

小。理论模型也越来越多,但实验的结果还不足以用来排除这些模型。理论上也还没有一个能够为多数人接受的理论,这个困难毫不奇怪,因为暗能量的问题涉及到基本理论的最基础的部分。仅仅从最简单的理论估算与实验值的巨大差别这一点,我们就能得出结论:我们对量子场论和引力的结合是多么的无知。

今后十年将是研究暗能量的关键十年,实验的发展将会帮助我们决定暗能量的性质,同时,我们相信基础理论包括超弦理论会有很大的发展,所以实验和理论将是相辅相成的。最终对暗能量的理解将是本世纪物理

学的一个最为重要的发展。

(2004年12月24日收到)

The Problem of the Theory of Dark Energy

Li Miao

Professor, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Key words cosmology, quantum gravity, string theory

热河生物群——朝圣中生代生命演化圣地

邢立达

系统工程师, 美国古世界研究基金会中国网站, 中国恐龙网总编辑部, 广东广州 510000

关键词 热河生物群 中生代 生物演化 地质年代

研究热河生物群,对研究生物的起源和演化过程,重构中生代晚期地球陆地生态系统有重要的意义。本文综合评述了热河生物群的整体面貌,包括热河生物群的背景、地质年代与环境、各门类研究的最新成果,尤其是在生物演化方面所取得的成果。

1. 热河生物群背景介绍

热河生物群形成于距今约 1.2 亿年的中生代早白垩世,它覆盖了现在中国北方、蒙古、西伯利亚、哈萨克斯坦、以及朝鲜和日本的一部分。其中辽西地区是整个生物群分布的中心,保存了独特而完整的陆相中生代地层,细腻如脂的页岩等含火山灰的沉积保存了一个举世罕见的化石宝库。

1923年,美国地质学家、中国农商部地质调查所顾问葛利普教授(A. W. Grabau)在《中国地质学》中,把当时热河省凌源县附近含化石的地层定名为热河系(Jehol Series)。1928年,他又提出了“热河动物群(Jehol Fauna)”的名称,用来代表分布于东亚狼鳍鱼岩系的综合动物化石群。1962年我国的古生物学家顾知微院士在此基础上提出了“热河生物群”的概念,它包括了与动物群处在同一地区和时期的植物群。此后“热河生物群”这一名称被广泛地应用在各种地质学文献中。建国以后,热河省被撤消,其西部划归河北省,东部划归辽宁省。原热河生物群的经典产地落在了今天辽宁省的西部,即

辽西地区。

虽然热河生物群的发现史很长,但直到 20 世纪 90 年代初才在国际上引起重视。从中国鸟到反鸟胚胎,大量保存完整的早期鸟类化石填补了鸟类演化在这一地质时期的空白。同时大量带毛恐龙、原始的被子植物、哺乳动物的不断发现,更是让热河生物群研究引起了国内外广泛的关注,成为国际古生物研究的圣地。

生物的起源、演化,向来都是进化论者和神创论者短兵相接的主战场,而寻找证据的重任就落在古生物学家身上。热河生物群为巩固生物进化论学说提供了大量实证。从 1995 年至今,有关热河生物群的发现和研究,我国学者仅在 Nature 和 Science 这两种国际顶尖杂志上就发表了近 40 篇论文,在学术界和公众中产生了较大的影响,成为我国基础科学研究中一个闪光点。

2. 热河生物群的进化意义^[1]

至少延续了数百万年的热河生物群生于一方山清水秀的桃源之地,无数的动植物在此繁衍生息,现代各个主要门类的生物在当时都有了各自的代表。由于频

繁的火山活动,动植物周期性地被火山喷出物与河流、湖泊的沉积物所覆盖,保存了大量极为精美的化石。不仅是骨骼,连非常罕见的羽毛和其他皮肤衍生物、胃石和胃中的食物亦时有发现。这些化石是我们研究热河生物群生物的起源和演化过程,重构中生代晚期地球陆地生态系统的宝贵材料。

