物学,E-mail: zzhaohp@126.com

通讯作者 张立军,男,副教授,E-mail: Ljzhanghp@gmail.com

中图分类号 P52 **文献标识码** A

0 引言

具有蹼纹的U形潜穴根珊瑚迹(*Rhizocorallium*)是显生宙海相地层中常见的遗迹化石之一,自寒武纪出现一直延续至今^[1],受到遗迹学者的广泛关注。Zenker^[2]首次提出模式种 *Rhizocorallium jenense*,之后的研究者根据其不同的形态特征与底质条件先后命名了多个遗迹种,如 *R. irregulare*, *R. uliarensis*, *Ilmenichns multilobatus*^[3-4]。Knaust^[1]根据外观形貌、潜穴移动方向、边缘管抓痕、潜穴保存的底质条件、潜穴充填物对其进行了详细的属种划分,将 *Rhizocorallium* 遗迹属划分成了 *R. jenense* 和 *R. commune* 两个遗迹种。详实的分类学研究为 *Rhizocorallium* 后期的形态功能分析奠定了基础。

Rhizocorallium 作为良好的沉积环境指示者,对水动能、底质条件、流体力学以及有机质埋藏分析具有重要的指示意义^[1]。Knaust^[5]将 *R. commune* 分属于 *Cruziana* 遗迹相^[1],代表浅海沉积环境。随着研究的

深入,在河湖、滨海、陆棚及深海环境中,都发现有 *R. commune* 的出现^[6],但深海 *R. commune* 的形态特征有异于浅海的类型^[7]。前人研究指出 *Rhizocorallium* 主要为沉积觅食迹^[1],基于潜穴内部及围岩中不同类型的微生物矿物,四川北川甘溪剖面上泥盆统弗拉斯阶的 *Rhizocorallium* 被认为是沉积物觅食和微生物花园模式共同的产物^[8],仍缺少更精确、更详细的微观研究佐证上述研究模式。

以河南南阳浙川上泥盆统弗拉斯阶王冠沟组内发育的遗迹化石 *Rhizocorallium* 为研究的对象,利用地球微生物的形貌—结构与遗迹宏观特征相结合的研究方法,揭示了 *Rhizocorallium* 潜穴中超微结构特征,为深刻认识 *Rhizocorallium* 的环境分布、形态功能和宏体造迹生物与微生物之间的关系提供新认识和新资料。

1 材料及方法

豫西南上泥盆统浙川剖面位于秦岭—龙门山地

收稿日期:2016-03-31;收修改稿日期:2016-07-07

基金项目 国家自然科学基金项目(41602112,41290260);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20134116120002);中国科学院资源地质学与古地理学重点实验室开放基金(2015KF05);河南理工大学青年骨干教师计划(672105/195);河南理工大学博士基金项目(B2013-77) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41602112,41290260; Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No.20134116120002; The Open Fund of Key Laboratory of Economic Stratigraphy and Palaeogeography, No. 2015KF05; The Youth Backbone Plan of Henan Polytechnic University, No.672105/195; The Doctor Foundation of Henan Polytechnic University, No. B2013-77]

层分区,南秦岭小区。剖面位于南阳市淅川县境内,坐标为 33°1'7"N, 111°31'30"E。研究区域地层出露良好,层序清楚,主要为中一晚泥盆世地层,自下而上共分为白山沟组,王冠沟组,葫芦山组和永青山组,整体厚度约 930 m(图 1)。区域内自下而上已经建立了三个化石生物组合带,即 *Penekiella-Donia* 组合带; *Yunanella* 顶峰带和 *Sublepidodendron mirabile-Lepidodendropsis himeri* 组合带^[9]。自中泥盆世开始,南秦岭的陡列岛北缘生成南湾海槽,在淅川陆棚上,由华南海北泛的海水自中泥盆世晚期到达淅川,因此区域内大多数为华南区生物群^[10]。

王冠沟组主要由浅水陆棚背景下的生物碎屑灰岩与细砂岩组成,含丰富的实体化石,如珊瑚、层孔

虫、腕足、苔藓虫,以及遗迹化石。王冠沟组下部为含同生砾岩的泥灰岩和细砂岩、页岩互层;中部为生物礁灰岩,上部是含砂屑生物碎屑灰岩及泥灰岩,夹钙质长石砂岩及两层礁灰岩;该组与下部白山沟组和上部的葫芦山组均呈整合接触。区域上,豫西南王冠沟组与陕南冷水河组、甘肃擦阔合组、贵州的望城坡组可以大致的对比^[9],属于上泥盆统弗拉斯阶地层。本文所描述的遗迹化石 *Rhizocorallium* 产出层位为上泥盆统弗拉斯阶王冠沟组下部的泥灰岩层中,位于 *Penekiella-Donia* 生物组合带的下部。王冠沟组下部的灰岩中在 *Rhizocorallium* 密集发育层中,未见实体化石。

