

# 侏罗系-白垩系界线和我国东北地区下白垩统 陆相地层相关问题的探讨\*

周忠和<sup>1)</sup> 贺怀宇<sup>2)</sup> 汪筱林<sup>1)</sup>

1) 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所脊椎动物进化系统学重点实验室, 北京 100044, zhonghe@yeah.net;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

**提要** 文中介绍目前国际侏罗系-白垩系界线研究的进展以及我国东北地区下白垩统和相关陆相地层的研究现状。针对目前国内陆相侏罗系-白垩系界线研究中存在的争议, 澄清一些概念, 提出我国相关陆相地层的研究需结合古生物学、同位素年代学、古地磁学等多学科的结果。近年来的研究表明, 这些综合性的工作和最新国际地质年代表的结果并不矛盾。最新的国际地质年代表中提出的侏罗系-白垩系界线的年龄(145.5±4Ma)得到国内外学者的广泛支持, 相比之下, 一些学者提出的侏罗系-白垩系界线年龄为135Ma或125Ma的观点还缺乏地层学和同位素年代学的证据。近年来年代地层学研究的进展为我国东北地区下白垩统精确国际对比提供了重要证据。东北地区陆相早白垩世沉积中脊椎动物化石的发现以及多数无脊椎动物和植物化石研究的结果表明, 生物地层学的证据与年代学和古地磁学证据基本吻合。文中还通过一些实例, 探讨在生物地层学(特别是脊椎动物地层学)研究中, 重视生物系统发育学研究的重要性, 即应当重视“谱系发育关系相近属种的对比”, 从而可以有效避免采用化石确定地层年代过程的一些误区。文中尚论及白垩系 Aptian 阶的底界年龄以及国际地质年代表中下白垩统一些阶的年限确定的意义。

**关键词** 年代学 古地磁学 系统发育 侏罗系-白垩系界线 中国

## 1 研究背景

侏罗纪向白垩纪转变的时期, 钙质超微浮游生物经历了快速的分异, 出现了多个白垩纪成功演化并延续时间较长的属, 并且表明古海洋经历了晚侏罗世 Tithonian 晚期的变冷后, 在早白垩世早期 Berriasian 期随后温度抬升(Tremolada *et al.*, 2006)。白垩纪时期, 泛大陆裂解, 由于温暖海洋中的钙质超微浮游生物和浮游有孔虫的爆发, 产生了大量的白垩沉积。剧烈的海底火山活动和洋脊的扩张促进了白垩纪中晚期全球温室气候的形成, 相关研究成为国际学术界十分关注的热点之一。然而, 最新的研究表明, 即使在温度最高的 Turonian 期, 同时还存在过间隙的冰川气候, 延续达 20 万年(Bornemann *et al.*, 2008)。

国际侏罗系-白垩系界线层型迟迟未定和近年

来其他地质时期金钉子的相继确定形成了鲜明的对照。白垩系的阶在古生代以来的各个相当的地层单元中最多, 但已经确定的金钉子数却相对最少。

白垩系各个阶的界限过去主要依据法国和荷兰的菊石化石来定义, 之后又重新确定了其他一些全球的标准, 包括地磁极性倒转、碳同位素漂移以及微体化石资料等。白垩纪年代地层学研究中的一个主要问题是很难将巴黎盆地、侏罗地区和法国东南部的传统层型地区的生物事件以及相关阶的界限的定义和其他古地理和古海洋地理区进行比较。如何协调古生物学、同位素年代学和磁性地层学不同学科的研究成果往往成为争论的一个焦点。例如, 磁性地层学是 Berriasian 阶到 Aptian 阶各阶对比的重要工具, 但研究程度最高的菊石丰富的地点又不适合这一方法。从 Berriasian 阶到 Barremian 阶之间各阶或亚阶的定义目前主要依据的还是菊石化石种出现的最低或最高的层位。Aptian 阶的底界

收稿日期: 2009-06-11

国家重点基础研究发展规划项目(2006CB806400)和创新研究群体基金项目(40121202, 40221402)联合资助。  
? 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采用的是全球地磁极性年代表中 M0r 负极性时的底界, Aptian 阶层型的决定就有待菊石带和地磁极性年代带的对比。而 Albian 阶的底界处在白垩纪超静磁带期间, 已无法采用地磁极性对比, 目前采用的是广泛分布的有机质富集事件或者钙质超微化石分带(Ogg *et al.*, 2004)。

根据国际地层委员会网站公布的最新资料, 目前白垩系有 3 个阶 (Cenomanian, Turonian, Maastriichtian) 已经确定了金钉子, 除 Berriasian 阶外的其他各阶都已选定了候选地点, Berriasian 阶底界(侏罗系-白垩系界线)层型的工作也在加紧进行中, 金钉子的确定预计近期即将完成。

白垩纪发生了多次的大洋缺氧事件(OAE), 至少 7 次大规模的碳同位素漂移事件, 以及至少 5 次大火成岩省的形成 (133Ma, 122Ma, 118Ma, 90Ma, 65Ma)。Aptian 期早期, 发生了过去两亿多年来的最大的系列火山喷发, 由此在西赤道太平洋形成了翁通一爪哇海台(Ontong Java Plateau)和马尼希基海台(Manihiki Plateau)(Ingle and Coffin, 2004), 推测很可能是这次大规模岩浆喷发导致了著名的白垩纪超静磁带。在持续大约 37 Ma 的白垩纪超静磁带期间, 地磁场倒转停止, 全球发生了剧烈的岩浆活动, 海洋、大气和地球表层环境均产生了巨大改变, 如二氧化碳浓度增加导致的温室气候等(Larson and Erba, 1999)。发生在 Aptian 早期的这一系列重要事件和热河生物群的繁盛期较为吻合(Zhou, 2006)。早白垩世东亚地区和世界其他地区的地理隔绝已经消失, 热河生物群保存了中生代最完整的陆地生态系统(Zhou *et al.*, 2003; Barrett and Hilton, 2006; Zhou, 2006; Benton *et al.*, 2008), 因此生物演化与地质环境背景关系的研究具有很大的潜力。

中国东北地区陆相下白垩统地层十分发育, 保存也较为完整, 而且还产出世界罕见的热河生物群。这一切皆得益于当时独特的全球古地理环境: 世界其他地区多为海水淹没, 东亚地区成为当时最大的陆地(Chang, 2003)。当然, 早白垩世十分活跃的地质环境背景和我国东北地区十分活跃的区域构造和火山活动也与之具有密切的关联。多数学者认为中国东部东侧大洋板块的俯冲是导致中生代华北克拉通破坏和岩石圈减薄的主要构造控制因素, 而早白垩世(120—135 Ma)是中国东部岩浆、成矿等作用最为强烈的时期, 大规模的伸展构造发育, 从而形成了发育广泛的拉张盆地, 很可能代表了克拉通破

坏和岩石圈减薄的高峰时期(吴福元等, 2008)。

我国陆相侏罗系-白垩系界线的研究历史悠久, 但争论一直较多, 对界线的年龄也存在多种不同的认识(Chen *et al.*, 2005; 沙金庚, 2005; 王五力等, 2005; 王启飞、陈丕基, 2005; 季强等, 2006; Sha *et al.*, 2006a)。我国东北地区晚中生代生物地层学和年代地层学的研究近年来均取得了若干显著的进展。2007 年《Cretaceous Research》专辑出版了沙金庚主编的“Current research on Cretaceous lake systems in Northeast China”论文集, 被评论为“将有望平息中国陆相侏罗系-白垩系界线的争论”(Lucas, 2008)。

正确理解侏罗系-白垩系界线具有重要的理论和实际意义。与国际标准剖面的准确对比, 不仅对深入认识这一时期生物演化的时空分布规律、生物演化与环境背景的确切关系十分重要, 而且还对石油、煤炭等生产部门的工作具有指导意义。

## 2 国际侏罗系-白垩系的界线研究

侏罗系-白垩系界线长期以来一直是地层学研究中的一个难题。许多地区白垩纪中期地层的缺失, 北方区和特提斯区动物群的差异, 同一动物地理区内不同盆地间被后期构造改造割裂, 以及界线附近发育大量非海相地层等多种不同的因素导致了目前侏罗系-白垩系界线的定义和层型迟迟未定(Wimbledon, 2008)。

海相侏罗系-白垩系界线附近地层的远距离对比曾经长期存在问题和争议, 这很大程度上可归咎于不同动物地理区生物的区域特点。但过去 30 年来这一领域还是取得了很大的进展。一方面, 不同动物地理区海相化石的对比精度有所提高, 化石种类也增加很多, 除了菊石外的其它替代性标志化石如微体化石的研究取得较多进展, 加上地球化学和古地磁学研究的进展, 为尽快确定国际侏罗系-白垩系界线层型奠定了基础。目前, 不同地区磁性地层记录已经具备在早白垩世不同门类的化石与 M 序列的古地磁极性时(polarity chrons)间进行对比的条件。

传统上使用菊石的生物地层学资料将白垩系的底界定义为 Berriasian 阶的底界。其他曾被考虑作为白垩系底界 GSSP 的界定标志事件还包括微体化石事件(例如, Calpionellid B 带的底部), 层序地层学(例如, “Purbeckian 海退事件”代表了一次全球性

海平面下降), 或者磁性地层学(例如, Ogg and Lowrie, 1986 建议采用地磁极性年代带 M 18r 的底界)。Ogg 等(2004) 将侏罗系-白垩系界线(Berriasian 阶的基底)划在 *Berriasella jacobii* 菊石带的底部(地磁极性带 M 19n. 2n 的中部), 即 145.5Ma, 并指出美国西部 Morrison 组上部(孢粉、介形虫和轮藻的组合研究认为其时代介于 Kimmeridgian 期到 Tithonian 早期)陆相沉积中的火山灰层测定的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄值介于 148—151Ma 之间。

由于晚侏罗世—早白垩世可以精确控制的地层几乎没有可靠的年代数据, 白垩纪年表中从 Berriasian 到 Barremian 的各阶主要依据地磁极性年表的 M-序列对特提斯海地区菊石带的校准。从 Aptian 到 Albian 阶, 主要依据的是旋回地层学推算的微体化石带。晚白垩世依据的是大量  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄值控制的美国西部内陆地区菊石富集的沉积序列。因此, 白垩系各阶界限年龄或是来自直接测定, 或间接估算产生(Ogg *et al.*, 2004)。