2.1 霓裳羽衣——鸟类的早期演化和辐射

可称为鸟类最古老代表的,迄今仍是晚侏罗世德国的始祖鸟,距今约1.4亿年。在遥远的东方,相隔1500万年后的热河生物群的鸟类无疑与最古老的鸟类有着千丝万缕的关系。

辽西发现的早期鸟类化石无论是种类还是数量都是其他地区所望尘莫及的。这些大大小小的披着霓裳羽衣的精灵们不断带给我们更多的惊喜:孔子鸟是最早具有角质喙的鸟类;热河鸟是唯一保留了爬行类始祖之骨干尾巴的鸟类;会鸟是当时世界上个体最大的鸟类;辽西鸟可能是中生代已知最小的鸟类;原羽鸟不仅是已知最原始的反鸟,而且其尾羽形态介于鳞片和羽毛之间。在飞行能力方面,古鸟的差异也十分显著:义县鸟的飞行和现代鸟类相比毫不逊色,而热河鸟还要借助树木才能进行滑翔等原始的飞行。

除此之外,古生物学家的研究内容已经从单纯的骨骼结构扩展到食性、生态环境、飞行能力、行为、发育等细分领域。在食性方面,例如,会鸟的体内保存有胃石;热河鸟胃里充满植物的种子,是鸟类食籽的最早化石证据^[2];而燕鸟的食性则出现季节性变化^[3],其胃内保存了鱼类的残骸可见燕鸟平时以鱼类为主食,而保存有胃石的个别个体则可推测燕鸟在食物枯竭期,选用植物来裹腹。这种现象在现代鸟类中并不少见,如绣眼画眉在春、夏季的胃内食物大多为昆虫,但秋、冬季时植物性食物则明显增加。

在生态环境方面,辽西的古鸟大多数都以森林为主,尤其是反鸟类,如中国鸟、华夏鸟、波罗赤鸟等,它们大多吃种子或捕食昆虫;而另外一些则占据了水边的区域,如长翼鸟、燕鸟等,其中不少是今鸟类,它们多以鱼类为生。

在飞行能力研究方面,一具新发现的反鸟化石不仅在尾部长有短短的尾羽,而且腿部还保存具有空气动力学特性的羽毛^[4]。发达的腿部羽毛能补充原始鸟类的短小尾羽造成的飞行操控能力的不足,使其能有效的用来操控起飞、降落及完成空中技巧飞行。

在古鸟发育方面,更是取得重大进展。多数学者认为,在鸟类的演化过程中,早成性鸟类首先出现,后来才

出现了比较进步的晚成性鸟类,但这一说法一直缺乏有力的化石证据来证明。而一件发现于辽西义县金刚山层,保存十分完好的鸟类胚胎化石^[5]恰好填补了这个空白。从这一化石可以看出,比鸡蛋略小的胚胎不仅骨骼发育良好,而且还具有非常发育的羽毛,上下颌具有真正的牙齿,这个典型的早成性鸟类只要一出壳,就具有一定的维持体温和运动的能力,且能独立取食。

这些同时代的不同鸟类在大小、食性、飞行能力和生态环境等方面的诸多差异表明,到了早白垩世,鸟类的种类已经比较丰富,出现了快速的演化和分异,并标志着鸟类进化历史上第一次大规模的辐射。虽然这些鸟类中的绝大多数成员都还十分原始,或者已经十分的特化,但其中的一些今鸟类却代表了鸟类进化的主干,其中的一支最终发展为今天庞大的鸟类大家族。

2.2 飞天梦圆——披羽的恐龙

各种各样披羽的毛茸茸的恐龙一直是古生物界的明星,而它们全都来自热河生物群。披羽恐龙每次现身都震动学术界,媒体的报道更拉近了恐龙与公众的距离。披羽恐龙发现的意义至少可以归纳为以下几点:支持了鸟类起源于恐龙的假说;为鸟类飞行的树栖起源假说提供了重要的证据;证明羽毛不再是鸟类特有的特征;表明羽毛的起源最初和鸟类飞行没有直接的联系,羽毛最初的功能或者是为了吸引异性、伪装、物种的识别,或者是起到在奔跑、跳跃过程中产生必要的推力作用;为重构恐龙的生理习性提供了重要线索。

带毛恐龙从1996年开始被发现。从美颌龙类的中华龙鸟开始,到基干虚骨龙类的原始祖鸟、窃蛋龙类的尾羽龙、镰刀龙类的北票龙、驰龙类的中国鸟龙、小盗龙等恐龙都陆续被发现。在它们当中,有些具有很原始的羽毛类型,如中华龙鸟的羽毛还没有现代鸟类羽毛的典型特征,而尾羽龙和小盗龙等的羽毛已经和现代鸟类的羽毛非常相似。其中,驰龙类可能是代表着与鸟类关系最近的一类恐龙,它们诸多特征都与早期鸟类相似。