将采集的 *Rhizocorallium* 标本磨制成岩石光面、

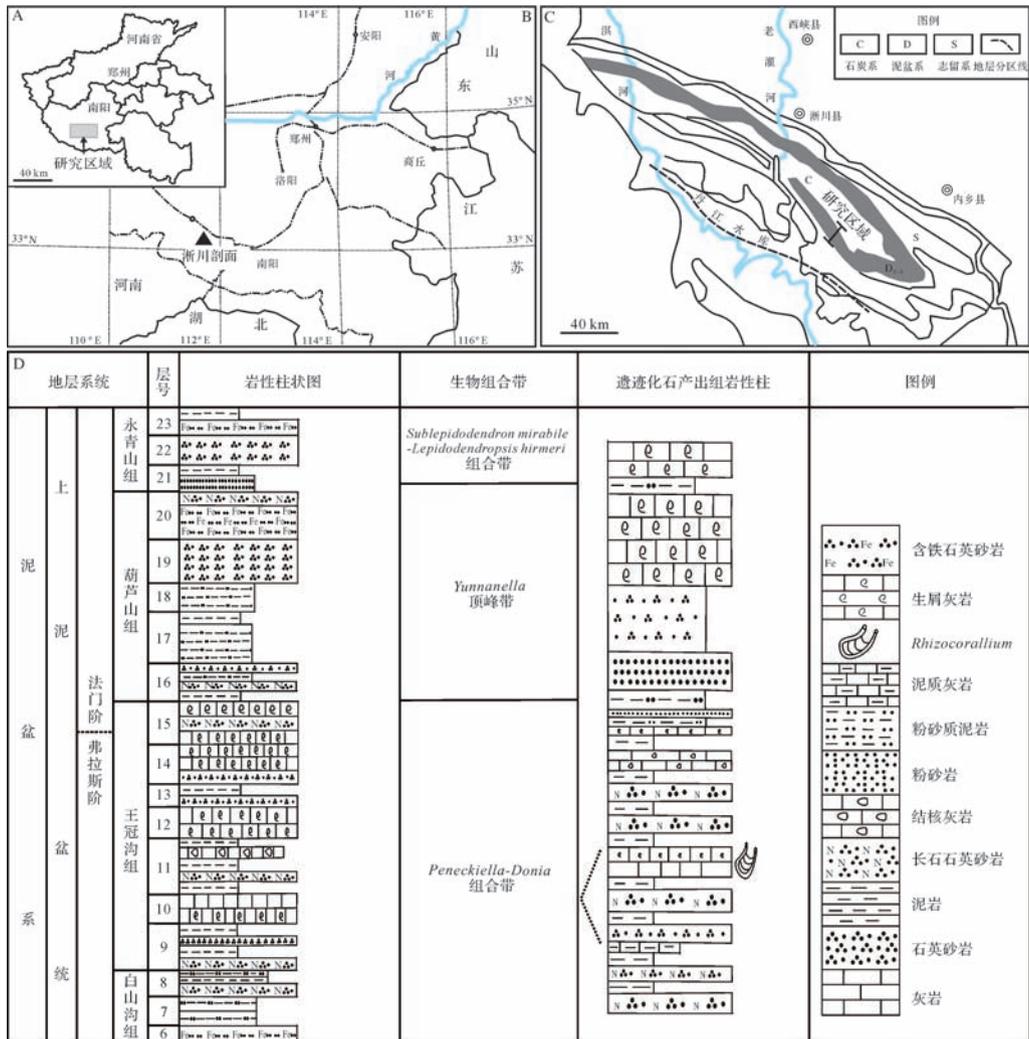


图 1 豫西南淅川泥盆纪剖面交通位置图、区域地质图及岩性柱状图

A, B. 豫西南淅川泥盆纪剖面交通位置图; C. 研究区地质简图(据闫国顺等, 1994 修改); D. 研究区地层柱状图
Fig.1 Location maps and lithostratigraphy of the Xichuan section in the southwest of Henan Province
A, B. Location of the study section; C Geological map of the study area (modified from Yan, et al., 1994); D. Stratigraphic column of the Upper Devonian and detailed lithostratigraphy with occurrences of *Rhizocorallium*

薄片,对其边缘管和潜穴及围岩进行微区取样,5%的稀醋酸蚀刻5 s,然后用蒸馏水清洗并烘干,用镊子和导电胶将选定的样品固定在高1 cm,直径为1 cm的样品台上喷金约40 s之后,在环境扫描电子显微镜下进行观察。上述分析测试均在河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室利用环境扫描电镜(ESEM, FEI Quanta 250 FEG)和布鲁克能谱仪(EDS, Bruker Quantax 200 XFlash 6130)完成。

2 结果

2.1 遗迹化石 *Rhizocorallium* 的宏观形态特征

研究区域内的遗迹化石 *Rhizocorallium* 主要形态为具有蹼纹的U形潜穴(图2)。潜穴主要保存于上层,与层面近于平行,边缘管无分支,两侧边缘管之间发育有蹼纹,整体长度一般为4~7 cm。边缘管横切面呈半圆形,偶在始端向外侧弯曲(图2D),其两侧的最大间距为2~3 cm。表面未见抓痕。粪球粒化石偶尔存在于一些遗迹潜穴中(图2C)。由于后期风化作用的影响,一些遗迹潜穴中发育的蹼纹没有明显的分界(图2B),有的蹼纹甚至被风化剥蚀掉。根据潜穴形态、底质类型等特征认为豫西南浙川上泥盆统王冠沟组的遗迹化石 *Rhizocorallium* 应为 *R. commune*

