

# 中国东北热河生物群化石及沉积物中的黄铁矿莓状体及其对早期化石化阶段沉积微环境的指示\*

冷 琴 杨 洪<sup>2,3</sup>

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;

2. Department of Geological Sciences, Brown University, Providence, RI 02912, USA;

3. Department of Science & Technology, Bryant College, Smithfield, RI 02917, USA

**摘要** 报道了对热河生物群中植物化石、脊椎动物羽毛化石及沉积物中的黄铁矿莓状体及黄铁矿微晶质的扫描电子显微镜观察, 探讨了热河生物群化石在成岩作用过程中的微环境特征. 黄铁矿莓状体及微晶质大量保存于植物化石表面和组织内部, 而羽毛化石和围岩中则较少. 莓状体直径 6~31  $\mu\text{m}$ , 平均约 20  $\mu\text{m}$ , 指示了一个游离氧气浓度小于 30  $\mu\text{mol/L}$  的贫氧水体环境. 植物化石内部莓状体的生长指示了在黄铁矿化过程中水分子和游离氧气分子在机体组织内的存在, 而组织降解和莓状体形成之间的相对时间差又指示出快速的软组织降解始于化石化的最初期. 植物化石的细微结构在细胞水平上的缺失支持此解释. 提出了“化石封套”模式以解释化石化初期在有机物周围形成的有别于水体大背景环境的微环境.

**关键词** 莓状体 热河生物群 微环境

特异埋藏的化石生物群可提供比一般化石沉积更为丰富的信息, 而对化石化过程的了解是解释地质历史进程中的特异埋藏化石的关键. 我国东北地区的热河群产出了分异度极高的植物和动物化石<sup>[1,2]</sup>, 这些化石为一些重要演化事件, 包括被子植物及鸟类的起源、恐龙和鸟类的关系、羽毛和飞行能力的早期演化等提供了重要线索<sup>[3~16]</sup>. 然而, 尽管近年来对该产地的重要化石门类有了大量的报道、描述, 但对古环境和化石埋葬学的研究却少见涉及<sup>[17]</sup>, 对这些精美化石形成机制和过程的探讨更未见报道. 事实上, 探寻生物体降解初期和其后过程的微环境是一个尚未引起重视但对解释特异埋藏化石又是十分关键的研究领域. 本文通过研究热河生物群中植物化石、脊椎动物羽毛化石和沉积物中的黄铁矿来填补这个领域的空缺.

黄铁矿化是化石化的主要途径之一, 已被证实可形成特异保存的动物软体组织<sup>[18]</sup>和植物<sup>[19]</sup>化石.

黄铁矿具多种存在形式, 其中之一为黄铁矿莓状体(pyrite framboid). 黄铁矿莓状体是由大量( $10^2 \sim 10^5$ 个)等径的黄铁矿微晶粒(microcrystal)聚集而成的球体或亚球体, 因形似山莓(学名“悬钩子”, 英文名“raspberry”, 法文名“framboid”)而得名<sup>[20, 21]</sup>. 莓状体是现代和古代湖相沉积中黄铁矿的主要存在形式, 其形成条件近年来是许多实验室研究的热点<sup>[22, 23]</sup>. 野外观察<sup>[24, 25]</sup>、理论探讨<sup>[26, 27]</sup>以及模拟实验<sup>[22, 23]</sup>已证实黄铁矿莓状体可用以推导一系列地球化学的和沉积学的参数, 尤其是用以复原水体的氧化还原条件. 尽管对黄铁矿莓状体的研究已取得了一定的进展, 但对化石的原位黄铁矿莓状体的报道还不多见. 在此, 我们报道了大量存在于热河生物群植物和羽毛化石中的黄铁矿莓状体和微晶质(microcrystalline), 并利用已有的实验数据和理论模式探讨了控制热河生物群化石形成的微环境特征.