Palfy 等(2000) 根据大量的测年数据, 得出下白垩统 Berriasian 阶底界年龄值为 141.8 Ma。Mahoney 等(2005) 测定了西北太平洋 Shatsky Rise 的 Berriasian 阶最底部玄武岩岩床的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段加温的年龄为  $144.6 \pm 0.8\text{Ma}$ , 从而为侏罗系-白垩系界线提供了最小的年龄估计值。

由 Wimbledon 教授领导的国际地层委员会白垩系分会 Berriasian 阶(J-K 界线)工作组于 2007 年在英国召开了第一次会议, 大家一致同意尊重历史, 将侏罗系-白垩系界线层型选在 Berriasian 阶的底部, 即 *grandis(jacobii/grandis)* 带内或之下。Wimbledon (2008) 认为超微化石提供的准确数据将扮演重要角色, 包括磁性地层校准等多学科的工作也将必不可少。该工作组 2009 年 3 月在意大利召开了第三次学术研讨会, 已确定 2009 年 9 月在英国召开的白垩系国际研讨会上, 侏罗系-白垩系界线和一些阶的界线问题将成为讨论的焦点。预计 2009 年完成的侏罗系-白垩系界线层型工作已经成为了国际地质年代表工作的最后一个堡垒。

我国学者基于同位素测年和古地磁的综合研究, 最近也得到了一些重要的结果。例如, He 等(2008) 将 Aptian 阶(即 M 0r)的底界确定为 121Ma, 可能会对最终确定国际地质年代表中下白垩统一些阶的年限起到重要的作用。

以上工作表明, 目前国际地质年代表中建议的白垩系底界的年龄尽管由于缺少最后的界线层型剖

面, 但还是依据了不少年代学的数据, 以及和相关古地磁学和古生物学的对比。未来这一界线年龄可能还会发生变动, 但是否会与现行的国际地质年代表给出的侏罗系-白垩系界线的年龄( $145.5 \pm 4\text{Ma}$ )相差 10—20Ma, 还有待深入研究。

### 3 我国陆相地层侏罗系-白垩系界线的研究

我国白垩纪海相地层仅有限分布于新疆、西藏、黑龙江以及台湾等地区(Wan *et al.*, 2008)。相比之下, 我国白垩纪陆相地层十分发育。特别是, 中国东北地区陆相白垩系的划分对比基础较好, 研究精度也较高, 并利用古生物、同位素年代学和古地磁学等方法与国际标准剖面进行了大量的对比研究。尽管如此, 我国陆相侏罗系-白垩系界线的研究由于受到国际相关海相地层工作相对滞后的影响, 加之陆相地层对比本身的困难, 因此数十年来一直存在很大的争议并不足为奇。近年来, 由于孢粉、双壳类和古地磁学研究的进展, 海相地层和陆相地层的精确国际对比也已经成为了可能。

关于中国陆相侏罗系-白垩系界线的研究, 重点在冀北—辽西地区。例如, 全国地层委员会 2002 年出版的《中国区域年代地层(地质年代)表说明书》将中国陆相侏罗系-白垩系界线置于义县阶与大北沟阶之间, 采用 137Ma 的界线年龄。一些学者通过对河北滦平盆地生物地层学的综合研究, 提出滦平盆地侏罗系-白垩系界线剖面是中国陆相侏罗系-白垩系界线理想的候选层型剖面(庞其清等, 2002; 柳永清等, 2002; 田树刚等, 2004, 2008), 并将侏罗系—白垩系界线置于大北沟组与小店子组之间, 将 130Ma 作为界线的年龄。而另一些学者, 如王启飞、陈丕基(2005) 则提出将界线年龄放在 125Ma。王五力等(2005) 还建议将 124Ma 作为中国陆相侏罗系-白垩系界线的年龄。我们认为, 这些研究虽然对深化中国北方晚中生代陆相地层的形成和演化是很有意义的, 但作为确定侏罗系-白垩系界线的依据还是不够的。

由于目前侏罗系-白垩系的全球界线层型未定, 同时目前采用的界线年龄很少是依据标准的国际地层剖面获得的, 这也间接导致了国内较多的争论。一些学者认为, 国际地层委员会建议的 145.5Ma 的侏罗系-白垩系界线年龄偏老, 不适合中国的实际情况。我们认为, 不管这些观点是否正确, 但它不符合

国际地层对比的原则,地层界限的确定应该遵从“优先命名”的原则,不能以地区差异性为由而自行确定新的界线。尽管 145.5 Ma 还不是最后的结果,随着今后几年更多精确限定年龄的测定,可能还会发生变化,但是地区性的构造或沉积间断或生物群的变更显然不能作为改变或提出不同界线年龄的依据。而且,由于我国东北地区义县组的年代学和古地磁学综合研究结果表明,它大致对应到地质年代表中的 Barremian 期—Aptian 期,因此中国陆相侏罗系—白垩系界线很可能要低于义县组,甚至大北沟组。

那么,中国陆相侏罗系—白垩系界线究竟应当放在什么位置?我们认为需要澄清的一点是,国际侏罗系—白垩系界线尚且无需和重大地质环境变化相一致,那么中国侏罗系—白垩系界线更没有必要强调和重大构造或沉积间断相一致。Mahoney 等(2005)提出,尽管一些纪和纪(如 P-T, K-Pg)或阶和阶(如 Barremian-Aptian)的界线和重大地质事件(如玄武岩喷发、海底高原形成)相吻合,标志着动植物群的显著更替,但是在侏罗纪—白垩纪的交界时期并没有发生重大全球性的环境危机。我们认为,中国陆相侏罗系—白垩系界线的研究不能过分强调某一门类在地层对比中的作用,而忽略其它生物门类的研究结果或新的进展,更不应该对基于年代学和古地磁学研究的结论加以排斥。

解决中国陆相侏罗系—白垩系界线的另一关键还在于通过陆相地层与海相地层对比,将陆相地层纳入由海相沉积建立起来的年代地层系统中(尹赞勋, 1980; 顾知微, 1982; 沙金庚, 2005)。根据非海相地层的对比,沙金庚、顾知微等学者认为义县组的时代应当晚于早白垩世最早期(顾知微, 1982, 1983; 沙金庚, 1990, 1991, 1992, 2005; Sha and Fürsich, 1993; Sha *et al.*, 2006a; Sha, 2007)。而近年来热河脊椎动物群的研究几乎一致认为大北沟组、义县组和九佛堂组均属于早白垩世。很显然,以双壳类为代表的无脊椎动物地层学和脊椎动物研究各方面的证据均表明义县组属于早白垩世,很可能属于 Barremian 期—Aptian 期,而且这些结果还和年代学以及古地磁学的证据十分吻合。在这些工作中,非海相化石的横向对比、海陆交互相地层中化石的准确鉴定和对比、精确的同位素测年以及与古地磁学工作的结合,都将扮演重要的角色。唯有如此,才能真正建立起我国白垩纪准确的非海相地层系统并确定我国区域性的侏罗纪—白垩纪的陆相地层界线剖面。

## 4 我国东北地区陆相下白垩统的研究现状

冀北—辽西地区晚中生代盆地由于受后期强烈变形改造的影响分割破坏明显,原始盆地面貌保存多不完整,不同门类生物地层的对比工作也还远未达成比较统一的意见。但另一方面,区内各盆地受相似的构造和气候背景控制,不同盆地的同期地层在全区具有可对比的不整合界面及沉积旋回,并且发育多期火山岩系,沉积物中富含火山碎屑成份,为开展系统的年代地层学和和古地磁学的工作提供了良好的条件。

一方面,王五力等(2003, 2004)根据生物地层学对比,将义县阶(组)的时代归属晚侏罗世。Chen 等(2005)根据生物群对比研究,提出义县组尖山沟层的地质时代为晚侏罗世 Tithonian 晚期。庞其清等(2006)依据 *Cypridea* 组合带和欧洲地层介形虫组合带的比较,建议将侏罗系—白垩系界线放在大北沟组和大店子组之间。陈丕基(2000)认为,我国东北地区陆相白垩系序列可以划分出 13 个组,其精度已赶上了海相白垩系 12 个阶的标准,主要依据的是其中许多组已经找到了海陆交互相地层进行对比的联系化石分子。我们认为目前得出这样一个结论似乎还为时过早。不仅不同门类生物地层学的研究尚且存在不一致的意见,而且年代学和古地磁学的框架还远不够完善。

另一方面,根据辽西地区陆相热河群与黑龙江龙爪沟群及鸡西群等海相地层的对比,沙金庚、顾知微等学者认为包括义县组在内的辽西热河群的时代并不包括早白垩世最早期(顾知微, 1983, 1995; 沙金庚, 1990, 1991, 1992; Sha and Fürsich, 1993; Gu, 1998; Sha *et al.*, 2006a, b; Sha, 2007)。孔惠等(2006)对松辽盆地白垩纪的几个生物群进行了评述,分析了生物演化与盆地演变的关系,认为热河生物群的时代为早白垩世。

生物地层学的研究中,大化石如脊椎动物化石通常只能提供大尺度的生物地层对比工具。尽管如此,近年来冀北—辽西地区发现的大量不同门类的脊椎动物化石如鸟类、哺乳类、恐龙、翼龙等,因为其中的许多类群具有早白垩世全球性的分布,对它们的对比研究还是提供了若干支持热河生物群全部属于早白垩世的重要化石证据。

近年来对热河群以及下伏地层的火山岩或沉积

夹层中的火山灰进行了大量的精确测年工作, 其结果几乎完全支持热河生物群属于早白垩世的意见 (Swisher *et al.*, 1999, 2002; Wang *et al.*, 2001; 王松山等, 2001; He *et al.*, 2004, 2006a, b, 2008; Yang *et al.*, 2007; Yang and Li, 2008)。目前获得的从河北大北沟组到辽西义县组和九佛堂组的测年结果大致为 131—120Ma, 大体对应到国际地质年代表中的早白垩世中期。Sha (2007) 认为我国东北大部地区和内蒙南部可能存在晚侏罗世晚期—早白垩世早期 (Tithonian 期—Valanginian 期) 的沉积间断。另一方面, 土城子组已有的年代学数据 (139Ma) (Swisher *et al.*, 2002) 或者 156—139Ma (Davis, 2005) 似乎表明, 我国东北地区侏罗系-白垩系界线或许会位于土城子组之内。最近 Chang 等 (2009) 对兰旗组基底火山灰的测年表明其时代大致为 159—161Ma, 对应于晚侏罗世早期, 而不是过去认为的早中侏罗世。显然, 现有大量精确测年的结果已经改变了我们过去对许多层位的时代归属的传统认识。我国陆相侏罗系-白垩系界线的研究恐怕已经不能局限在过去认为的热河群内部或者热河群的底部的观点了。