遗迹种。

2.2 遗迹潜穴内部超微形态特征

对遗迹化石 *Rhizocorallium* 的边缘管和蹼纹进行环境扫描电镜下微观形貌观察,发现有4种莓状黄铁矿或莓状铁氧化物 IFR1-IFR4(图3、表1)。IFR1 单晶颗粒为五角十二面体的聚合体,其单晶平均直径(d)为1.063 μm ,主要出现在边缘管的内部(图3A); IFR2 单晶颗粒呈八面体的聚合体, (d)为1.19 μm ,主要出现在蹼纹及边缘管内部(图3C); IFR3 单晶颗粒为近球形的聚合体, (d)为0.5 μm ,主要出现在蹼纹中部(图3D); IFR4 单晶颗粒呈四面体的聚合体, (d)为0.59 μm ,主要出现在蹼纹中,同时围岩中也发现有少数的单晶颗粒(图4C)。总体来讲,四种不同晶形的黄铁矿颗粒聚合物形态大体为莓状聚集体和具有覆盖膜的球形聚合体(图3)。潜穴边缘管中常见的黄铁矿聚合体直径和单晶直径(D/d)的比值约为6.1,蹼纹中 D/d 的比值约为5.75(表1)。潜穴周边的围岩中大多数为针状和簇状的铁的氧化物(图5F)。对边缘管和蹼纹中发现的 IFR 运用 Bruker 能谱仪进行元素分析后,发现其化学成分主要为 Fe, O, S, Ga, Si 等(图3E, F)。一些表面有覆盖膜和单晶形态不规则的莓状黄铁矿元素组成中的S元素的相对

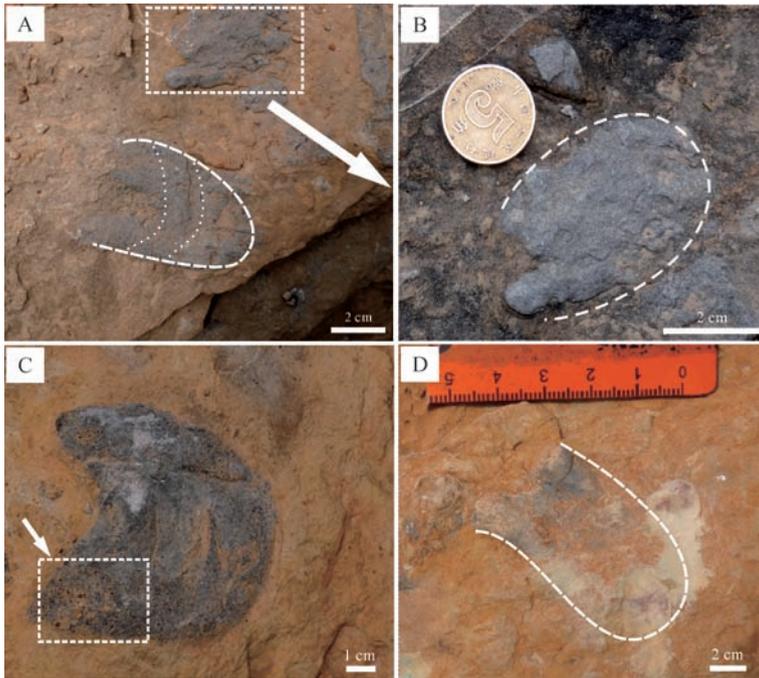


图2 豫西南浙川上泥盆统王冠沟组内发育的 *Rhizocorallium commune*

A. 与层面平行 U 形潜穴; B. 后期风化剥蚀后的 U 形潜穴, 潜纹不可见; C. 潜穴边缘管内可见粪球粒(白色箭头); D. 与层面斜交至逐渐平行的 U 形潜穴。

Fig.2 *Rhizocorallium commune* in the Upper Devonian Wangguangou Formation of the Xichuan section, southwest Henan province

A. The U-shape burrow with parallel to the bedding surface; B. The U-shape burrow after weathering; C. Faecal pellets accumulated in the marginal tube and spreite of *Rhizocorallium*; D. The U-shape burrow with oblique to the bedding surface.