2002-09-02 收稿, 2002-12-06 收修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077700)、中国科学院资源环境领域知识创新工程重大项目(KZCX2-114)和国家自然科学基金(批准号: 39930020、40028201)资助

E-mail: qin.leng@nigpas.ac.cn

## 1 材料和方法

我们用扫描电子显微镜对3块植物化石(B0112, B0161, B0162)和2份羽毛化石样品(V12647A, V12415)进行了观察. 化石均保存在胶结紧密的浅灰至浅黄色薄层粉沙岩中. 标本B0112, B0162及V12415产于辽宁省凌源县宋杖子乡大王杖子的“大王杖子层”(又名“大新房子层”, 定义参见文献[28, 29]). 标本B0161产自辽宁省北票市上园乡黄半脊沟, 层位为“尖山沟层”顶部. 标本V12647A的具体产地不明, 但可能出自义县组最底部. 作为对照, 我们还观察了14份植物化石围岩样品, 分别取自紧邻化石处至距离化石5 cm处之间.

大王杖子层和尖山沟层之间的地层对比关系至今仍颇有争议: 汪筱林等<sup>[28, 30]</sup>将大王杖子层置于义县组中部, 而任东等<sup>[31]</sup>和孙革等<sup>[32]</sup>认为大王杖子层可与尖山沟层对比, 同属义县组最底部.

同样, 义县组的年龄争议至今仍未平息. 不同的定年法分别得出晚侏罗世、晚侏罗-早白垩世、早

白垩世3个年龄(参见文献[33]中的讨论). 最新的透长石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄分析<sup>[34, 35]</sup>和锆石的U-Pb法定年<sup>[36]</sup>均支持早白垩世的结论.

围岩和有机物样品均用细针或小刀片从标本上取下, 直接用指甲油粘于铝制扫描桩上. 喷金后在Hitachi S-4300型扫描电子显微镜下观察. 莓状体直径的测量在电子显微镜照片上进行, 用于氧化还原条件推测的平均直径取自对50个莓状体测量的平均值.

所有化石标本和载有样品的扫描桩均保存于中国科学院古脊椎动物及古人类研究所(北京).

## 2 结果

### 2.1 黄铁矿的类型和分布

我们在植物化石表面及紧邻化石的围岩上观察到了大量的黄铁矿沉积. 黄铁矿微晶质(图1(a)~(c))和莓状体(图1(a, d, g, h))或共生(图1(a))或各自单独保存. 远离(最远达5 cm)植物化石的围岩上微晶质和莓状体均较少, 而羽毛样品上仅见散布的莓状体.