在这些带毛的恐龙中,还有一些相当重要的发现,如树栖生活的树息龙和顾氏小盗龙^[6]。顾氏小盗龙的后肢上附着很长的羽毛,如同增添了两个翅膀,被媒体称作有四个翅膀的恐龙。由于小盗龙和鸟类的亲缘关系十分接近,所以树栖恐龙的发现不仅改变了我们对这些恐龙的传统认识,而且还有力地支持了鸟类飞行的树栖起源假说。

此外还有2004年辽西发现的属于暴龙超科的帝龙^[7]。帝龙的下颌和尾巴尖端周边发现有纤维构造物,可推测它存在一些起保温作用的羽毛,此发现证明了暴

龙类的祖先类型是小型的。然而,最奇特的发现还要数北票市发现的属于伤齿龙科的寐龙^[8],这具化石让人们第一次看到恐龙的睡眠姿势。寐龙的后肢蜷缩于身下,头埋在前肢下,与现代鸟类的睡眠姿势非常相似,都是团起身体睡觉,这可以减少表面积,有利于御寒。此发现再次证明了恐龙与鸟类的密切关系。

当然,热河生物群的恐龙不都是有羽毛的。属于禽龙类的锦州龙以及蜥脚类恐龙都是热河动物群中的庞然大物。还有其他一些恐龙如鸚鵡嘴龙、热河龙、辽宁角龙、中国猎龙等对于研究白垩纪恐龙的辐射具有重要意义。植食性的窃蛋龙类切齿龙^[9]的发现则丰富了我们对兽脚类恐龙习性分化的认识。

2.3 兽兽一族——现代哺乳类的祖先们

虽然哺乳动物的鼎盛时期是恐龙灭绝后的新生代,但哺乳动物的祖先们早在2亿多年前的中生代早期就开始出现。迄今为止,我们在辽西的热河生物群已发现了8种原始的哺乳动物化石,它们保存相当完好,有些标本上连毛发都清晰可辨。从张和兽开始,爬兽^[10]、热河兽、中国俊兽、戈壁兽^[10,11]、毛兽、始祖兽和中国袋兽^[12]都是不同门类哺乳动物的重要代表。

其中,始祖兽是热河生物群发现的第一件真兽类哺乳动物,而且还是已知最古老的真兽类,它的发现将真兽类的起源历史向前推进了4~5千万年。爬兽是中生代已知的最大的哺乳动物,它的发现在演化上更是具有不凡的意义。在爬兽的下颌骨中保存了一块叫做麦氏软骨的骨骼,这是研究爬行动物向哺乳动物三块听小骨演化过程的宝贵材料。而体长仅15 cm左右的中国袋兽则是袋鼠和袋熊等现代有袋动物已知最原始、最久远的亲戚。

2.4 风之国度——翼龙世纪大发现

翼龙是所有曾翱翔天际的动物中最炫耀夺目的,它们是最早飞上天的脊椎动物,而且时间早在鸟类或蝙蝠之前。热河生物群发现了大量的翼龙化石,这里的发现覆盖了翼龙的两大类别,既有热河翼龙这种较原始的喙嘴龙类,还有郝氏翼龙、朝阳翼龙、中国翼龙^[13]等较进步的翼手龙类。

值得一提的是由于热河生物群保存化石的条件得天独厚,以往极难保存的翼龙翼膜、毛发在这里都清晰可辨,其中热河翼龙是目前世界上保存翼膜和毛发最好的标本之一。

由于具有较强的飞行本领,翼龙的地理扩散能力也很强,能够跨大陆分布。义县组发现的翼龙和德国晚侏

罗世索伦霍芬的翼龙就比较相似,而较晚的九佛堂组的翼龙接近于巴西早白垩世桑塔纳的翼龙,它们存在着演化上的重要联系。

最令人兴奋的发现无疑是2004年翼龙胚胎^[14]的发现,翼龙是否卵生这个历经数百年的争论终于一锤定音。这个已至发育最后阶段的胚胎不仅保存了很好的骨架,而且还有规律地保存着大小几乎相等的近于圆形的乳突状纹饰结构,这是蛋壳和胚胎的直接证据。此外,这件胚胎化石的骨骼以及软组织结构反映,翼龙出生后不久即可能具备飞行能力以及类似早成性鸟类能自主觅食。