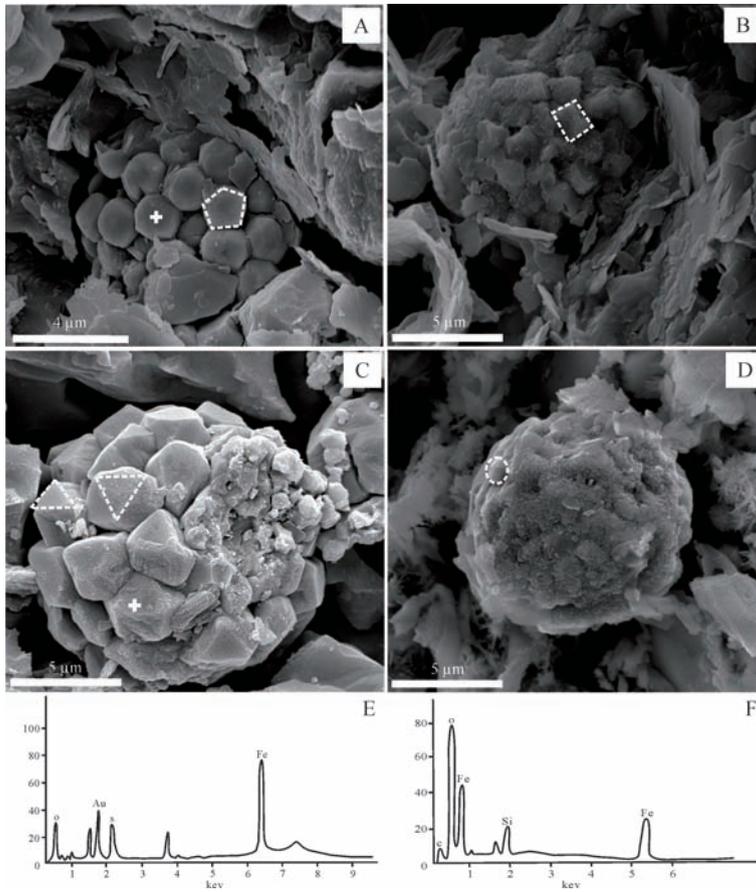


图3 *Rhizocorallium* 潜穴内部莓状黄铁矿形态及EDS能谱元素分析图

A. 单晶为五角十二面体的莓状黄铁矿; B. 单晶为立方体的莓状黄铁矿; C. 单晶为八面体的莓状黄铁矿; D. 单晶颗粒呈球形的莓状黄铁矿; E. 为 A 中白色十字处的 EDS 能谱图; F. 为 C 白色十字处的 EDS 能谱图。

Fig.3 Scanning electron microscope (SEM) image and EDS analysis of pyrite framboids within the *Rhizocorallium* spreite and marginal tube
A. Pyritohedral submicron crystals of pyrite framboids; B. Cube crystal submicron crystal of pyrite framboids; C. Octahedron submicron crystal of pyrite framboids; D. Nearly spherical submicron crystal of pyrite framboids; E. The energy dispersive X-ray spectrum of an individual submicron crystal in A; F. The energy dispersive X-ray spectrum of an individual crystal in C.

表 1 浙川泥盆统王冠沟组 *Rhizocorallium* 潜穴中几种不同形态莓状黄铁矿的对比

Table 1 Comparison of the main characteristics of pyrite framboids within *Rhizocorallium* burrow from the Upper Devonian Wanguangou Formation in the Xichuan section

莓状黄铁矿		莓状黄铁矿中的单晶				莓状聚集体直径		
类型	位置	形态	平均直径 <i>D</i> /μm	形态	平均直径 <i>d</i> /μm	表面特征	丰度	/单晶直径 /(<i>D</i> / <i>d</i>)
IFR1	边缘管	莓状聚集体	6.48	五角十二面体	1.063	表面光滑,个别出现分裂	高	6.1
IFR2	蹼纹及边缘管	莓状及不规则聚集体	6.78	八面体	1.19	单晶表面较为粗糙	适中	5.7
IFR3	蹼纹	不规则形态聚集体	3.34	近球形	0.5	单晶表面有覆盖膜	适中	6.7
IFR4	蹼纹,围岩中少数单晶颗粒	莓状及不规则形态聚集体	3.04	四面体	0.59	单晶表面光滑	较低	5.15

含量远远高于晶体表面光滑的莓状黄铁矿。

3 讨论

3.1 潜穴中莓状黄铁矿的成因

莓状黄铁矿是由等粒度的亚微米级黄铁矿晶

体或微晶体紧密堆积而成的,形似草莓的黄铁矿球形集合体^[11],直径一般为几微米到几十微米。它的形成环境非常广泛,从陆相到海相,从碳酸盐岩到硅质岩碎屑岩甚至火成岩中都有其出现^[12-13]。莓状黄铁矿一般先在缺氧条件下形成铁的单硫化物微晶体,然

后在有单质硫或其他部分氧化态硫组分存在的条件下转化为胶黄铁矿,最后在部分氧化态硫组分的条件下转化为莓状黄铁矿^[14]。由于不同的微生物及沉积环境等因素,其呈现出不同的微晶形态。

Rhizocorallium 边缘管中发育的为单晶呈五角十二面体的莓状黄铁矿(图5B),靠近边缘管的蹼纹中单晶为球形的黄铁矿聚合物(图5C),蹼纹中间位置出现了单晶为八面体以及形态不规则的黄铁矿聚合物(图5D)。围岩中缺少潜穴中常见的莓状黄铁矿聚合物,通常是针状或球状的氧化铁矿物以及少数单晶黄铁矿(图5E,F)。与此同时,边缘管内出现的莓状黄铁矿单晶颗粒相对较大,且莓状聚合体的表面相对光滑;随着向蹼纹内侧的过渡,其单晶颗粒开始逐渐的缩小,出现球形聚合物和一些不规则的单晶堆积,单晶颗粒主要呈八面体(图4B),且聚合体的表面存在一些覆盖膜(图5)。能谱仪分析结果显示,一些处于边缘管内部且单晶表面相对光滑的聚合物主要元素为Fe、O等,S元素含量相对降低,有的甚至为缺少S元素的铁氧化物,这些莓状铁氧化物的形成可能是后期成岩过程中氧化或交代了早期莓状黄铁矿,使部分S元素被置换掉的结果^[15]。蹼纹中出现的颗粒较小且不规则形态的莓状黄铁矿中S元素相对含量较之比边缘管中增高,这反映出相对封闭的蹼纹中氧含量相对边缘管要低一些。

目前认为莓状黄铁矿的成因主要有生物成因和非生物成因两种不同的类型^[16]。非生物成因的莓状黄铁矿与生物成因的莓状黄铁矿在形态上差别不大,其主要的区别在于生物成因的莓状黄铁矿莓体直径(D)和单晶直径(d)变化范围较小,且 D/d 的比值大多数小于10,莓状聚合物表层会出现覆盖膜;相反,非生物成因的莓状晶体表面相对光滑,且单晶颗粒相对较大, D/d 的比值大多数大于10^[15,17-18]。对浙川剖面*Rhizocorallium*边缘管及蹼纹中所出现的莓状黄铁矿进行统计,发现其 D/d 均小于10,单晶颗粒的平均直径为1 μm ,同时出现在蹼纹中的莓状黄铁矿表面大多具有覆盖膜。根据以上特征推测,研究区域内*Rhizocorallium*潜穴中出现不同类型的莓状黄铁矿可能为微生物诱导的生物成因类型黄铁矿。