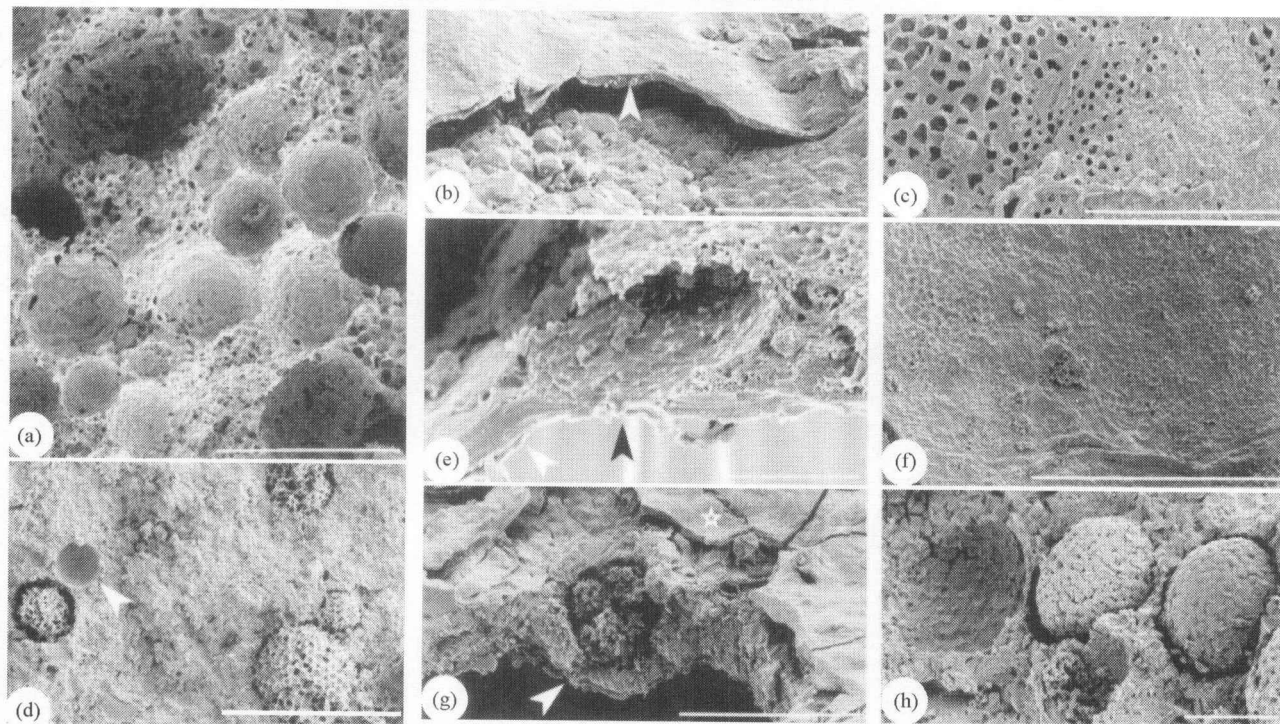


图1 化石和围岩样品的扫描电子显微镜照片

(a)~(b)取自标本B0121, (c)~(h)取自标本B0162: (b), (c), (e), (h)中比例尺长度为12  $\mu\text{m}$ ; (a), (d)中为30  $\mu\text{m}$ ; (f)中为60  $\mu\text{m}$ . (a)——覆盖于植物茎上的围岩样品, 示大小不同的莓状体留下的凹陷及黄铁矿微晶质和莓状体共生的情况. (b)——植物果皮, 部分角质层(箭头)被移走, 暴露下覆的完全被微晶质取代的组织. (c)——完全被微晶质取代的种垫. 部分微晶粒被溶解(图左). (d)——覆盖于植物茎上的围岩样品, 示大小变化显著的莓状体. 箭头指向一完全溶解的莓状体留下的凹陷. 其他莓状体微晶粒已溶解但微晶粒间的填充物残存为莓状体“框架”. (e)——种子横切面. 白色箭头指向正常成层构造, 黑色箭头指向莓状体(仅保存其凹陷)造成的原构造的压缩. (f)——种子表面, 示由微晶粒在角质层上留下的印痕. (g)——果皮横切面, 示因莓状体的存在而导致的假“管状构造”.

(h)——覆盖于果皮上的围岩样品, 示2个椭球形的莓状体及2个莓状体留下的凹陷

大块无定型微晶质覆盖植物化石表面,甚至完全置换部分软组织如果角质层下的大部分(图1(b))和种垫(图1(c))等。植物组织内还存在少量微晶粒集合。莓状体则大多沉积于植物体表面(图1(a, h)),少量地存在于邻近化石的围岩中,植物体组织内则更少(图1(g)),而羽毛化石上和远离植物化石的沉积物上仅见个别散布的莓状体。有时在植物体上或其附近莓状体可聚集成团,甚至可见于光学解剖镜下。

存在于化石组织内部的莓状体可影响甚至破坏植物体的原解剖结构:他们可引起原成层构造的压缩(图1(e))或在原组织内形成一种假“管状构造”(图1(g))。整体置换原组织的微晶质能保存原组织的外观形态,甚至由于黄铁矿化使其硬度增加而使该形态保存更好。然而,在超微水平上,组成微晶质的微晶粒可在化石的未矿化组织如角质层上留下明显的印痕,引起假“表面纹饰”(图1(f))。

## 2.2 微晶和莓状体的物理学特性

大块的微晶质通常由直径 $0.2\sim 1.8\mu\text{m}$ 的单个黄铁矿微晶粒组成,微晶粒的大小及分布无明显规则。

莓状体通常为圆球状,但也见椭球状(图1(h)),直径 $6\sim 31\mu\text{m}$ ,平均约 $20\mu\text{m}$ 。每一莓状体由大量等径的微晶粒密集而成,莓状体的大小和微晶粒的大小成正比,即小的莓状体由小的微晶粒构成而大的莓状体由大的微晶粒构成。

保存原微晶粒的莓状体较为少见,多数情况下只见莓状体留下的大小与形状与莓状体相当的凹陷(图1(a, d, e, g, h))。这些凹陷也可被后期成岩作用形成的物质所充填(图1(g))。组成大块微晶质的微晶粒也会被溶解,偶尔因溶解不完全而留下部分原位微晶粒。溶解的差异性甚至可在同一个样品中观察到(图1(c))。后期的充填作用似乎普遍存在于莓状体(图1(h))和微晶质(图1(c))的微晶粒之间。莓状体微晶粒间的填充物在微晶粒溶解后可残存为莓状体的“框架”(图1(d))。