#### 4.1 陆相无脊椎动物与植物地层学

热河无脊椎动物群不仅种类丰富, 而且数量巨大, 是生物地层划分和对比的重要依据。然而, 不同门类的研究结果往往大相径庭。总体来说, 研究昆虫和叶肢介的学者普遍持有地层比较老的观点, 而研究孢粉、介形虫、双壳类的学者持较新的观点。我们认为, 除了存在化石的准确分类鉴定和对比, 研究程度不等以及世界各地相关陆相地层缺少可靠的年代学数据的因素外, 各门类演化扩散的速率恐怕也存在较大的不同。在此前提下, 与海相地层化石的对比应当成为解决这些争议最为关键的一点。

热河植物群近年来的研究以早期被子植物的研究最为引人注目。国际上普遍认为, 目前已知的最早的被子植物也出现于早白垩世 (Friis *et al.*, 2005; 冷琴, 2006)。被子植物之外的其他植物相对受到的关注较少。然而, 热河植物群总体面貌上还是和其它地区早白垩世的植物群十分相似。尤其是, 热河植物群发现的买麻藤类的化石与俄罗斯南部和巴西早白垩世发现的种类非常相似 (Zhou *et al.*, 2003)。Yang 等 (2007) 研究了黑龙江省东部鸡西盆地穆棱组的孢粉化石, 认为其时代应属早白垩世巴列姆期或巴列姆期—阿普梯早期, 并认为这

一结论和大植物化石以及沟鞭藻的研究结果是一致的 (Yang, 2003; 杨小菊, 2005)。Li 和 Batten (2007) 对义县组孢粉的研究也认为其时代应当属于早白垩世。

#### 4.2 与海陆交互相地层的对比

陆相地层的对比常常受限于缺少可与海相地层直接对比的化石证据而引起很大的争议。在热河群地层的对比研究历史中, 这一问题也曾经困扰人们多年。然而, 近年来的研究表明, 我国东北地区, 特别是沿海地区早白垩世海陆交互相地层古生物学的研究可以为我们提供重要的线索。辽西地区热河群和黑龙江龙爪沟群和鸡西群因为具有可对比的双壳类化石, 对解决热河群的地层时代和精确对比尤其关键。

很长一段时间, 由于化石鉴定等其他人为的因素, 黑龙江东部地区龙爪沟群和鸡西群产出的早白垩世 (Barremian 期—Early Albian 期) 标志性双壳类化石 *Aucellina* 曾一度被误定为另外一个更早地层中的标志性化石 *Buchia*, 这直接导致了对我国陆相晚中生代地层时代意见上的分歧。从 20 世纪 90 年代以来, 随着这一错误的纠正, 海陆交互相生物地层的研究对我国整个东北地区陆相晚中生代地层年代的认识发生了重大的改变 (Sha *et al.*, 2006a, b; Sha, 2007)。与此同时, 其他海相化石, 如菊石、头足类和沟鞭藻化石的研究, 也为我国东北地区早白垩世地层的国际对比提供了重要的佐证。

姜宝玉、冯叠宝 (2000) 通过对海相双壳类、植物、孢粉及海相沟鞭藻化石等多方面资料的对比, 将鸡西群城子河组的时代确定为早白垩世 Barremian 期—Aptian 期。Yang 等 (2003) 对鸡西盆地穆棱组标准地层剖面中发现的多属种海相沟鞭藻化石的研究也支持其早白垩世中期的观点。对近 20 年来黑龙江省东部海相侏罗纪—白垩纪沟鞭藻地层资料进行的综合研究, 建立了该地区侏罗纪—白垩纪沟鞭藻地层序列, 并将城子河组和穆棱组的时代确定为 Hauterivian 期—Aptian 期 (祝幼华、何承全, 2003; Zhu and He, 2007)。Yang 等 (2007) 对该地区孢粉的研究也得出了类似的结论。

最近, Sha 等 (2008) 综合各方面的资料, 系统总结对比了我国东北地区海相和非海相白垩系地层, 将热河群的时代确定为 Hauterivian/Barremian 期—Early Albian 期。该研究还表明, 晚侏罗世—早白垩世我国东北地区有过两次大的海侵—海退的

过程,早白垩世海侵的范围可能比我们过去想象的还要广泛,不仅到达松辽盆地,而且还可能波及到辽西地区。

#### 4.3 脊椎动物地层学

伴随早白垩世东亚地区和世界其他地区地理隔绝的消失(Enkin *et al.*, 1992; Zhou *et al.*, 2003),东亚地区脊椎动物群和世界各地的交流十分广泛,这为我们利用脊椎动物化石进行洲际的生物地层对比奠定了基础。热河脊椎动物群不仅化石种类和数量多,而且保存完整,能够提供许多重要的比较形态学和系统发育关系的证据。20世纪90年代前,辽西地区早白垩世地层中的脊椎动物化石以鱼类和少量爬行动物为主,由于其中的种类又多具有区域性的特色,因此对地层时代的意见没有引起太多的重视。但近20年来,热河生物群发现了大量的四足动物化石,特别是多个不同类群种类繁多的鸟类、恐龙、翼龙、哺乳动物和两栖类化石组合的发现,为我们进行全球性的生物地层学对比提供了十分重要的证据(汪筱林等,2000)。其中,许多类群具有早白垩世全球性的分布,如鸟类中的反鸟类,恐龙中的禽龙类(Wang and Xu, 2001; Barrett *et al.*, 2009),巨龙类(Barrett *et al.*, 2002; Barrett and Wang, 2007),驰龙类(Xu *et al.*, 1999, 2003),甲龙类中的结节龙类(Xu *et al.*, 2001),霸王龙类(Xu *et al.*, 2004)等,两栖类中的盘舌蟾类(Wang and Gao, 1999; Wang *et al.*, 2000; 王原,2006),翼龙中的古魔翼龙类(汪筱林、周忠和,2003),古神翼龙类(Wang and Zhou, 2003),梳颌翼龙类(汪筱林、周忠和,2006; Wang *et al.*, 2007)等,以及多瘤齿兽类中的始俊兽类(Hu and Wang, 2002),戈壁兽类(Li *et al.*, 2003)等。

鸚鵡嘴龙是热河生物群发现最早的恐龙,也是支持其早白垩世观点的早期脊椎动物化石证据之一(徐星、汪筱林,1998)。Lucas(2006)对鸚鵡嘴龙的地层分布和对比研究表明,该属分布在中国、西伯利亚、蒙古、泰国等地,时代为早白垩世的Barremian期—Albian期。事实上,热河生物群已发现的恐龙组合包括了约30种不同的类型,其中多半属于兽脚类,而且多在早白垩世或更晚,具有全球性的分布(徐星,2006; Xu and Norell, 2006)。属于鸟臀类的恐龙也多为白垩纪常见的类型。而最新报道的天宇龙属于一类古老的异齿龙类,这一类恐龙过去的化石记录主要发现于南非的侏罗纪早期。虽然

Zheng等(2009)报道该化石发现于辽宁建昌的热河群,但实际上其确切地点和层位并不确定,是否属于热河生物群也存在疑问。

热河生物群发现了大量的翼手龙类翼龙化石,并且在种类和数量上占有绝对的优势,这和晚侏罗世以长尾的喙嘴龙类为主的翼龙组合形成鲜明的对照。中国翼龙属于古神翼龙科,过去该科的化石仅发现于巴西早白垩世中期的地层中(Wang and Zhou, 2003)。同样,热河生物群发现的梳颌翼龙科、帆翼龙科、古魔翼龙科、鸟掌翼龙科、无齿翼龙科的化石在世界其它地区无一不发现于早白垩世或更晚的地层中。因此热河生物群翼龙的组合面貌和世界各地早白垩世地层发现的翼龙均能够很好的对比(Wang *et al.*, 2005; 汪筱林、周忠和,2006; Wang and Zhou, 2006)。

最近十多年的发现和研究表明,热河生物群的鸟类化石包括近30个属的不同种类,全部比晚侏罗世的始祖鸟进步,代表了鸟类演化史上第一次大规模的辐射事件,和世界其它地区如西班牙、蒙古、美国、澳大利亚等发现的早白垩世的鸟类能够进行很好的对比。

中生代哺乳动物中,多瘤齿兽类相对数量较多,从晚侏罗世到古近纪化石记录连续,而且齿列演化具有明显的阶段性,是研究哺乳动物生物地层学的重要证据。义县组的中国俊兽和蒙古早白垩世的始俊兽最为相似,均属于早白垩世的始俊兽科,特征上介于晚侏罗世的斜沟齿兽类和晚白垩世的土鼠兽亚目之间(Hu and Wang, 2002)。义县组发现的索菲娅戈壁兽与北美和亚洲其它早白垩世地点的戈壁兽属于同一个属,能够进行很好的对比(李传夔等,2003),因此也支持义县组为早白垩世的观点。此外,热河生物群还首次出现了真兽类和后兽类的最早代表(Ji *et al.*, 2002; Luo *et al.*, 2003)。大量新类群的出现以及众多早白垩世典型哺乳动物类群的发现均表明热河生物群的时代应当为早白垩世。

对热河生物群滑体两栖类的研究表明,无论是无尾的原始蛙类,还是有尾的蝶螈类,不仅种类较晚侏罗世的进步,而且还出现了现生类群(如盘舌蟾类)的代表,因此也支持热河生物群为早白垩世的观点(王原,2006)。

新分类单元的出现标志着演化新质的产生和物种的分化,往往和古环境的变迁具有关联,而某个分类单元延续的时间却可能相差较大,再加上化石记录本身的不足(相对于无脊椎动物),因此脊椎动物

化石用于地层对比时,应当更加重视新类群的出现,这一点常常被一些学者忽视(王五力等, 2005; Chen *et al.*, 2005)。与晚侏罗世脊椎动物组合相比,热河群中大量全球性的白垩纪类群如恐龙、哺乳动物、鸟类、翼龙等新科或新属种的出现无疑较同层位中少量古老类群(如美颌龙科)的延续存在显然更具生物地层学的指示意义,表明其为早白垩世而不是晚侏罗世。

#### 4.4 生物系统发育学研究与生物地层学研究的关系

海相地层古生物学研究中,无脊椎动物或微生物不同属或种级间的变化,或者生物组合带的变化,常常作为重要的生物地层时代的指示特征。陆相地层中也有类似的情况。同一属的不同种的对比,相对具有较为直接的地层学指示意义,这是因为他们亲缘关系十分接近,分化的时间多数情况下相差不多。因此,新属种或新的组合带的出现,常常被作为时代对比的重要证据。