莓状黄铁矿形态上的差别除了受到成因的影响外,不同的沉积环境对其晶形的变化也起着不可替代的作用^[15]。单晶颗粒大小的不同可为沉积环境条件及稳定性提供一定的指示意义,一般认为单晶粒径在2.7~3.22 μm 的莓状黄铁矿为缺氧条件下形成,随着含氧量的不断升高,莓状黄铁矿的单晶颗粒开始逐渐的变大^[19]。*Rhizocorallium*潜穴中发育的黄铁矿单晶颗粒平均粒径在1 μm 左右。同时,莓状黄铁矿的单晶颗粒自边缘管向蹼纹逐渐变小的趋势(图5),指示出遗迹化石*Rhizocorallium*潜穴中不同位置局部氧含

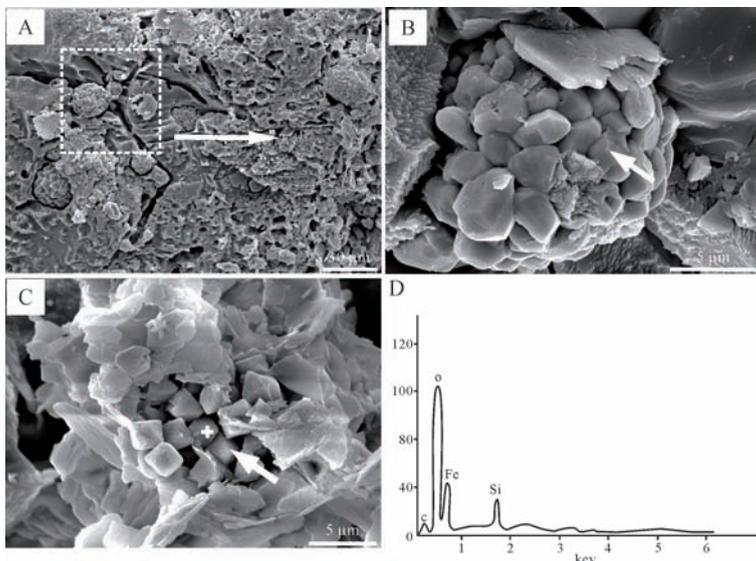


图4 *Rhizocorallium* 潜穴与围岩中的莓状黄铁矿

A. *Rhizocorallium* 潜穴中聚集的莓状黄铁矿; B. 为 A 中箭头指示的莓状黄铁矿放大图; C. 围岩中出现的近立方体黄铁矿单晶颗粒; D. 为 C 中白色十字处的 EDS 元素含量图

Fig.4 Pyrite framboids occur in the *Rhizocorallium* burrow and the surrounding rock

A. Pyrite framboids in the *Rhizocorallium* burrow; B. Close-up view of A; C. Cube crystal in outside rock; D. The energy dispersive X-ray spectrum in C

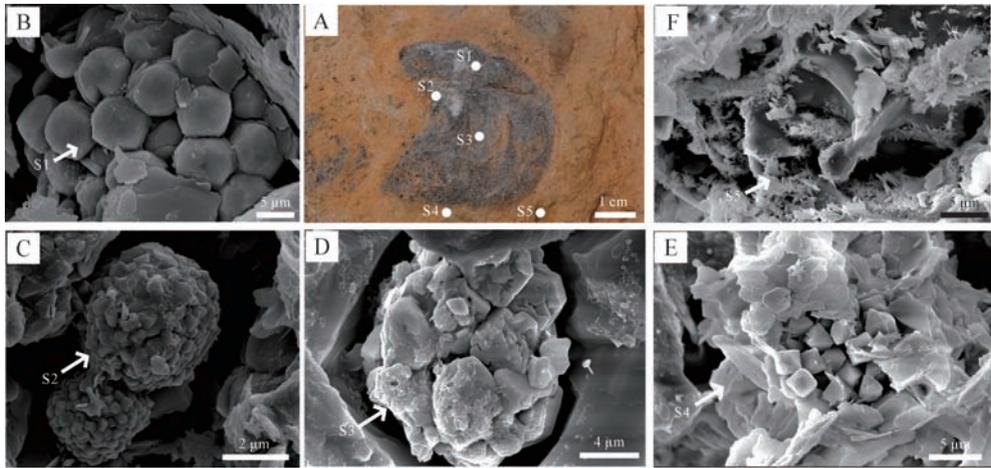


图5 *Rhizocorallium* 潜穴中不同区域的莓状黄铁矿形态示意图

A. *Rhizocorallium* 野外照片; B. 边缘管中单晶颗粒呈五角十二面体的莓状黄铁矿; C, D. 蹼纹中不同形态(近球形及不规则形态)的莓状黄铁矿; E, F. 围岩中不同形态的矿物

Fig.5 Sketch diagram showing the different morphologies of pyrite framboids in different areas of the *Rhizocorallium* burrow

A. Field photographs of *Rhizocorallium*; B. Pyritohedral submicron crystals of pyrite framboids in marginal tube; C, D. Different pyrite framboids in the spreite; E, F. Different minerals in outside rock

量的变化过程,即自边缘管向蹼纹内部的过渡中,氧含量逐渐递减。这与造迹生物对潜穴微区环境的改造也有一定的联系。造迹生物通常通过边缘管与沉积物水界面进行运移,而后在蹼纹中进行觅食等活动,因此与流通性较好的边缘管相比,较封闭的蹼纹内部微环境随着造迹生物的活动导致氧含量进一步降低,从而为硫酸盐还原菌的活动提供了良好的场所,致使蹼纹内部形成的莓状黄铁矿单晶颗粒相对于边缘管中要小。