## 3 讨论

### 3.1 “化石封套”的形成

我们观察到越靠近化石处黄铁矿,尤其是黄铁矿莓状体越富集,这种现象促使我们相信沉积的有机体及其周围的微环境应该在地球化学特性上有别于整个水底的大环境。以往的实验表明,即使在一

个与大气相通的开放水体中,在大量细菌的参与下,有机物的降解也会促使有机物的内部或周围形成缺氧的微环境<sup>[23, 37]</sup>。这种由于有机质的降解而形成的与周围大环境相阻隔的特殊微环境,我们暂称其为“化石封套(fossil envelop)”。“化石封套”形成于化石化的初期并为化石的形成提供了独特的地球化学条件。莓状体的形成需要一系列特定的条件如含大量铁、硫离子的水体环境<sup>[20, 22, 26, 27]</sup>。无论背景大环境如何,“化石封套”的存在都可能为莓状体的形成提供这些必要的条件。我们的观察发现,许多植物化石的主要微形态构造均未保存,这表明在化石化之前有机体已存在相当程度的降解。此外,无论莓状体还是微晶质都大量地沉积在易于降解的组织(如薄壁组织)上或其周围。这些结果与前人<sup>[19, 23]</sup>报道的有机质降解和莓状体形成之间存在着必然联系的结论是相一致的。

通常说来,大型脊椎动物的降解应该比植物更易形成有效的“化石封套”微环境,因而我们观察到的脊椎动物羽毛化石上莓状体并不多见的现象显得有些出乎意料。事实上, Davis 等<sup>[38]</sup>就曾运用有机体降解产生缺氧环境的理论来解释某些产地羽毛和鸟类化石的保存。然而,实验室模拟显示黄铁矿莓状体仅形成于游离氧气可进入的还原水体<sup>[20]</sup>。因此,很可能大型脊椎动物的过于有效的降解排斥了氧气在腐烂有机体周围的存在,而缺乏游离氧气最终限制了莓状体在羽毛化石上的大量形成。必须指出,我们只观察了有限的羽毛化石,对更多羽毛甚至脊椎动物化石的观察可能会有不同的解释。

### 3.2 “化石封套”内微环境的氧化还原条件

业已证明,莓状体一经形成,即使其组成矿物可能改变,其物理学特性如形状、大小、微晶粒的结构等即处于稳定状态,不再随沉积环境的变迁而改变<sup>[22, 23]</sup>,因而可应用于化石化过程中沉积微环境的重建<sup>[24]</sup>。莓状体的大小和氧化还原条件之间的关系也已建立并获得现代和古代沉积研究的证实<sup>[22, 23, 25, 39]</sup>。

热河群沉积的分布和特征已表明当时的沉积环境是一系列小型的与火山活动有关的湖盆<sup>[17]</sup>,但热河生物群化石所形成的具体微环境条件并不清楚。我们尝试运用上述有关黄铁矿莓状体形成的理论和实验模型来探讨热河群的“化石封套”内的氧化还原条件。

热河生物群化石中的原位莓状体无论其直径变

化幅度(6~31  $\mu\text{m}$ )还是直径平均值(约20  $\mu\text{m}$ )均处于莓状体变化范围的高值段。虽然超大型的莓状体也有过报道(例如140  $\mu\text{m}$ <sup>[40]</sup>),绝大多数莓状体最大直径不超过50  $\mu\text{m}$ ,直径平均值不超过10  $\mu\text{m}$ 。结合Wilkin和Barnes<sup>[22]</sup>及Wilkin和Authur<sup>[25]</sup>模式,我们得出以下推论:(1)植物化石内部莓状体的形成表明在有机体组织内部有水分子存在,这些水分子很可能来源于细胞本身的水分。(2)形成莓状体的微环境为贫氧(但非无氧)水体,其中游离氧气含量低于30  $\mu\text{mol/L}$ 且单硫铁化合物超饱和。类似的条件见于黑海全新世沉积的IIIa沉积层<sup>[25, 39, 41]</sup>。和黑海沉积相比虽然热河沉积中的莓状体直径平均值稍大,但莓状体特征和直径变化幅度与黑海沉积最为接近(后者为7~25  $\mu\text{m}$ )。此外,两者均见聚集成团的莓状体。黑海一直被作为研究缺氧条件下形成的古代黑色页岩的现代模板<sup>[25]</sup>。IIIa沉积层中较大的莓状体和较轻的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的存在可能表明在黑海沉积史中存在着短期的贫氧甚至富氧的环境<sup>[25, 41]</sup>。