而在脊椎动物地层学研究中,由于受制于化石材料的局限性,通常很少具有完整的化石序列(新生代小哺乳动物地层学的研究或许是一个例外)。在此情况下,需要强调的是生物系统发育学的研究和地层学研究的紧密结合。尽管生物的演化大致遵循从老到新,由原始到进步,简单到复杂的规律,但具体到某一生物类群的演化,往往情况要复杂得多。如果简单强调不同层位中两个亲缘关系较远的生物的对比,就很容易得出错误的生物地层年代的结论(插图1)。

准确的系统发育关系的建立,以及“谱系发育关系相近种类对比”的原理无疑是生物地层学研究,特别是脊椎动物生物地层学研究中需要遵循的一个原则。否则,这样的对比很可能导致错误的结论。例如, Ji 等(1999)根据义县组发现的两种翼龙化石(树翼龙和东方翼龙)分别与德国晚侏罗世的两种翼龙(喙嘴龙和翼手龙)的对比,认为该组时代应当为晚侏罗世。事实上,树翼龙经过详细研究后,被归入到蛙嘴翼龙科,和喙嘴龙存在较大的区别。而且详细的研究发现,东方翼龙也和翼手龙不属于同一个科,而应当属于早白垩世常见的梳颌翼龙科(Unwin *et al.*, 2000; Lü *et al.*, 2006)。由此说明,系统发育研究的准确性是生物地层对比的基础。Luo (1999)在比较了热河生物群发现的脊椎动物和欧洲晚侏罗世的生物群,认为一些古老类群(如美颌龙类等)在中国东北早白垩世的延续存在,只是表明该地

区曾是一个生物避难所,尽管这一观点现在看来也存在很多问题(Manabe *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2003)。

鸟类研究中,侯连海等(1995)曾经根据孔子鸟较其它已发现的早白垩世鸟类原始,在一些特征上和始祖鸟比较相近,而提出义县组可能为晚侏罗世的意见。这一观点被随后众多的鸟类发现所否定。我们认为,只有在关系相对较近的同单系类群中进行属种级的比较,才能分析出较准确的地层学意义。基于早期鸟类系统发育研究的结果,中生代鸟类中反鸟类和孔子鸟类以及今鸟类代表了3个比较清楚的单系类群。例如,反鸟类中大北沟发现的原羽鸟代表了反鸟类迄今最原始的类型(Zhang and Zhou, 2000),义县组发现的始反鸟和鹏鸟在特征上又较九佛堂组发现的华夏鸟和长翼鸟等原始(Zhou *et al.*, 2008)。九佛堂组发现的义县鸟和燕鸟较义县组发现的今鸟类化石(如古喙鸟和红山鸟)在系统树上的位置更高。孔子鸟科的化石目前发现于大北沟组、义县组和九佛堂组,系统发育分析表明,大北沟组发现的始孔子鸟也代表了这一类群最原始的种类(Zhang *et al.*, 2008)。相反,如果将两个系统发育关系较远的属种进行比较,可能会得出相反的结论。例如,目前仅在九佛堂组发现的热河鸟就代表了热河生物群已知最基干的种类(Zhou and Zhang, 2002),而在系统树上位置更高的原羽鸟却发现于层位更低的大北沟组。这些研究表明,基于严格的系统发育分析的相近属种比较所获得的生物地层学结论要可靠得多(插图1)。

义县组发现的中华龙鸟在系统发育上,无疑属于兽脚类恐龙的美颌龙科(Chen *et al.*, 1998),这被有些学者用于支持该组时代是晚侏罗世的脊椎动物化石证据之一,但是发现于欧洲晚侏罗世的美颌龙特征显然比较原始。事实上,同一科的脊椎动物跨纪分布的情况并不少见。热河群发现的神州龙,在似鸟龙类中其原始性仅次于西班牙 Barremian 期发现的 *Palecanimimus*(Ji *et al.*, 2003)。

同样,热河生物群发现的哺乳动物分属于多个不同的类群。如前所述,对它们地层学意义的分析必须基于同一类群(如多瘤齿兽类或戈壁兽属)内的比较,才能得出较为有意义的结论。

#### 4.5 年代地层学

对热河群火山岩的测年工作已开展数十年(胡华光、胡世玲, 1982; 刁乃昌、李祥芝, 1983; 王东



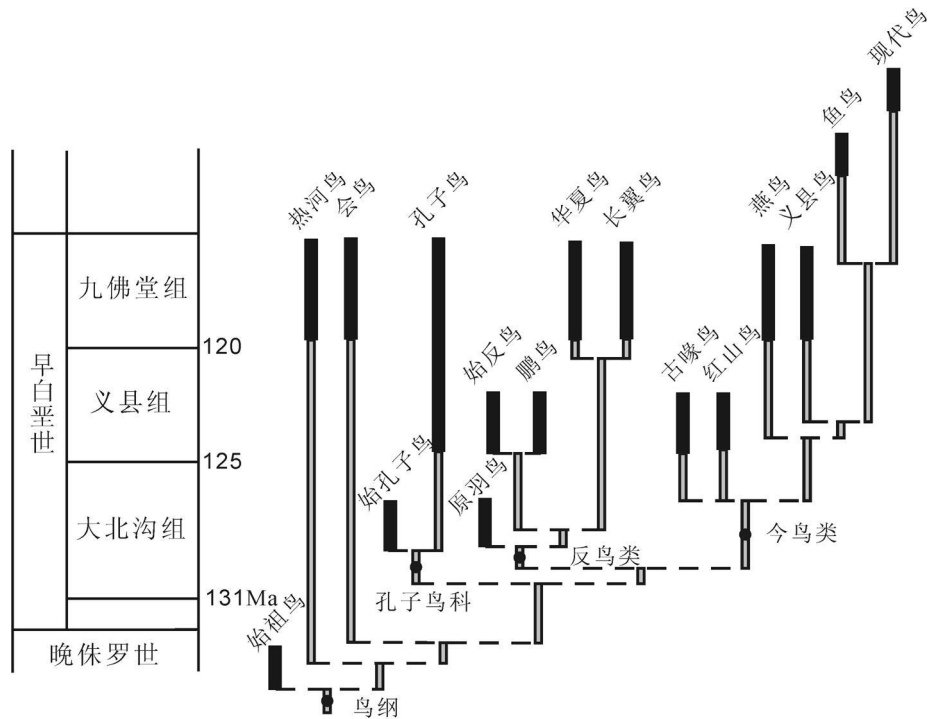


插图 1 鸟类的系统发育和地层对比关系示意图

Phylogeny of birds and biostratigraphic correlation, as an example showing the importance of the principle of

“Strict Phylogenetic Closeness” of fossil taxa in application for biostratigraphic correlations

孔子鸟科、反鸟类和今鸟类代表了 3 个单系的类群, 在其中每一个类群中, 较进步的属种相对出现时代较晚。例如, 反鸟类中, 大北沟组的原羽鸟最为原始, 义县组的始反鸟和鹏鸟次之, 而九佛堂组的华夏鸟和长翼鸟最为进步。同样, 在孔子鸟科中, 始孔子鸟出现较早, 特征也较为原始。如果不考虑系统发育关系较近的对比如, 将处于系统树十分基干位置的热河鸟(目前仅发现于九佛堂组)和相关系统位置较高, 但关系相对较远的原羽鸟(发现于大北沟组)进行对比, 就会得出正好相反的地层结论。

方、刁乃昌, 1984; 陈义贤、陈文寄, 1997; 罗修泉、李佩贤, 1997), 并取得了一些重要的进展, 但由于测年方法、测年精度以及火山岩和含化石地层的关系等问题, 长期难以被学术界普遍接受。这一局面近年来已经得到很大的改变。其中重要的一个原因是采用的对含化石地层中火山灰矿物单晶的直接测年方法。冀北—辽西地区热河群的底部一直到上部的沉积夹层中都保存了丰富的火山灰, 这为热河群的系列定年提供了条件。目前采用的主要有针对长石单晶的氩—氩测年和针对锆石晶体的 U-Pb SHRIMP 测年。除了大量火山灰的测年工作外, 我国学者还对冀北—辽西地区不同地点相关的火山岩进行了大量新的年代测定工作, 其结果也都支持早白垩世的观点(Zhu *et al.*, 2003, 2004a, b, 2007)。

目前, 义县组下部的测年工作开展得最多, 年龄基本确定为 123—125 Ma (Swisher *et al.*, 1999, 2002; Zhu *et al.*, 2001, 2007; Wang *et al.*, 2001; 王松山等, 2001; 张宏等, 2004, 2005a, b; He *et al.*, 2006b; Yang *et al.*, 2007)。早年 Smith 等 (1995) 对义县组不同层位测年的结果经美国

Berkeley 年代中心标样换算后, 大致相当于 124—122 Ma (Swisher *et al.*, 1999), 与 Swisher 等 (1999, 2002) 的测年结果基本相似。张宏等 (2005) 对义县组顶部的测年获得的结果大致为 119—122 Ma。

对热河群上部九佛堂组沉积夹层中火山灰的长石单晶的氩—氩测年获得了 120.3 Ma 的结果 (He *et al.*, 2004)。热河群下部的大北沟组测定的同位素年龄大致确定为 130—134 Ma (柳永清等, 2003; He *et al.*, 2006a)。这一结论, 结合九佛堂组的测年结果, 表明热河生物群至少延续了 11 Ma。

牛宝贵等 (2003) 首次获得了热河群下伏的张家口组火山岩的年龄 135—136 Ma。此后, 张宏等 (2005a) 又分别采用 U-Pb 法, 获得了辽西凌源地区可能属于张家口组的底界年龄 132 Ma, 顶界年龄 130 Ma, 以及冀北滦平地区张家口组的底界年龄 136 Ma, 顶界年龄 135 Ma。这些结果与热河群火山灰直接测年的结果基本吻合。

值得一提的是, 与我国的热河群大致可以对比的日本手取群, 过去在时代归属上也存在很大的争



议,被认为属于晚侏罗世—早白垩世,最近也获得了较为可靠的火山灰锆石 U-Pb 年龄,结果大致为 117—130Ma (Kusuhashi *et al.*, 2006),从而确定了其完全属于早白垩世的观点。

#### 4.6 古地磁学

白垩纪地磁极性年表对主要生物地层学事件的校准成为估计下白垩统各阶绝对年龄和地层对比的重要方法。M 序列的地磁极性带向前延伸至上侏罗统 Callovian 阶 (Gradstein *et al.*, 2004)。磁性地层学的研究已经能够将早白垩世的翁虫类、钙质超微化石和涡鞭毛藻化石的数据与 M 序列进行很好的对比 (Ogg *et al.*, 2004)。