3.2 古生态与古环境的指示意义

R. commune 自早寒武世出现至新生代,在全球范围内都有广泛的分布^[7]。其遗迹个体在整个古生代的早期都相对较小,至晚古生代潜穴的尺寸才有所增加^[1, 20-21]。

遗迹种 *R. commune* 长久以来一直被作为浅水沉积环境的指示者^[22-23],属于 *Cruziana* 遗迹相,通常指示稳定低能的浅水沉积环境。随着研究的深入,研究者发现其从寒武纪出现至今,潜穴形态上的一些变化反应出了不同的沉积环境信息^[7]。边缘管相对较直,与层面有一定夹角的潜穴多出现在潮间带至潮下带的沉积环境,近舌形的潜穴则多出现在潮下带较深水的沉积区域,同时深海的 *R. commune* 在形态上不同于浅海的 *R. commune* var. *irregularis*^[6]。与此同时,与层面平行的和与层面具有一定夹角的 *Rhizocorallium* 反映出造迹生物对不同沉积环境的适应过程,前者指

示出浅水沉积中造迹模式,后者则反应出较深水沉积的造迹模式^[24]。不同底质条件中所出现的潜穴形态差异反映出造迹生物不同的造迹模式。如具有蹼状构造的 U 形潜穴通常为造迹生物的觅食迹,而缺少蹼纹构造的则多为造迹生物的居住迹^[25]。潜穴内部蹼纹类型反映出沉积环境的差异,通常来说当底层发生快速堆积时, *Rhizocorallium* 造迹生物通常会形成前进式蹼纹;相反当发生侵蚀作用时,则为后退式蹼纹^[26-27]。研究区域内的 *Rhizocorallium* 都为前进式蹼状构造,表明当时沉积区域并未出现大面积的侵蚀作用。

Knaust^[1] 根据 *Rhizocorallium* 遗迹潜穴中发现的与 *Zoophycos* 中相类似的粪球粒化石,认为 *Rhizocorallium* 造迹生物与 *Zoophycos* 之间存在着一定的联系,二者在造迹模式上同样具有一定的相似性。研究者认为 *Zoophycos* 的造迹模式主要有以下几种,食沉积物模式即造迹生物在沉积物内部系统采掘沉积物以获取食物的过程^[28-29];食海底表面碎屑物模式指造迹生物在海底表面进食,在沉积物内部排泄的过程^[30-32];垃圾处理模式是造迹生物在海底表面排泄,在海底以下沉积物中进食^[33];微生物培植园模式和化能共生模式指出造迹生物在可控底质条件下,培养微生物作食物和/或新陈代谢所需的要素的过程^[34-35]等。

研究区域内发育的遗迹化石 *R. commune* 位于王

冠沟组第六层灰岩中,其相邻层位发育有大量的生物礁灰岩,为一种典型的浅水陆棚相沉积环境,代表温暖的浅海环境。区内 *R. commune* 的潜穴管相对较直,潜穴与层面近于平行,未见抓痕,指示出其沉积底质条件为软底底质沉积。*Rhizocorallium* 潜穴中不同形态大小的莓状黄铁矿及莓状铁聚合物,表明 *Rhizocorallium* 的造迹过程中具有微生物的参与,由此推断其潜穴不太可能是一个简单的觅食迹,它很可能是 *Rhizocorallium* 的造迹者精心构筑的多功能花园。*Rhizocorallium* 的造迹生物通过边缘管周期性地从海底表层采集富含有机质的沉积物,同时通过边缘管将自身代谢产物转运出 *Rhizocorallium* 潜穴。造迹者的这种代谢活动对潜穴内部的微环境产生了不同程度的影响,微生物在不同的氧化还原条件合成了不同类型的莓状黄铁矿。通常来说,细菌硫酸盐还原作用,使沉积物中的氧化剂逐渐的被消耗掉,在这种环境下 Fe, H₂S 和单质硫不间断缓慢供给,莓状黄铁矿具有较慢的生长速率和较长的生长时间,从而出现形态大小不一的莓状黄铁矿^[10]。莓状黄铁矿多形成于氧化还原界面附近^[36],而成岩莓状黄铁矿的生长时间决定于沉积速率和沉积物中氧化还原界面与沉积物表面的厚度。研究区内 *Rhizocorallium* 的潜穴位于王冠沟组底部的泥灰岩中,相对于围岩,潜穴内部环境封闭,含氧量相对较低,形成了一定的还原环境。随着向潜穴内部的逐渐过渡,与造迹生物共生的微生物活动引起了潜穴内部微环境的进一步还原,在氧含量更低的环境中与沉积物中的 Fe 元素发生反应形成单晶颗粒较小的莓状黄铁矿,加之后期成岩作用的影响导致了潜穴内部不同区域出现了黄铁矿形态变化。因此, *Rhizocorallium* 的造迹者与微生物(可能为硫酸盐还原菌)共同构成了一个在食物链、氧化还原等方面密切相关的互利共生系统。

与浙川剖面层位中发育的 *Rhizocorallium* 相似,泥盆系甘溪剖面上泥盆统土桥子组 *Rhizocorallium* 潜穴的边缘管和蹼纹内部也同样发育大量的莓状黄铁矿聚合物^[8],且莓状黄铁矿 D/d 值大多小于 10,也反映了类似的现象。豫西南浙川剖面 and 川西北甘溪剖面,晚泥盆世均处于扬子北缘及西北缘,广泛分布的 *Rhizocorallium* 可能与当时的区域稳定的沉积环境具有紧密关系。