“化石封套”内的水和游离氧气两种参数值得进一步讨论。水是形成莓状体的必要条件,因而莓状体在有机体组织内部的存在显然表明这些组织内部存在水分子。由于莓状体仅快速形成于石化作用的最早期阶段,当时有机物组织内还处于与外界隔绝的封闭环境,因此这些水分子不太可能来自于湖水而极可能来自于细胞内(细胞内含物绝大部分为水分子)。第二个参数是游离氧气。Wilkin等<sup>[20, 22]</sup>指出直径最大值大于20  $\mu\text{m}$ 的莓状体指示其形成环境为有氧的水底,而直径分布范围不大于20  $\mu\text{m}$ 的莓状体是缺氧水体的特征指示物。此外,实验还表明莓状体的形成需要少量游离氧气的存在<sup>[22]</sup>。我们观察到的莓状体特征因而指示在“化石封套”内及有机体组织内部存在少量的游离氧气。由于水解和氧化是生物分子降解的主要方式<sup>[42]</sup>,水分子和游离氧气的存在对组织的降解和化石的保存所起的作用可能还远没有达到被真正了解的程度。

必须强调,由于“化石封套”可产生并保持一个与周围大环境完全不同的微环境,本文从莓状体特征获得的水体氧化还原条件仅限于有机体周围和内部的微环境中。有限的取样范围导致我们还不可能对整个湖底环境条件进行准确估计。更大范围的取样,尤其是沉积剖面纵向上的和各湖盆间横向上的系列取样,以及更精确的统计学分析才可能对湖

底的大水体环境有一个较准确的评估。

### 3.3 化石埋葬的推论

对莓状体特征及植物化石本身形态解剖学的观察表明热河生物群中植物化石在细胞水分和游离氧气被耗尽之前经历了极快速(可能在短短数周内)的降解过程。Wilkin等<sup>[20]</sup>和Grimes等<sup>[23]</sup>分别观察到从6d内到80d内的莓状体形成和快速黄铁矿化的实验过程。很显然,植物软组织的快速降解提供了形成莓状体所必需的化学离子。扫描电子显微镜观察亦表明植物化石易降解的软组织往往其结构特征已缺失,但主要由稳定角质所组成的角质层却保存完好。

Briggs等<sup>[37, 43]</sup>提出组织的降解和矿化(包括黄铁矿化)是早期化石化过程中两个互相竞争的因素,最终可以有多少结构特征被保存下来取决于这两个极端因素的竞争结果。热河生物群中植物化石缺乏显微的细部特征间接地证明了这些化石快速有效的早期降解过程。从脊椎动物羽毛化石上所获地球化学信息虽然有限,但对羽毛化石进行热解的初步结果也同意这个推论(未发表数据)。因此,尽管热河生物群显示了极高的丰度及分异度,黄铁矿化之前存在的组织降解可能已导致一些微观生物学信息的丢失。

在控制条件下进行的实验已证实黄铁矿可以沉降在植物细胞壁上和细胞壁间,并完好地保留细胞解剖结构的细部特征<sup>[23, 44]</sup>。然而,我们的观察结果显示黄铁矿莓状体的生长能影响(图1-(e))或破坏(图1-(g))原有的结构。置换有机体组织的黄铁矿微晶质虽然能保存原有结构的外观形态,但在显微水平上其微晶粒可在稳定组织表面留下明显的非有机成因的印痕从而制造出假“表面纹饰”。因此,我们认为在微观或超微水平上观察和解释黄铁矿化石的形态构造时应特别小心。

最后需要说明的是,目前探讨黄铁矿莓状体的形成原因主要有两种假说:一种认为莓状体的形成是细菌作用的结果,而另一种则主张非生物成因说<sup>[22]</sup>。Donald等<sup>[45]</sup>证实细菌在 $\text{FeS}$ 向 $\text{FeS}_2$ 转化的过程中起到了重要的催化作用从而可促进黄铁矿的沉降,同时我们也几乎可以肯定细菌参与了有机体降解的过程从而促进了“化石封套”的形成,然而我们对大量标本的观察却未发现任何细菌的痕迹,但这并不排除有细菌的参与而无细菌保存成化石的可能,因此,我们的观察无法对以上两种假说进行

判别.