白垩纪超静磁带 (Cretaceous Normal Superchron, CNS) 是中生代全球最重要的地球物理现象,具有深刻的地球深部动力学意义。CNS 从 Aptian 早期延续到 Santonian 期。其中, Aptian 晚期的 M<sup>-1r</sup> 具有生物地层学的年龄值,位于浮游有孔虫 *Globigerinelliodes algerianus* 带的底部,这一负极性带又被称为 ISEA 极性事件,大约延续了 10 万年。Albian 中期的 M<sup>-2r</sup>,位于 *Biticinella breggiensis* 和 *Ticinella primula* 浮游有孔虫带的交界处; Albian 晚期的 M<sup>-3r</sup>,位于 *Praediscophaera cretacea* 底部或者 *Eiffellithus turris-eiffeli* 超微浮游生物带的内部 (Ogg *et al.*, 2004)。但 M<sup>-2r</sup> 和 M<sup>-3r</sup> 地磁极性带存在的真实性还没有得到古地磁学界广泛认同 (潘永信, 个人通信)。

我国辽西地区出露大量早白垩世火山岩和陆相河湖相沉积,因此结合同位素年代学和古地磁学的研究,不仅可以揭示早白垩世地磁古强度的变化规律,而且也为进一步获取热河生物群的时代提供了佐证。近年来中国科学院地质与地球物理研究所的古地磁研究团队在辽西地区开展了磁性地层学、地磁古强度和年代学的综合研究。例如, Pan 等 (2001) 结合最新年代测定和对北票四合屯剖面古地磁学的研究,发现该剖面含化石层段的古地磁极性年龄为早白垩世 Barremian 期的 M3n (据 Gradstein, 1995)。之上的九佛堂组、阜新组、大凌河组在 CNS 期间形成 (未发表数据, 潘永信, 个人通信)。Zhu 等揭示了在 CNS 前存在地磁古强度与极性倒转频率的显著负相关 (Zhu *et al.*, 2001, 2003; Pan *et al.*, 2004),而在 CNS 期间地磁古强度为高值的特征 (Zhu *et al.*, 2004a, b)。此外,从火山岩剖面

确定了 ISEA 的年龄 (Shi *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2004a) 等。

Zhu 等 (2007) 最近对四合屯化石剖面火山岩的古地磁和 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代学研究表明,含化石沉积层之下火山岩和上覆火山岩 (穿过沉积层) 年龄大约为 124.2—125.7Ma,限定的沉积层年龄和以前获得的火山灰的测年结果基本吻合。他们还根据地磁极性年代表的界线年龄,进一步限定了含化石沉积层的时代,推断古湖泊的延续时间不超过 0.7Ma。

## 5 Aptian 阶底界年龄的确定及其意义

如前所述,目前定义 M0r 底部作为 Aptian 阶开始的标志。Barremian 阶-Aptian 阶界线因和许多重大地质事件存在关联,因此其年龄也是白垩系最重要的阶和阶的界线年龄之一。其年龄对建立 M-sequence 地磁极性年代表和估计太平洋扩张速率均十分关键 (Ogg *et al.*, 2004)。此外,对于确定准确的大洋厌氧事件、全球地层对比、古环境和海洋的变化也十分重要。

有关 M0r (Aptian 底界) 的年龄,过去曾有多种不同的数据,包括 119Ma, 121Ma, 125Ma 以及 114Ma 等,因此一直存在很大的争议。西太平洋 MIT 海底火山的 ODP 钻孔采到了一套记录了地磁反极性时的火山岩,其 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为 124.6 ± 0.3Ma。其上覆的火山熔岩过渡到发育的土壤层,而土壤层又被包括了 Aptian 早期超微化石的海洋沉积物所覆盖。因此这个地磁反转带被定为了 Barremian 中期的 M1r 的最顶部,根据有两点: 1) 形成这套上覆土壤层需要的时间; 2) 根据上覆海洋沉积的钙质超微化石的丰度,这些化石被解释为 Aptian 最早期的“微锥类危机”(“nannoconid crisis”)。Gradstein 等 (1995) 因此将 Aptian 阶底界定为 121Ma。

2004 年国际地层委员会公布的白垩纪地质年代表和 20 世纪 90 年代发布的年代表的一个主要区别是将 Aptian 阶 (M0r) 的底界定在 125Ma 而不是 121Ma。Ogg 等 (2004) 认为,对这些超微化石标准,以及上覆沉积物中碳同位素特征的重新认识,表明应当将 MIT 海底火山中记录的地磁反极性时定为 Aptian 阶底部的 M0r,因此 Aptian 阶底界大约为 125.0Ma。

事实上,究竟是 125Ma 还是 121Ma 学术界并未取得共识。最近中国科学院地质与地球物理研究

所对辽宁义县马神庙—砖城子剖面火山熔岩进行了古地磁与年代学综合研究,对 Aptian 阶底界(即 M0r 开始)年龄进行了重新确定,分别得出了  $121.2 \pm 1.3$  Ma,  $120.2 \pm 1.5$  Ma 和  $122.0 \pm 1.3$  Ma 的结果,平均年龄为  $121.2 \pm 0.5$  Ma,比目前国际地质年代表的年龄晚了约 4Ma(He *et al.*, 2008)。如果这一研究能够被国际地质年代表接受的话, Aptian 阶底界很可能被重新确定为 121Ma,相应国际地质年代表早白垩世多个阶的年限也将随之被改写。于是,热河生物群的主要生存时代将为 Hauterivian 期到 Barremian 期,而不是现在普遍认为的 Barremian 期到 Aptian 期。

致谢 戎嘉余先生在本文写作过程中给予鼓励,潘永信、万晓樵、沙金庚等对初稿提出许多修改意见,李志恒为本文插图提供帮助,在此一并深表谢意。

## 参 考 文 献 (References)

Barrett P M, Hilton J M, 2006. The Jehol Biota (Lower Cretaceous, China): new discoveries and future prospects. *Integrative Zoology*, **1**: 15—17.

Barrett P M, Wang Xiao-lin, 2007. Basal titanosauriform (Dinosauria, Sauropoda) teeth from the Lower Cretaceous Yixian Formation of Liaoning Province, China. *Paleoworld*, **16**: 265—271.

Barrett P M, Butler R J, Wang Xiao-lin, Xu Xing, 2009. Cranial anatomy of the iguanodontoid ornithomimid *Jinzhousaurus yangi* from the Lower Cretaceous Yixian Formation of China. *Acta Palaeontologica Polonica*, **54**(1): 35—48.

Barrett P M, Hasegawa Y, Manabe M, Isaji S, Matsuoka H, 2002. Sauropod dinosaurs from the Lower Cretaceous of Eastern Asia: taxonomic and biogeographical implications. *Palaeontology*, **45**: 1197—1217.

Benton M J, Zhou Zhong-he, Orr P J, Zhang Fu-cheng, Kearns S L, 2008. The remarkable fossils from the Early Cretaceous Jehol Biota of China and how they have changed our knowledge. *Proceedings of the Geologists' Association*, **119**: 209—228.

Bonemann A, Norris R D, Friedrich O, Beckmann B, Schouten S, Sinninghe Damsté J S, Vogel J, Hofmann P, Wagner T, 2008. Isotopic evidence for glaciation during the Cretaceous supergreenhouse. *Science*, **319**: 189—192.

Chang Mee-mann, 2003. Introduction. *In*: Chang Mee-man, Chen Pei-ji, Wang Yuan-qing, Wang Yuan (eds.), *The Jehol Biota: The Emergence of Feathered Dinosaurs, Beaked Birds and Flowering Plants*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 11—17.

Chang Su-chin, Zhang Hai-chun, Renne P, Fang-yun, 2009. High-

precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the basal Lanqi Formation and its implications for the origin of angiosperm plants. *Earth and Planetary Science Letters*, **279**: 212—221.

Chen Pei-ji (陈丕基), 2000. Comments on the classifications and correlation of non-marine Jurassic and Cretaceous of China. *Journal of Stratigraphy (地层学杂志)*, **24**(2): 114—119 (in Chinese with English abstract).

Chen Pei-ji, Dong Zhiming, Zhen Shu-nan, 1998. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, **391**: 147—152.

Chen Pei-ji, Wang Qi-fei, Zhang Hai-chun, Cao Mei-zhen, Li Wen-ben, Wu Shun-qing, Shen Yan-bin, 2005. Jianshangou Bed of the Yixian Formation in West China. *Science in China, Ser. D*, **48**(3): 298—312.

Chen Yi-xian (陈义贤), Chen Wen-ji (陈文寄), 1997. *The Mesozoic Volcanic Rocks in West Liaoning and its Adjacent Areas—Geochronology, Geochemistry and Geotectonic Setting*. Beijing: Seismology Press, **10-28**: 106—163 (in Chinese with English abstract).

China Stratigraphic Committee (全国地层委员会), 2002. *Brief introduction to China Regional Chronostratigraphic (Geochronologic) Scale*. Beijing: The Geological Publishing House, 1—72 (in Chinese with English abstract).

Davis G A, 2005. The Late Jurassic “Tuchengzi/Houcheng” Formation of the Yamhan fold-thrust belt: an analysis. *Earth Science Frontier*, **12**(4): 331—345.

Diao Nai-chang (刁乃昌), Li Xiang-zhi (李祥芝), 1983. The K-Ar isotopic dating of Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning. *Geological Journal of Liaoning (辽宁地质)*, **1**: 77—83 (in Chinese with English abstract).

Enkin R J, Yang Zhen-yu, Chen Yan, Courtillot V, 1992. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the Present. *Journal of Geophysical Research*, **97** (B10): 13953—13989.

Friis E M, Pedersen K R, Crane P R, 2005. When Earth started blooming: insights from the fossil record. *Current Opinion in Plant Biology*, **8**: 1—8.

Gradstein F M, Agterberg F P, Ogg J G, Hardenbol J, van Veen P, Thierry J, Huang Ze-hui, 1995. A Triassic, Jurassic and Cretaceous Time Scale. *In*: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, Hardenbol J (eds.), *Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*. Society for Sedimentary Geology, Special Publication, **54**: 95—126.

Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, 2004. *A Geologic Time Scale*. Cambridge: Cambridge University Press, 344—383.