4 结论

河南南阳浙川上泥盆统王冠沟组泥质灰岩中发

育的遗迹化石 *Rhizocorallium* 为典型的具有蹼状构造的 U 形潜穴。潜穴边缘管的两翼近于平行,始端未见分支,其间发育有大量蹼纹。边缘管内部存在粪球粒化石。潜穴整体相对较大,属 *R. commune* 遗迹种。

潜穴内部莓状黄铁矿大多表面具有覆盖膜,且单晶颗粒相对较小。莓体直径(D)与单晶直径(d)的比值小于 10,推断潜穴内部的莓状黄铁矿为微生物诱导成因类型。

边缘管和蹼纹不同区域中莓状黄铁矿形态大小差异,反映出潜穴内部微区环境的变化过程。造迹生物的生命活动和与之共生的微生物使原始沉积物中的氧化剂被逐渐还原,造成潜穴内部氧含量下降。靠近中部的蹼纹环境较之边缘管更近封闭,含氧量进一步降低,从而出现从边缘管向蹼纹内部过渡,莓状黄铁矿的单晶颗粒逐渐缩小的趋势。由此推断,遗迹种 *R. commune* 可能是造迹者精心构筑的觅食—花园, *Rhizocorallium* 的造迹者在边缘管和蹼纹中,由于食物供应和氧化还原条件的不同,培植不同的微生物,与其形成一个互利共生的群落。

参考文献 (References)

- [1] Knaust D. The ichnogenus *Rhizocorallium*: classification, trace makers, palaeoenvironments and evolution [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126: 1-47.
- [2] Zenker J C. Historisch-Topographisches Taschenbuch Von Jena Und Seiner Umgebung [M]. Jena, Thuringia: Friedrich Frommann, 1836: 1-338.
- [3] Fürsich F T. Ichnogenus *Rhizocorallium* [J]. *Paläontologische Zeitschrift*, 1974, 48(1/2): 16-28.
- [4] Schlirf M. A new classification concept for U-shaped spreite trace fossils [J]. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie: Abhandlungen*, 2011, 260(1): 33-54.
- [5] Seilacher A. Bathymetry of trace fossils [J]. *Marine Geology*, 1967, 5(5/6): 413-428.
- [6] MacEachern J A, Dashtgard S E, Knaust D, et al. Chapter 6-Sequence stratigraphy [J]. *Developments in Sedimentology*, 2012, 64: 157-194.
- [7] Uchman A. "Shallow water" trace fossils in Paleogene flysch of the southern part of the Magura Nappe, Polish Outer Carpathians [J]. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 1991, 61: 61-75.
- [8] Zhang L J, Knaust D, Zhao Z. Palaeoenvironmental and ecological interpretation of the trace fossil *Rhizocorallium* based on contained iron framoboids (Upper Devonian, South China) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 446: 144-151.
- [9] 闫国顺,席运宏,李进化,等.河南省地层古生物研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2008:1-466. [Yan Guoshun, Xi Yunhong, Li Jinhua, et al. Stratigraphic and paleontological studies of Henan