#### 4 结论

我们报道了中国东北热河群沉积中的黄铁矿化并描述了植物和脊椎动物羽毛化石上原位黄铁矿莓状体和微晶质的分布和特征. 黄铁矿以微晶质和莓状体共生的方式富集于化石及邻近围岩中, 这一现象表明沉积的有机体在石化的初期其周围存在一个有别于湖底大背景环境的“化石封套”微环境. 莓状体的物理特征指示该“化石封套”内水体的游离氧气分子浓度小于  $30 \mu\text{mol/L}$ , 与黑海全新世 IIIa 沉积层的水体化学条件类似.

莓状体的生长和植物结构的解体之间的关系指示了热河生物群化石在沉积初期其软组织经历了一个极快速的降解过程, 而这种在“化石封套”中存在的降解和矿化之间的时间差是控制化石显微构造保存质量的关键. 我们提议, 在微观或超微水平上观察和解释黄铁矿化化石(尤其是当黄铁矿主要以莓状体和微晶质的形式存在时)的过程中应注意到莓状体和组成微晶质的微晶粒均能对原生生物构造产生影响甚至起到破坏作用.

**致谢** 感谢中国科学院古脊椎动物及古人类研究所周忠和和汪筱林博士提供标本及相关的热河生物群信息. 中国科学院南京地质古生物研究所周志炎院士的有益讨论和对论文初稿的审阅. 我们与美国纽约州立大学 Neal R. O'Brien 教授的有关莓状体形态的讨论及其所提供的未发表图片对本研究有很大帮助. 本研究主要完成于冷琴在瑞典自然历史博物馆古植物部的一年留学期间(主要由国家教育部出国留学基金资助). 冷琴感谢该部主任 Else Marie Friis 教授及其他同事的热心帮助和在研究过程中的指导和探讨. 我们还感谢美国布莱恩大学科学与技术系、美国布朗大学地质科学系以及中国国家自然科学基金委员会为这次合作提供的方便与资助.

#### 参 考 文 献

- Chen P J, et al. Jehol Biota. *Palaeoworld*, 1999, 11 (Special Issue): 1
- 张弥曼. 热河生物群. 上海: 上海科学技术出版社, 2001. 150
- Chen P J, et al. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 1998, 391: 147
- Hou L, et al. *Confuciusornis sanctus*, a new Jurassic sauriurine bird from China. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(18): 1545
- Ji Q, et al. Two feathered dinosaurs from northeastern China. *Nature*, 1998, 393: 753
- Ji Q, et al. A Chinese triconodont mammal and mosaic evolution of the mammalian skeleton. *Nature*, 1999, 398: 326
- Ji Q, et al. The earliest known eutherian mammal. *Nature*, 2002, 416: 816
- Norell M A, et al. Palaeontology: "Modern" feathers on a non-avian dinosaur. *Nature*, 2002, 416: 36
- Sun G, et al. In search of the first flower: A Jurassic angiosperm, *Archaeofructus*, from Northeast China. *Science*, 1998, 282: 1692
- Sun G, et al. Archaeofructaceae, a new basal angiosperm family. *Science*, 2002, 296: 899
- Wang Y, et al. An ossified Meckel's cartilage in two Cretaceous mammals and origin of the mammalian middle ear. *Science*, 2001, 294: 257
- Xu X, et al. The smallest known non-avian theropod dinosaur. *Nature*, 2000, 408: 705
- Xu X, et al. Branched integumental structures in *Sinornithosaurus* and the origin of feathers. *Nature*, 2001, 410: 200
- Zhang F C, et al. A primitive enantiornithine bird and the origin of feathers. *Science*, 2000, 290: 1955
- Zhou Z H, et al. Important features of *Caudipteryx* -evidence from two nearly complete new specimens. *Vertebrata Palasiatica*, 2000, 38(4): 341
- Zhou Z H, et al. A long-tailed, seed-eating bird from the Early Cretaceous of China. *Nature*, 2002, 418: 405
- 王思恩. 热河生物群的古生态与古环境——冀北、辽西叶肢介群落古生态与古环境重建. *地质学报*, 1999, 73 (4): 289
- Briggs D E G, et al. Controls on the pyritization of exceptionally preserved fossils: An analysis of the Lower Devonian Hunsrück slate of Germany. *American Journal of Science*, 1996, 296: 633
- Kenrick P, et al. The anatomy of Lower Devonian *Goslingia breconensis* Heard based on pyritized axes, with some comments on the permineralization process. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1988, 97: 95
- Wilkin R T, et al. Pyrite formation by reactions of iron monosulfides with dissolved inorganic and organic sulfur species. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 4167
- Butler I, et al. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulphide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 2665
- Wilkin R T, et al. Formation processes of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 323
- Grimes S T, et al. Understanding fossilization: Experimental pyritization of plants. *Geology*, 2001, 29: 123
- Wilkin R T, et al. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of bottom-water redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3897
- Wilkin R T, et al. Variations in pyrite texture, sulfur isotope composition, and iron systematics in the Black Sea: Evidence for Late