Gu Zhi-wei (顾知微), 1982. Note on the check value of marine fossil beds for the age-dating of non-marine Mesozoic fossils in China. *Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报)*, **21**: 19—27. (in Chinese with English abstract).

Gu Zhi-wei (顾知微), 1983. On the boundary of non-marine Jurassic and Cretaceous in China. *In*: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica (ed.), *Stratigraphical Correla-*

- tion Chart in China with Explanatory Text. Beijing: Science Press. 65—82 (in Chinese).
- Gu Zhi-wei(顾知微), 1995. Study of geological age of fossil fauna of Jehol. *In*: Wang Hong-zhen (ed.), Retrospect of the Development of Geoscience Disciplines in China. Beijing: China University of Geosciences Press. 93—99 (in Chinese with English abstract).
- Gu Zhi-wei, 1998. Evolutionary trends in non-marine Cretaceous bivalves of northeast China. *In*: Johnston P A, Haggart J W (eds.), Bivalves: an Eon of Evolution—Paleobiological Studies Honoring Norman D. Newell. Calgary: University of Calgary Press. 267—276.
- He Huai-yu, Pan Yong-xin, Tauxe L, Qin Hua-feng, Zhu Ri-xiang, 2008. Toward age determination of the MOr (Barremian-Aptian boundary) of the Early Cretaceous. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **169**: 41—48.
- He Huai-yu, Wang Xiao-lin, Jin Fan, Zhou Zhong-he, Wang Fei, Yang Lie-kun, Ding Xuan, Boven A, Zhu Ri-xiang, 2006a. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the early Jehol Biota from Fengning, Hebei Province, northern China. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **7**: Q04001, doi: 10.1029/2005GC001083.
- He Huai-yu, Wang Xiaolin, Zhou Zhong-he, Jin Fan, Wang Fei, Yang Lie-kun, Ding Xuan, Boven A, Zhu Ri-xiang, 2006b.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of Lujiatun Bed (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China. *Geophysical Research Letters*, **33**: L04303, doi: 10.1029/2005GL025274.
- He Huai-yu, Wang Xiao-lin, Zhou Zhong-he, Wang Fei, Boven A, Shi Rui-ping, Zhu Ri-xiang, 2004. Timing of the Jiufotang Formation (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China and its implications. *Geophysical Research Letters*, **31**(12): L12605, doi: 10.1029/2004GL019790.
- Hou Lian-hai(侯连海), Zhou Zhong-he(周忠和), Gu Yu-cai(顾玉才), Sun Yu-tie(孙玉铁), 1995. Introduction to Mesozoic birds from Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica(古脊椎动物学报)*, **33**(4): 261—271 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yao-ming, Wang Yuan-qing, 2002. *Sinobaatar* gen. nov.: First multituberculate from the Jehol Biota of Liaoning, Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, **47**(11): 933—938.
- Hu Hua-guang(胡华光), Hu Shi-ling(胡世玲), 1982. On the ages of Jurassic and Cretaceous volcanic rocks by the radiometric dating. *Acta Geologica Sinica(地质学报)*, **56**(4): 315—323 (in Chinese with English abstract).
- Ingle S, Coffin M F, 2004. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau? *Earth and Planetary Science Letters*, **218**: 123—134.
- Ji Qiang(季强), Liu Yong-qing(柳永清), Ji Shu-an(姬书安), 2006. On the terrestrial Jurassic-Cretaceous Boundary in China. *Geological Bulletin of China(地质通报)*, **25**(3): 336—339 (in Chinese with English abstract).
- Ji Qiang, Luo Zhe-xi, Yuan Chong-xi, Wible J R, Zhang Jian-ping, Georgi, J A, 2002. The earliest known eutherian mammal. *Nature*, **416**: 816—822.
- Ji Qiang, Norell M A, Makovicky P J, Gao Ke-qin, Ji Shu-an, Yuan Chong-xi, 2003. An early ostrich dinosaur and implications for ornithomimosaur phylogeny. *American Museum Novitates*, **3420**: 1—19.
- Ji Shu-an, Ji Qiang, Padian K, 1999. Biostratigraphy of new pterosaurs from China. *Nature*, **398**: 573.
- Jiang Bao-yu(姜宝玉), Feng Di-bao(冯叠宝), 2000. Further discussion on the age of the Chengzihe Formation. *Journal of Stratigraphy(地层学杂志)*, **25**(3): 217—240 (in Chinese with English abstract).
- Kong Hui(孔惠), Chen Chun-ru(陈春瑞), Dang Yi-min(党毅敏), Yang Jian-guo(杨建国), Huang Qing-hua(黄清华), Zhao Chuan-ben(赵传本), 2006. On three Cretaceous biotas of Songliao Basin. *Acta Paleontologica Sinica(古生物学报)*, **45**(3): 416—424 (in Chinese with English abstract).
- Kusuhashi N, Matsumoto A, Murakami M, Tagami T, Hirata T, Iizuka T, Handa T, Matsuoka H, 2006. Zircon U-Pb ages from tuff beds of the upper Mesozoic Tetori Group in the Shokawa district, Gifu Prefecture, central Japan. *Island Arc*, **15**(3): 378—390.
- Larson R L, Erba E, 1999. Onset of the mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: Igneous events and the biological, sedimentary, and geochemical responses. *Paleoceanography*, **14**: 663—678.
- Leng Qin(冷琴), 2006. Palaeobotanical data—the direct and decisive evidence for solving the “Abominable Mystery” of angiosperm origin. *In*: Rong Ji-yu, Fang Zong-jie, Zhou Zhong-he, Zhan Ren-bin, Wang Xiang-dong, Yuan Xun-lai (eds.), Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record. Beijing: Science Press. 593—609, 917—921 (in Chinese with English abstract).
- Li Chuan-ku(李传昆), Wang Yuan-qing, Hu Yao-ming, Meng Jin, 2003. A new species of *Gobiconodon* (Triconodonta, Mammalia) and its implication for the age of Jehol Biota. *Chinese Science Bulletin*, **48**(11): 1129—1134.
- Li Jian-guo, Batten D J, 2007. Palynological evidence of an Early Cretaceous age for the Yixian Formation at Sihetun, western Liaoning, China. *Cretaceous Research*, **28**(2): 333—338.
- Liu Yong-qing(柳永清), Pang Qi-qing(庞其清), Li Pei-xian(李佩贤), Tian Shu-gang(田树刚), Niu Shao-wu(牛绍武), 2002. Advances in the study of non-marine Jurassic-Cretaceous biostratigraphical boundary and candidate stratotype in Luanping basin, northern Hebei. *Geological Bulletin of China(地质通报)*, **21**(3): 176—180 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong-qing(柳永清), Li Pei-xian(李佩贤), Tian Shu-gang(田树刚), 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of Late Mesozoic tuff (lava) in Luanping basin, northern Hebei, and its implications. *Acta Petrologica et Mineralogica(岩石矿物学杂志)*, **22**(3): 237—244 (in Chinese with English abstract).
- Lü Jun-chang, Gao Chun-ling, Meng Qing-jin, Liu Jin-yuan, Ji Qiang, 2006. On the systematic position of *Eosipterus yangi* Ji et Ji, 1997 among pterodactyloids. *Acta Geologica Sinica*, **89**(5): 643—646.