2.5 三栖传奇——脊椎动物大家庭

热河生物群的脊椎动物除了前面介绍的鸟类、恐龙、哺乳类和翼龙以外,还包括许多其他的门类,如鱼类、两栖类、龟鳖类、蜥蜴类和离龙类等。

对著名的狼鳍鱼研究历史悠久,早在1880年,法国鱼类学家索瓦士(H. E. Sauvage)就研究了发现于辽西凌源的狼鳍鱼化石地层。狼鳍鱼化石也是热河生物群的脊椎动物中数量最多的品种。此外,还有一些可以归入现生某个鱼类类群的原始鱼类,如弓鳍鱼类和鲟形鱼类。令鱼类学家十分感兴趣的还有这些鱼类和现今北美的一些淡水鱼类之间的联系所引来的古地理学意义。

同时期在辽西诸多古湖中戏水的除了鱼类,还有许多离龙类,包括满洲鳄、潜龙和伊克昭龙^[15]等。其中潜龙化石发现量巨大,大小差异也最大,从不到10 cm的幼年体到2 m的成年体都有发现。伊克昭龙则是一类长吻离龙类,它与鳄类生活方式相近。这些化石的研究工作对重构热河古湖泊的生态系统具有十分重要的意义。

在两栖类方面,无尾两栖类的化石虽然出现得很早,但真正的蛙类化石却很晚出现。辽西发现的三燕丽蟾可称得上是最古老的青蛙之一。有尾两栖类在热河生物群中也有不少发现。内蒙古道虎沟的材料最为丰富,已发表的有奇异热河螈、天义初螈^[16]和道虎沟辽西螈^[17],其中奇异热河螈是一种完全水生的蝶螈。这些化石为探讨两栖类的起源和早期演化提供了重要的信息。

2.6 千虫纷呈——喧闹的无脊椎动物世界

在热河生物群中,无脊椎动物无论种类或数量都比脊椎动物多得多,包括腹足类、双壳类、叶肢介、介形类、虾类、蜘蛛和昆虫等等。这些化石对于研究热河生物群的地层对比和重构古环境有重要的意义。例如,著名的东方叶肢介与三尾类蜉蝣是热河生物群极常见的无脊

椎动物,它们为热河生物群的演化和地理分布提供了诸多重要的信息。

在早白垩世的东方,此时正慢慢展开一幅艳丽的、四季花香、鸟歌虫吟的画卷。热河生物群的昆虫种类尤为繁多,迄今已发现有1 000多种,包括古老的蜻蜓、古蝉和各种蜂类等,其中最吸引眼球的是大量访花昆虫的出现。这些昆虫的头部向前伸出细长的管状口器,用于采集花蜜。对这些昆虫的研究不仅间接证明了被子植物(也称“开花植物”)的出现,而且还是研究昆虫-被子植物协调进化的重要证据。

2.7 夏娃之花——热河植物群迷影

热河生物群涵盖了动物与植物两大类群。热河植物群不仅发现了大量苔藓、蕨类、买麻藤类、银杏、苏铁和松柏类等裸子植物,而且还发现了早期的被子植物化石,这对于我们研究这些类群的演化历史具有非常重要的价值。

长久以来,热河生物群中的不少植物都曾先后被描述为被子植物,但后来大多数又被归入了其他的植物类群。古果,曾被不少学者认为是热河生物群较可靠的被子植物化石,但至今仍然存在一些争议。有学者认为古果的归属还不能完全地肯定,即便古果是被子植物,它也不是时代最早的被子植物。还有学者认为古果可能不是所有现生被子植物的姐妹类群,而是一种特化的并完全生活在水中的被子植物。因此这些学者认为,古果的研究为探讨被子植物的早期形态演化、生态分化以及适应水生的生活提供了重要的信息,但和被子植物的起源关系不大。

目前最无争议的,可靠的被子植物化石应该是2003年发表的十字中华果^[18]。中华果有些像叶落荚存的豆枝,它保存下来的特征证明它不仅是被子植物,而且还是较高级的真双子叶植物。这个发现至少证实了当时除欧洲、非洲和北美等地的被子植物已演化到真双子叶植物阶段外,我国辽西被子植物也已发展到相当的阶段,同时也预示从更古老的地层中寻找到的被子植物也是可能的。