- province[M]. Henan: The Yellow River Water Conservancy Press, 2008: 1-466.]
- [10] 王建平,裴放. 东秦岭古生代古生物区与古地理变迁[J]. 地质评论,2002,48(6):603-611. [Wang Jianping, Pei Fang. Paleozoic paleobiogeographic provinces and paleogeographic changes in the Eastern Qinling[J]. Geological Review, 2002, 48(6): 603-611.]
- [11] 常华进,储雪蕾. 草莓状黄铁矿与古海洋环境恢复[J]. 地球科学进展,2011,26(5):475-481. [Chang Huajin, Chu Xuelei. Pyrite framboids and palaeo-ocean redox condition reconstruction[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(5): 475-481.]
- [12] Marynowski L, Zatoń M, Karwowski Ł. Early diagenetic conditions during formation of the Callovian (Middle Jurassic) carbonate concretions from Łukow (eastern Poland): evidence from organic geochemistry, pyrite framboid diameters and petrographic study[J]. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie: Abhandlungen, 2008, 247(2): 191-208.
- [13] 常华进,储雪蕾,冯连君,等. 华南老堡组硅质岩中草莓状黄铁矿—埃迪卡拉纪末期深海缺氧的证据[J]. 岩石学报,2009,25(4):1001-1007. [Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. Framboidal pyrites in cherts of the Laobao Formation, South China: evidence for anoxic deep ocean in the terminal Ediacaran [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 1001-1007.]
- [14] Wilkin R T, Barnes H L. Formation processes of framboidal pyrite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(2): 323-339.
- [15] 杨雪英,龚一鸣. 莓状黄铁矿:环境与生命的示踪计[J]. 地球科学,2011,36(4):643-658. [Yang Xueying, Gong Yiming. Pyrite framboid: indicator of environments and life[J]. Earth Science, 2011, 32(3): 643-648.]
- [16] Suits N S, Wilkin R T. Pyrite formation in the water column and sediments of a meromictic lake [J]. Geology, 1998, 26(12): 1099-1102.
- [17] Heywood B R, Bazylinski D A, Garratt-Reed A, et al. Controlled biosynthesis of greigite (Fe_3S_4) in magnetotactic bacteria [J]. Naturwissenschaften, 1990, 77(11): 536-538.
- [18] Konhauser K O. Bacterial iron biomineralisation in nature [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1997, 20(3/4): 315-326.
- [19] Wilkin R T, Barnes H L. Pyrite formation by reactions of iron monosulfides with dissolved inorganic and organic sulfur species [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4167-4179.
- [20] Pickerill R K, Hurst J M, Surlyk F. Notes on Lower Paleozoic flysch trace fossils from Hall land and Peary land, North Greenland [J]. Grønlands Geologiske Undersøgelser, 1982, 108: 25-29.
- [21] Kappel J. Ichnofossilien im campanien des SE-Münsterlandes [M]//Münsterische Forschungen zur Geologie und Paläontologie Gesamtverzeichnis. 2003, 96: 1-163.
- [22] Jensen S. Trace fossils from the Lower Cambrian Mickwitzia Sandstone, south-central Sweden [R]. Fossils and Strata No. 42. Oslo: Scandinavian University Press, 1997, 42: 1-110.
- [23] Worsley D, Mørk A. The environmental significance of the trace fossil *Rhizocorallium jenense* in the Lower Triassic of western Spitsbergen [J]. Polar Research, 2001, 20(1): 37-48.
- [24] Seilacher A. Fossil behavior [J]. Scientific American, 1967, 217(2): 72-80.
- [25] 杨式溥,孙永传. 贵州清镇中三叠统关岭组的遗迹化石及其沉积环境意义 [J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(4): 369-378. [Yang Shipu, Sun Yongchuan. Trace fossils of Guanling Formation and its sedimentary environment [J]. Oil & Gas Geology, 1982, 3(4): 369-378.]
- [26] 林文球,刘宗文,王洪峰. 四川龙门山平驿铺组沉积环境及U形蹼状构造潜穴探讨 [J]. 矿物岩石, 1986, 6(3): 121-129. [Lin Wenqiu, Liu Zongwen, Wang Hongfeng. The approach to vertical U-shaped spreiten-burrow and Lower Devonian Pingyipu Formation nearshore-foreshore depositional environments, Longmen Mountain, Sichuan [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1986, 6(3): 121-129.]
- [27] Uchman A, Bubniak I, Bubniak A. The *glossifungites* ichnofacies in the area of its nomenclatural archetype, lviv, Ukraine [J]. Ichnos, 2000, 7(3): 183-193.
- [28] Olivero D. Early Jurassic to Late Cretaceous evolution of *Zoophycos* in the French Subalpine Basin (southeastern France) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 192(1/2/3/4): 59-78.
- [29] Olivero D. *Zoophycos* distribution and sequence stratigraphy. Examples from the Jurassic and Cretaceous deposits of Southeastern France [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 123(1/2/3/4): 273-287.
- [30] Kotake N. Paleoeecology of the *Zoophycos* producers [J]. Lethaia, 1989, 22(3): 327-341.
- [31] Kotake N. Non-selective surface deposit feeding by the *Zoophycos* producers [J]. Lethaia, 1991, 24(4): 379-385.
- [32] Kotake N. Deep-sea echinurans: possible producers of *Zoophycos* [J]. Lethaia, 1992, 25(3): 311-316.
- [33] Bromley R G. *Zoophycos*: strip mine, refuse dump, cache or sewage farm? [J]. Lethaia, 1991, 24(4): 460-462.
- [34] Bromley R G, Hanken N M. Structure and function of large, lobed *Zoophycos*, Pliocene of Rhodes, Greece [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 192(1/2/3/4): 79-100.
- [35] 龚一鸣,徐冉,谢树成,等. 遗迹化石 *Zoophycos* 中的微生物和分子化石 [J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(6):713-719. [Gong Yiming, Xu Ran, Xie Shucheng, et al. Microbial and molecular fossils from the Permian *Zoophycos* in South China [J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 2007, 37(6): 713-719.]
- [36] 曹丰龙,韦恒叶. 湖北省恩施地区二叠系低丰度草莓状黄铁矿的两种成因 [J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2015,38(2):158-166. [Cao Fenglong, Wei Hengye. Two causes for the low abundance of framboidal pyrite in the Permian in Enshi area in Hubei province [J]. Journal of East China Institute of Technology: Natural Science, 2015, 38(2): 158-166.]

Ecological and Environmental Interpretation of the Trace Fossil *Rhizocorallium* Based on Pyrite Framboids of Upper Devonian in Southwest of Henan Province

ZHAO Zhao¹, ZHANG LiJun^{1, 2}

1. Institute of Resource and Environment, Key Laboratory of Biogenic Trace and Sedimentary Minerals of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract: The trace fossils *Rhizocorallium* is abundant in the Upper Devonian Wangguangou Formation in Xichuan, southwestern Henan Province. It consists of U-shape spreite burrows and more or less parallel or slight incline to the bedding of marling limestone. Scanning electron microscope images show that abundant pyrite and iron framboids (iron framboids were mostly oxygenated from pyrite framboids) were found within the *Rhizocorallium* burrow, including (pyritohedral, octahedron, cube and nearly spherical and irregular shape). No similar framboids were observed outside *Rhizocorallium* except a few single pyrite crystals. Most of iron framboids were sheathed within the *Rhizocorallium* burrow. At the same time, the diameter of the submicron crystals in the marginal tube (0.672~1.603 μm , the average diameter of is 1.063 μm) was bigger than that in the spreite (0.376~0.877 μm , the average diameter is 0.5 μm). Therefore, it is likely that sulphate-reducing bacteria colonized the *Rhizocorallium* spreite and marginal tube within a dysoxic environment. The results indicated that *Rhizocorallium* would represent a burrow for multifunctional purpose, where the trace maker has utilized available conditions (such as substrate type, food supply, dysoxic to oxic environment) for cultivation of microbes.

Key words: trace fossils; *Rhizocorallium*; Late Devonian; pyrite framboids; micro-sedimentary facies