- Pleistocene to Holocene excursions of the O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S redox transition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 1399
- 26 Rickard D. Kinetics of FeS precipitation: 1. Competing reaction mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 4367
- 27 Rickard D. Kinetics of pyrite formation by the H<sub>2</sub>S oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 °C and 125 °C: The rate equation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 115
- 28 Wang X L, et al. Stratigraphic sequence and vertebrate-bearing beds of the lower part of the Yixian Formation, in Sihetun and neighboring area, western Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica*, 1998, 36: 81
- 29 Wang X L, et al. Vertebrate biostratigraphy of the Lower Cretaceous Yixian Formation in Lingyuan, western Liaoning and its neighboring southern Nei Mongol (Inner Mongolia), China. *Vertebrata Palasiatica*, 2000, 38: 81
- 30 Wang X L, et al. Vertebrate faunas and biostratigraphy of the Jehol Group in western Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica*, 2000, 38 (supp): 40
- 31 任东, 等. 北京及邻区侏罗-白垩纪动物群及其地层. 北京: 地震出版社, 1995. 222
- 32 Sun G, et al. Early Angiosperms and Their Associated Plants from Western Liaoning, China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2001. 227
- 33 Barrett P M. Evolutionary consequences of dating the Yixian Formation. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15: 99
- 34 Swisher III C C, et al. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58
- 35 Swisher III C C, et al. Further support for a Cretaceous age for the feathered-dinosaur beds of Liaoning, China: New <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of the Yixian and Tuchengzi Formations. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 135
- 36 Wang S S, et al. The existing time of Sihetun vertebrate in western Liaoning -evidence from U-Pb dating of zircon. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46: 779
- 37 Briggs D E C, et al. Decay and preservation of polychaetes: Taphonomic thresholds in soft-bodied organisms. *Paleobiology*, 1993, 19: 107
- 38 Davis P G, et al. Fossilization of feathers. *Geology*, 1995, 23: 783
- 39 Wilkin R T, et al. Pyrite formation in the water column of an anoxic estuarine basin. *American Journal of Science*, 1997, 297: 620
- 40 Garcia-Guinea J, et al. Framboidal pyrites in antique books. *Nature*, 1997, 388: 631
- 41 Huang Y S, et al. Black Sea chemocline oscillations during the Holocene: Molecular and isotopic studies of marginal sediments. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 1525
- 42 Eglinton G, et al. Molecular preservation. *Phil Trans R Soc Lond*, 1991, B333: 315
- 43 Briggs D E G, et al. Fossilization of soft tissue in the laboratory. *Science*, 1993, 259: 1439
- 44 Grimes S, et al. Pyritisation of plant axes from the London Clay: Pyrite textures and their importance to understanding the mechanism of fossilisation. *Journal of Conference Abstracts*, 2000, 5: 457
- 45 Donald R, et al. Low temperature anaerobic bacterial diagenesis of ferrous monosulfide to pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 2019