- Lucas S G, 2006. The Psittacosaurus biochron. Early Cretaceous of Asia. *Cretaceous Research*, **27**: 189—198.
- Lucas S G, 2008. Review on “Current research on Cretaceous lake systems in Northeast China” published in *Cretaceous Research* (Vol. 28, no. 2) edited by Jingeng Sha. *Episodes*, **31**(4): 451—452.
- Luo Xiu-qian(罗修泉), Li Pei-xian(李佩贤), 1997. A study on the boundary age between Jurassic and Cretaceous. *Acta Geoscientia Sinica(地球学报)*, **18**(3): 242—247(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhe-xi, 1999. A refugium for relicts. *Nature*, **400**: 24—25.
- Luo Zhe-xi, Ji Qiang, Wible J R, Yuan Chong-xi, 2003. An Early Cretaceous tribosphenic mammal and metatherian evolution. *Science*, **302**: 1934—1940.
- Mahoney J J, Duncan R A, Tejada M L G, Sager W W, Bralower T J, 2005. Jurassic-Cretaceous boundary age and mid-ocean-ridge-type mantle source for Shatsky Rise. *Geology*, **33**(3): 185—188.
- Manabe M, Barrett P M, Isaji S, 2000. A refugium for relicts? *Nature*, **404**: 953.
- Niu Bao-gui(牛宝贵), He Zhen-jun(和政军), Song Biao(宋彪), Ren Ji-shun(任纪舜), 2003. The SHRIMP dating of lava from Zhangjiakou Formation and its implications. *Geological Bulletin of China(地质通报)*, **22**(2): 140—141 (in Chinese with English abstract).
- Ogg J G, Lowrie W, 1986. Magnetostratigraphy of the Jurassic/Cretaceous boundary. *Geology*, **14**: 547—550.
- Ogg J G, Agterberg F P, Gradstein F M, 2004. The Cretaceous period. In Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G (eds.), *A Geological Time Scale*. Cambridge: Cambridge University Press. 344—383.
- Palfy J, Smith P L, Mortensen J K, 2000. A U-Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  time scale for the Jurassic. *Canadian Journal of Earth Science*, **37**(6): 923—944.
- Pan Yong-xin, Mimi J H, Zhu Ri-xiang, Shaw J, 2004. Further evidence for low intensity of the geomagnetic field during the early Cretaceous time: using the modified Shaw method and microwave technique. *Geophysical Journal International*, **157**: 553—564.
- Pan Yong-xin, Zhu Ri-xiang, Shaw J, Zhou Yao-xiu, 2001. Magnetic polarity ages of the fossil-bearing strata at the Sihetu section, west Liaoning: a preliminary result. *Chinese Science Bulletin*, **46**(17): 1473—1476.
- Pang Qi-qing(庞其清), Li Pei-xian(李佩贤), Tian Shu-gang(田树刚), Liu Yong-qing(柳永清), 2002. Discovery of ostracods in the Dabeigou and Dadianzi Formations at Zhangjiagou, Luanping County, northern Hebei Province of China and new progress in the biostratigraphic boundary study. *Geological Bulletin of China(地质通报)*, **21**(6): 329—338 (in Chinese with English abstract).
- Pang Qi-qing(庞其清), Tian Shu-gang(田树刚), Li Pei-xian(李佩贤), Niu Shao-wu(牛绍武), Liu Yong-qing(柳永清), 2006. Ostracod biostratigraphy of the Dabeigou and Dadianzi formations and Jurassic-Cretaceous boundary in the Luanping basin, northern Hebei, China. *Geological Bulletin of China(地质通报)*, **25**(3): 348—356(in Chinese with English abstract).
- Sha Jin-geng(沙金庚), 1990. Discovery of *Aucellina* (Bivalvia) in eastern Heilongjiang. *Journal of Stratigraphy(地层学杂志)*, **14**: 226—230 (in Chinese with English abstract).
- Sha Jin-geng(沙金庚), 1991. A different opinion on the geological ages of the Longzhaogou and Jixi groups of eastern Heilongjiang, China. *Acta Geologica Sinica(地质学报)*, **4**: 376—383 (in Chinese with English abstract).
- Sha Jin-geng(沙金庚), 1992. *Buchia* and *Aucellina* beds of eastern Heilongjiang. *Journal of Stratigraphy(地层学杂志)*, **16**: 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Sha Jin-geng(沙金庚), 2005. Current situation of the Jurassic chronostratigraphic studies in China. *Journal of Stratigraphy(地层学杂志)*, **29**(2): 124—129(in Chinese with English abstract).
- Sha Jin-geng, 2007. Cretaceous stratigraphy of northeast China: non-marine and marine correlation. *Cretaceous Research*, **28**(2): 146—170.
- Sha Jin-geng, Fürsich F T, 1993. Biostratigraphy of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous bivalve *Buchia* and *Aucellina* of eastern Heilongjiang, northeast China. *Geological Magazine*, **130**: 533—542.
- Sha Jin-geng, Chen Si-wei, Cai Hui-wei, Jiang Bao-yu, Yao Xiao-gang, Pan Yan-hong, Wang Jian-po, Zhu You-hua, He Cheng-quan, 2006a. Jurassic-Cretaceous boundary in northeastern China: placement based on buchiid bivalves and dinoflagellate cysts. *Progress in Natural Sciences*, **16**: 39—49.
- Sha Jin-geng, Hirano H, Yao Xiao-gang, Pan Yan-hong, 2008. Late Mesozoic transgressions of eastern Heilongjiang and their significance in tectonics and coal and oil accumulation in northeast China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **263**: 119—130.
- Sha Jin-geng, Lin Li, Chen Si-wei, Matsukawa M, 2006b. Some Lower Cretaceous nonmarine bivalves from fluvio-lacustrine deposits bearing dinosaur fossils in Mongolia and northeast China. *Cretaceous Research*, **27**: 262—278.
- Shi Rui-ping, He Huai-yu, Zhu Ri-xiang, Pan Yong-xin, 2004. ISEA reversed event in the Cretaceous Normal Super-chron (CNS):  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating and paleomagnetic results. *Chinese Science Bulletin*, **49**(9): 926—930.
- Smith P E, Evensen N M, York D, Chang Mee-man, Jin Fan, Li Jin-ling, Cumbaa S, Russell D, 1995. Dates and rates in ancient lakes:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  evidence for an Early Cretaceous age for the Jehol Group, Northeast China. *Canadian Journal of Earth Science*, **32**(9): 1426—1431.
- Swisher III C C, Wang Xiao-lin, Zhou Zhong-he, Wang Yuan-qing, Jin Fan, Zhang Jiang-yong, Xu Xing, Zhang Fu-cheng, Wang Yuan, 2002. Further support for a Cretaceous age for the feathered-dinosaur beds of Liaoning, China: New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Yixian and Tuchengzi Formations. *Chinese Science Bulletin*, **47**(2): 135—138.
- Swisher III C C, Wang Yuan-qing, Wang Xiao-lin, Xu Xing, Wang

- Yuan, 1999. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, **400**: 58—61.
- Tian Shu-gang (田树刚), Niu Shao-wu (牛绍武), Pang Qi-qing (庞其清), 2008. Redefinition of the Lower Cretaceous terrestrial Yixianian Stage and its stratotype candidate in the Luanping basin, northern Hebei, China. *Geological Bulletin of China (地质通报)*, **27**(6): 739—752.
- Tian Shu-gang (田树刚), Pang Qi-qing (庞其清), Niu Shao-wu (牛绍武), Li Pei-xian (李佩贤), Liu Yong-qing (柳永清), 2004. Terrestrial Jurassic—Cretaceous boundary stratotype candidate in Luanping basin, northern Hebei. *Geological Bulletin of China (地质通报)*, **23**(12): 1170—1179 (in Chinese with English abstract).
- Tremolada F, Bornemann A, Bralower T J, Koerber C, van de Schootbrugge C, 2006. Paleocyanographic changes across the Jurassic/Cretaceous boundary: The calcareous phytoplankton response. *Earth and Planetary Science Letters*, **241**: 361—371.
- Unwin D M, Lü Jun-chang, Bakhurina N N, 2000. On the systematic and stratigraphical significance of pterosaurs from the Lower Cretaceous Yixian Formation (Jehol Group) of Liaoning, China. *Mitteilungen der Museum Naturkunde Berlin Geowissenschaften Reihe*, **3**: 181—206.
- Wan Xiao-qiao, Chen Pei-ji, Wei Ming-jian, 2008. The Cretaceous system in China. *Acta Geologica Sinica*, **81**(6): 957—983.
- Wang Dong-fang (王东方), Diao Nai-chang (刁乃昌), 1984. Geochronology of Jura-Cretaceous volcanics in west Liaoning, China. *Scientific Paper on Geology for International Exchange 1*. Beijing: Geological Publishing House. 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qi-fei (王启飞), Chen Pei-ji (陈丕基), 2005. A brief introduction to the Cretaceous chronostratigraphic study. *Journal of Stratigraphy (地层学杂志)*, **29**(2): 114—123 (in Chinese with English abstract).
- Wang Song-shan (王松山), Hu Hua-guang (胡华光), Li Pei-xian (李佩贤), Wang Yuan-qing (王元青), 2001. Further discussion on geologic age of Sihetun vertebrate assemblage in western Liaoning, China: evidence from Ar-Ar dating. *Acta Petrologica Sinica (岩石学报)*, **17**(4): 663—668 (in Chinese with English abstract).
- Wang Song-shan, Wang Yuan-qing, Hu Hua-guang, Li Hui-min, 2001. The existing time of Sihetun vertebrate in western Liaoning—evidence from U-Ph dating of zircon. *Chinese Science Bulletin*, **46**(9): 779—782.
- Wang Wu-li (王五力), Zhang Hong (张宏), Zhang Li-jun (张立君), Zheng Shao-lin (郑少林), Yang Fang-lin (杨芳林), Li Zhi-tong (李之彤), Zheng Yue-juan (郑月娟), 2003. Stratigraphic sequence of the Yixian Formation in Beipiao region, Liaoning—A study and establishment of stratotype of the Yixian stage. *Journal of Stratigraphy (地层学杂志)*, **27**(3): 227—232 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wu-li (王五力), Zhang Li-jun (张立君), Zheng Shao-lin (郑少林), Zheng Yue-juan (郑月娟), Zhang Hong (张宏), Li Zhi-tong (李之彤), Yang Fang-lin (杨芳林), 2004. A new study on the stratotype and biostratigraphy of the Yixian Stage in the Yixian-Beipiao Region, Liaoning—Establishment and study of the stratotype of the Yixian Stage. *Acta Geologica Sinica (地质学报)*, **78**(4): 433—447 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wu-li (王五力), Zhang Li-jun (张立君), Zheng Shao-lin (郑少林), Ren Dong (任东), Zheng Yue-juan (郑月娟), Ding Qiu-hong (丁秋红), Zhang Hong (张宏), Li Zhi-tong (李之彤), Yang Fang-lin (杨芳林), 2005. The age of the Yixianian stage and the boundary of Jurassic-Cretaceous—the establishment and study of stratotypes of the Yixianian stage. *Geological Review (地质论评)*, **3**(51): 234—242 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiao-lin, Xu Xing, 2001. A new iguanodontid (*Jinzhouosaurus yangi* gen. et sp. nov.) from the Yixian Formation of western Liaoning, China. *Chinese Science Bulletin*, **46**(19): 1669—1672.
- Wang Xiao-lin, Zhou Zhong-he, 2003. A new pterosaur (Pterodactyloidea: Tapejaridae) from the Early Cretaceous Jiufotang Formation of western Liaoning and its implications for biostratigraphy. *Chinese Science Bulletin*, **48**(1): 16—23.
- Wang Xiao-lin (汪筱林), Zhou Zhong-he (周忠和), 2003. Two new pterodactyloid pterosaurs from the Early Cretaceous Jiufotang Formation of western Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica (古脊椎动物学报)*, **41**(1): 34—41.
- Wang Xiao-lin (汪筱林), Zhou Zhong-he (周忠和), 2006. Pterosaur adaptive radiation of the Early Cretaceous Jehol Biota. *In: Rong Jia-yu, Fang Zong-jie, Zhou Zhong-he, Zhan Ren-bin, Wang Xiang-dong, Yuan Xun-lai (eds.), Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record*. Beijing: Science Press. 665—689, 937—938 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiao-lin, Zhou Zhong-he, 2006. Pterosaur assemblages of the Jehol Biota and their implication for the Early Cretaceous pterosaur radiation. *Geological Journal*, **41**: 405—418.
- Wang Xiao-lin, Kellner A W A, Zhou Zhong-he, Campos D A, 2005. Pterosaur diversity and faunal turnover in Cretaceous terrestrial ecosystems in China. *Nature*, **437**: 875—879.
- Wang Xiao-lin, Kellner A W A, Zhou Zhong-he, Campos D A, 2007. Description of a new pterosaur (Ctenochasmidae: Archaeopterygiformes) from the Lower Cretaceous Yixian Formation of China. *Cretaceous Research*, **28**: 245—260.
- Wang Xiao-lin (汪筱林), Wang Yuan-qing (王元青), Zhang Fu-cheng (张福成), Zhang Jiang-yong (张江永), Zhou Zhong-he (周忠和), Jin Fan (金帆), Hu Yao-ming (胡耀明), Gu Gang (顾罡), Zhang Hai-chun (张海春), 2000. Biostratigraphy of vertebrates from the Lower Cretaceous Yixian Formation in Lingyuan, western Liaoning and the neighboring southern area of Nei Mongol. *Vertebrata Palasiatica (古脊椎动物学报)*, **38**(2): 81—99 (in Chinese with abstract in English).
- Wang Yuan (王原), 2006. Phylogeny and early radiation of Mes-