3. 热河生物群的年代和地质环境背景

3.1 两大组的地质年代

热河生物群的年代是研究其中各门类生物进化的基础。准确的地质年代关系到许多生物类群起源和产

生生态辐射的时间。热河生物群隶属的地层被称为热河群,主要包括两个地层单位:下部的义县组 and 上部的九佛堂组。它们主要是湖相的沉积,夹含大量火山灰的沉积,其中义县组还沉积几套主要由玄武岩和安山岩组成的火山熔岩。义县组和九佛堂组主要有5个化石层位:义县组底部陆家屯层、下部尖山沟层(四合屯层)、中部大王杖子层、上部金刚山层和九佛堂组波罗赤层。

在同位素测定的年代数据方面,1999年中美地质学家合作,使用了先进的氩-氩($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)测年方法,直接对四合屯和尖山沟发掘剖面上采集的,含化石地层的,火山灰夹层中的透长石矿物晶体进行年代测定。该测定在权威的美国伯克利地质年代中心完成,首次直接测定了义县组下部尖山沟层的同位素绝对年龄,结果约为1.24亿年^[19]。论文发表于英国Nature杂志,此结果得到了广泛的承认。

同年,国内一些学者还根据义县组下部火山灰中的黑云母晶体,测得了1.47亿年的结果。但由于这些黑云母矿物已严重蚀变,钾流失严重,氩体系开放,所以根据黑云母得到年龄结果已经没有地质学意义。

2001年,中美地质学家还对上述两个同位素年龄数据进行了重新采样和测试检验,其结果为1.25亿年^[20],同时还首次测定了义县组下伏地层——土城子组上部的火山灰的氩-氩年龄为1.39亿年。野外地质剖面显示,义县组和下伏土城子组之间为角度不整合,存在明显的沉积间断,两者之间长时间没有接受沉积。

2004年,中科院地质与地球物理研究所和古脊椎动物与古人类研究所合作,首次测定了朝阳上河首发掘剖面上九佛堂组火山灰的同位素年龄,测定结果为1.20亿年^[21],这一层位大致相当于波罗赤层,属于九佛堂组的中下部沉积。因此,热河生物群的主体大约生活在距今1.25~1.2亿年前左右。

3.2 地质环境背景

热河群几个层位的化石组合代表几次大的生物辐射,其中尖山沟层的化石组合代表最大的一次辐射事件。

一亿多年前的早白垩世,世界上绝大多数陆地被海水淹没或者经常受到海水的侵袭,只有热河生物群所在的区域是地球上唯一一个被大量淡水覆盖的陆地。这里气候温暖,植被繁茂,半干旱和潮湿的气候呈现季节性的交替变化。千岛湖般的众多大小山丘、盆地,形成宁静水体的湖泊以及沼泽和溪流等淡水环境,为各类生物的生存繁衍提供了良好的条件。

这一时期大地构造活动日趋活跃,伴随而来的是强

烈的火山活动。频繁的火山活动,不仅导致生物的窒息或中毒身亡,而且还将它们快速地埋藏起来。在辽西地区的一些化石地点,经常可以观察到因为火山活动导致生物集群死亡的证据。例如,北票就发现过数十只鹦鹉嘴龙骨架完整堆积在一起的标本,这显然是在顷刻间被吞噬的。

火山在带来死亡的同时也带来新生,大量的火山颗粒沉降到水体中,为水中的食物链提供了丰富的矿物质。另外,这一现象还可能引发物种的基因突变。在以上因素的共同作用下,生物种类不断增加,这可能也是为什么热河生物群如此繁盛的原因之一。

热河生物群还有着浓厚的区域和土著色彩。许多该生物群的生物只有在东亚地区被发现,而在同时期的世界其他任何地区都没有发现。这些化石包括狼鳍鱼、鹦鹉嘴龙、孔子鸟、张和兽等等。这些现象无疑表明热河生物群早期与外界有一定的地理隔绝。但此隔绝可能是相对的,如随着欧亚陆桥的建立,一些异地的新兴物种与热河生物群已存在的古老分子以及原地出现的新类型融合起来,形成了热河生物群极为独特的生物组合面貌。

目前,热河生物群的发现和研究,虽在国际上已有很大的影响,但研究工作不仅没有结束,而且只能说才刚刚开始。随着新化石不断地被发现,热河生物群的神秘面纱正在逐层揭开。让我们赞美神秘的大自然,赐福于我们的发现之旅,让我们看清演化的梦幻历程,因为任何奇迹在这里都会发生。

致谢:本文大量参考了周忠和研究员在 2003 年中国科协年会上大会报告的内容^[1];感谢周忠和、汪筱林研究员提出宝贵意见并审改此文稿。

(2004 年 11 月 26 日收到)