- zoic lissamphibians from East Asia. *In*: Rong Jia-yu, Fang Zong-jie, Zhou Zhong-he, Zhan Ren-bin, Wang Xiang-dong, Yuan Xun-lai (eds.), *Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record*. Beijing: Science Press. 643—663, 931—936 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuan, Gao Ke-qin, 1999. Earliest Asian discoglossid frog from western Liaoning. *Chinese Science Bulletin*, **44**(7): 636—642.
- Wang Yuan, Gao Ke-qin, Xu Xing, 2000. Early evolution of discoglossid frogs: new evidence from the Mesozoic of China. *Naturwissenschaften*, **87**: 417—420.
- Wimbledon W A P, 2008. The Jurassic-Cretaceous boundary: an age-old correlative enigma. *Episodes*, **31**(4): 423—428.
- Wu Fu-yuan(吴福元), Xu Yi-gang(徐义刚), Gao Shan(高山), Zheng Jian-ping(郑建平), 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica (岩石学报)*, **24**(6): 1145—1174 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xing(徐 星), 2006. Non-avian coelurosaurian fossils from the Jehol Group of western Liaoning and comments on origin of birds. *In*: Rong Jia-yu, Fang Zong-jie, Zhou Zhong-he, Zhan Ren-bin, Wang Xiang-dong, Yuan Xun-lai (eds.), *Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record*. Beijing: Science Press. 626—642, 927—930 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xing, Norell M A, 2006. Non-avian dinosaur fossils from the Lower Cretaceous Jehol Group of western Liaoning, China. *Geological Journal*, **41**: 419—437.
- Xu Xing(徐 星), Wang Xiao-lin(汪筱林), 1998. *New Psittacosaur (Ornithischia, Ceratopsia) occurrence from the Yixian formation of Liaoning, China and its stratigraphical significance*. *Vertebrata Palasiatica (古脊椎动物学报)*, **36**(2): 147—158 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xing, Norell M A, Kuang Xue-wen, Wang Xiao-lin, Zhao Qi, Jia Cheng-kai, 2004. Basal tyrannosauroids from China and evidence for protofeathers in tyrannosauroids. *Nature*, **431**: 680—684.
- Xu Xing, Wang Xiao-lin, Wu Xiao-chun, 1999. A dromaeosaurid dinosaur with a filamentous integument from the Yixian Formation of China. *Nature*, **401**: 262—266.
- Xu Xing, Wang Xiao-lin, You Hai-lu, 2001. A juvenile ankylosaur from China. *Naturwissenschaften*, **88**: 297—300.
- Xu Xing, Zhou Zhong-he, Wang Xiao-lin, Kuang Xue-wen, Zhang Fu-cheng, Du Xiang-ke, 2003. Four-winged dinosaurs from China. *Nature*, **421**: 335—340.
- Yang Xiao-ju(杨小菊), 2005. New material of fossil plants from the Early Cretaceous Muling Formation of the Jixi Basin, eastern Heilongjiang Province, China. *Acta Paleontologica Sinica (古生物学报)*, **42**(2): 561—584 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiao-ju, He Cheng-quan, Li Wen-ben, Piao Tai-yuan, 2003. Marine dinoflagellates from Lower Cretaceous Muling Formation of Jixi Basin, China and their palaeoenvironmental significance. *Chinese Science Bulletin*, **48**: 2480—2483.
- Yang Xiao-ju, Li Wen-ben, Batten D J, 2007. Biostratigraphic and palaeoenvironmental implications of an Early Cretaceous microspore assemblage from the Muling Formation, Jixi Basin, northeast China. *Cretaceous Research*, **28**(2): 339—347.
- Yang Wei, Li Shu-guang, 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, **102**: 88—117.
- Yang Wei, Li Shu-guang, Jiang Bao-yu, 2007. New evidence for Cretaceous age of the feathered dinosaurs of Liaoning: zircon U-Pb SHRIMP dating of the Yixian Formation in Sihetun, northeast China. *Cretaceous Research*, **28**(2): 177—182.
- Yin Zhan-xun(尹赞勋), 1980. Twenty years' progress in the stratigraphic studies in China. *Journal of Stratigraphy (地层学杂志)*, **4**(3): 161—190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fu-cheng, Zhou Zhong-he, 2000. A primitive enantiornithine bird and the origin of feathers. *Science*, **290**: 1955—1959.
- Zhang Fu-cheng, Zhou Zhong-he, Benton M J, 2008. A primitive confuciosornithid bird from China and its implications for early avian flight. *Science in China, Series D*, **51**(5): 625—639.
- Zhang Hong(张 宏), Liu Xiao-ming(柳小明), Chen Wen(陈文), Li Zhi-tong(李之彤), Yang Fang-lin(杨芳林), 2005a. The age of the top of the Yixian Formation in the Beipiao-Yixian area, western Liaoning, and its importance. *Geology in China (中国地质)*, **32**(4): 596—603 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong(张 宏), Liu Xiao-ming(柳小明), Zhang Ye-qing(张晔卿), Yuan Hong-lin(袁洪林), Hu Zhao-chu(胡兆初), 2005b. Zircon U-Pb Ages and significance of bottom and top beds of Zhangjiakou Formation in Liaoning and Hebei provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences (地球科学-中国地质大学学报)*, **30**(4): 387—401.
- Zhang Hong(张 宏), Wang Wu-li(王五力), Li Zhi-tong(李之彤), 2004. Comprehensive correlation of the Yixian formation in the Beipiao and Yixian areas, western Liaoning. *Geological Bulletin of China (地质通报)*, **23**(8): 766—777 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiao-ting, You Hai-lu, Xu Xing, Dong Zhi-ming, 2009. An Early Cretaceous heterodontosaurid dinosaur with filamentous integumentary structures. *Nature*, **458**: 333—336.
- Zhou Zhong-he(周忠和), 2006. Adaptive radiation of the Jehol Biota and its evolutionary ecological background. *In*: Rong Jia-yu, Fang Zong-jie, Zhou Zhong-he, Zhan Ren-bin, Wang Xiang-dong, Yuan Xun-lai (eds.), *Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record*. Beijing: Science Press. 705—732, 943—945 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhong-he, 2006. Evolutionary radiation of the Jehol Biota: chronological and ecological perspectives. *Geological Journal*, **41**: 377—393.
- Zhou Zhong-he, Zhang Fu-cheng, 2002. A long-tailed, seed-eating bird from the Early Cretaceous of China. *Nature*, **418**: 405—409.

- Zhou Zhong-he, Barrett P M, Hilton J. 2003. An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem. *Nature*, **421**: 807–814.
- Zhou Zhong-he, Clarke J, Zhang Fu-cheng. 2008. Insight into diversity, body size, and morphological evolution from the largest Early Cretaceous enantiornithine bird. *Journal of Anatomy*, **212**: 565–577.
- Zhu Ri-xiang, Hoffman K A, Pan Yong-xin, Shi Rui-ping, Li Da-ming. 2003. Evidence for weak geomagnetic field intensity prior to the Cretaceous normal superchron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **136**: 187–199.
- Zhu Ri-xiang, Hoffman K A, Nomade S B. 2004a. Geomagnetic paleointensity and direct age determination of the ISEA (M0r?) chron. *Earth and Planetary Science Letters*, **217**: 285–295.
- Zhu Ri-xiang, Lo Chin-hua, Shi Rui-ping, Shi Guang-hai, Pan Yong-xin, Shao Jian. 2004b. Palaeointensities determined from the middle Cretaceous basalt in Liaoning province, northeastern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **142**: 49–59.
- Zhu Ri-xiang, Pan Yong-xin, He Huai-yu, Qin Hua-feng, Ren Shou-mai. 2008. Palaeomagnetism and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age from a Cretaceous volcanic sequence, Inner Mongolia, China: implications for the field variation during the Cretaceous normal superchron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **169**: 59–75.
- Zhu Ri-xiang, Pan Yong-xin, Shaw J, Li Da-ming, Li Qi. 2001. Geomagnetic palaeointensity just prior to the Cretaceous normal superchron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **128**: 207–222.
- Zhu Ri-xiang, Pan Yong-xin, Shi Rui-ping, Liu Qing-song, Li Da-ming. 2007. Palaeomagnetic and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating constraints on the age of the Jehol Biota and the duration of deposition of the Sihetun fossil bearing lake sediments, northeastern China. *Cretaceous Research*, **8**(2): 171–176.
- Zhu You-hua (祝幼华), He Cheng-quan (何承全). 2003. The Middle Jurassic to Early Cretaceous dinoflagellate assemblage sequence from eastern Heilongjiang. *Journal of Stratigraphy (地层学杂志)*, **27**: 282–288 (in Chinese with English abstract).
- Zhu You-hua, He Cheng-quan. 2007. Middle Jurassic to Early Cretaceous dinoflagellate assemblage zones in eastern Heilongjiang Province, northeast China. *Cretaceous Research*, **28**(2): 327–332.

## THE CONTINENTAL JURASSIC-CRETACEOUS BOUNDARY IN CHINA

ZHOU Zhong-he<sup>1)</sup>, HE Huai-yu<sup>2)</sup> and WANG Xiao-lin<sup>1)</sup>

1) Key Laboratory of Evolutionary Systematics of Vertebrates, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China, zhonghe@yeah.net

2) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Key words** Geochronology, paleogeomagnetism, phylogenetics, Jurassic-Cretaceous boundary, China

### Abstract

We here briefly review the recent progress in the study on the global Jurassic-Cretaceous boundary and its implications for the continental J-K boundary in China, particularly in northeastern China. The proposals of 135Ma, 125Ma or even younger age for the Chinese J-K boundary by some workers are dismissed based on a comprehensive analysis of paleontological, geochronologic, and paleogeomagnetic studies of the Lower Cretaceous stratigraphy in northeastern China, which is rather consistent with the proposal of  $145.5 \pm 4\text{Ma}$  for the J-K boundary. The conclusion of middle Early Cretaceous age for the birds- and feathered dinosaurs-bearing deposits, i. e., the Jehol Group, in China

is supported by extensive and compelling evidence of biostratigraphic, geochronologic, and paleogeomagnetic studies in the region. Vertebrate biostratigraphy of the Lower Cretaceous in northeastern China is summarized based on most recent discoveries of fossils such as birds, dinosaurs, pterosaurs, and mammals, many groups of which show a global distribution with biostratigraphic significance. We also emphasize the importance of the principle of “Strict Phylogenetic Closeness” of fossil taxa in application for biostratigraphic correlations. Finally, we discuss the controversy over the age of M0r (the bottom of Aptian) in view of recent geochronological and paleogeomagnetic studies of the Early Cretaceous volcanics in northeastern China.