- 1 周忠和. 热河生物群——探索中生代生命演化的世界级化石宝库. 科学技术与工程, 2004, (2): 143-151
- 2 Zhou Z., Zhang F. A long-tailed, seed-eating bird from the Early Cretaceous of China. *Nature*, 2002, 418: 405-409
- 3 Zhou Z., Clarke J., Zhang F., et al. Gastroliths in Yanornis: an indication of the earliest radical diet-switching and gizzard plasticity in the lineage leading to living birds? *Naturwissenschaften*, Online First 28. 9. 2004
- 4 Zhang F., Zhou Z. Leg feathers in an Early Cretaceous bird. *Nature*, 2004, 431: 925
- 5 Zhou Z., Zhang F. A Precocial Avian Embryo from the lower Cretaceous of China. *Science*, 2004, 306 (5696): 653
- 6 Xu X., Zhou Z., Wang X., et al. Four-winged dinosaurs from China. *Nature*, 2003, 421: 335-340
- 7 Xu X., Mark A., Kuang X., et al. Basal tyrannosauroids

- from China and evidence for protofeathers in tyrannosauroids. *Nature*, 2004, 431: 680-684
- 8 Xu X., Mark A. A new troodontid dinosaur from China with avian-like sleeping posture. *Nature*, 2004, 431: 838-841
- 9 Xu X., Cheng Y., Wang X., et al. An unusual oviraptorosaurian dinosaur from China. *Nature*, 2002, 419: 291-293
- 10 Wang Y., Hu Y., Meng J., et al. An ossified Meckel's cartilage in two Cretaceous mammals and origin of the mammalian middle ear. *Science*, 2001, 294: 257-361
- 11 李传夔, 王元青, 胡耀明等. 热河生物群中戈壁兽一新种: 其时代意义及哺乳动物若干特征演化. *科学通报*, 2003, 48 (2): 177-182
- 12 Luo Z., Ji Q., Wible J., et al. An Early Cretaceous tribosphenic mammal and metatherian evolution. *Science*, 2003, 302: 1934-1940
- 13 汪筱林, 周忠和. 辽西早白垩世九佛堂组——翼手龙类化石及其地层意义. *科学通报*, 2002, 47 (20): 1521-1527
- 14 Wang X., Zhou Z. Pterosaur embryo from the Early Cretaceous. *Nature*, 2004, 429: 621
- 15 Liu J. A nearly complete skeleton of *Ikechosaurus pijiagouensis* sp. nov. (Reptilia: Choristodera) from the Jiufotang Formation (Lower Cretaceous) of Liaoning. *Vertebrata Palasiatica*, 2004, 42: 120-129
- 16 Gao K., Shubin N. Earliest known crown-group salamanders. *Nature*, 2003, 422: 424-428
- 17 Wang Y. A new Mesozoic caudate (*Liaoxitriton daohugouensis* sp. nov.) from Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (8): 858
- 18 Leng Q., Friis E. M. *Sinocarpus decussatus* gen. et sp. nov., a new angiosperm with basally syncarpous fruits from the Yixian Formation of Northeast China. *Plant Systematics and Evolution*, 2003, 241 (1-2): 77-88
- 19 Swisher C., Wang Y. Q., Wang X., et al. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58-61
- 20 Swisher C., 汪筱林, 周忠和等. 义县组同位素年代新证据及土城子组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定. *科学通报*, 2001, 46 (23): 2009-2012
- 21 He H., Wang X., Zhou Z., et al. Timing of the Jiufotang Formation (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China, and its implications. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L12605

* 篇幅所限, 只列出部分较新及较重要的参考文献

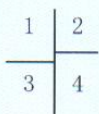
Jehol Biota - A Mecca for Mesozoic Life Evolution Xing Li-da

Chief Editor of Chinese Dinosaur Website of Paleoworld
Research Foundation

Key words Jehol biota, Mesozoic, biological evolution,
geological age

热河生物群化石

热河生物群开始形成于距今约 1.2 亿年的中生代早白垩世，中国的辽西地区是生物群分布的中心，由于频繁的火山活动，保存了大量精美的化石，为我们的研究提供了宝贵的材料



1. 顾氏小盗龙化石
2. 十字中华果化石
3. 十字中华果化石 (局部)
4. 翼龙胚胎化石



参见本期“热河生物群——朝圣中生代生命演化圣地”一文