

原羽鸟的层位与热河生物群的脊椎动物化石早期组合

金帆, 张福成, 李志恒, 张江永, 李淳, 周忠和

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

E-mail: jinfan@ivpp.ac.cn

2007-11-26 收稿, 2008-03-10 接受

国家自然科学基金(批准号: 40121202, 40472017)、中国科学院知识创新工程重要方向(批准号: KZCX3-SW-142)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806400)资助项目

摘要 产自河北丰宁四岔口盆地的原羽鸟是迄今所知最为原始的反鸟类化石, 其产出岩段不含辽西义县组的标志性化石; 该岩段所含的鱼类和鸟类化石显示了比义县组相关属种更原始的特征状态, 且叶肢介化石为多见于冀北大北沟组和大店子组的属种。就地层发育序列而言, 含原羽鸟的沉积岩段在相邻盆地伏于含义县组标志性化石的地层之下, 因而确认原羽鸟的层位应低于辽西的义县组, 大致相当于冀北的大店子组, 这是目前国内鸟类化石与世界上反鸟类的最低产出层位。与原羽鸟相伴的还有其它鸟类、鲟形鱼类、有尾两栖动物和哺乳动物, 据此新建丰宁北票鲟-丰宁原羽鸟脊椎动物组合, 这一组合将热河生物群中脊椎动物的演变历史推进到 130.7 Ma 前。建议以控制生物阶段性发展的大尺度构造沉积旋回来界定热河生物群, 并以北票鲟替代狼鳍鱼作为热河生物群的代表化石。

关键词

原羽鸟

层位

热河生物群

脊椎动物化石早期组合

自 1992 年以来, 在辽宁西部的热河群义县组火山沉积夹层和九佛堂组中下部地层中, 陆续发现了许多具有重要意义的生物化石, 热河生物群——一个因独特地质环境而得以完好保存下来的早白垩世生物群, 其栩栩如生的面貌已初露端倪^[1~6]。

然而, 由于所处构造带的不同以及盆地形成的先后, 辽宁西部的热河群与河北北部的滦平群相比, 其底部的地层发育序列不全, 基本缺失了相当于滦平群张家口组、大北沟组以及大店子组下部的地层^[3], 因而河北北部自然成为进一步追索热河生物群早期发展历史的关键地区。

冀北地区研究最详的是滦平盆地, 滦平群下部的大北沟组和大店子组的建组剖面就在该盆地^[7,8]。近年来, 围绕着侏罗-白垩系界线、标志化石与重点层型剖面、以及主要断代地层建群等, 对滦平盆地大北沟组和大店子组的地层与无脊椎动物化石的研究取得了不少新进展^[9~12]。然而, 由于滦平盆地是以正常沉积为主的盆地, 脊椎动物化石除了鱼类, 其他的类

群颇为罕见, 迄今所知只有零星的两栖类和恐龙化石。

河北丰宁的森吉图盆地和四岔口盆地在 20 世纪 90 年代亦先后发现了鸟类与鲟形鱼类的新属种^[13~17]。由于这两个盆地滦平群下部地层的特征与辽西的义县组相同, 火山岩层与沉积岩层交互出露, 所含化石十分丰富。因此, 我们从 20 世纪 90 年代中期开始, 重点对这两个盆地进行了多次野外考察; 并分别于 2000 年和 2007 年, 在四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段做了两次较大规模的化石发掘。我们的考察和研究发现, 森吉图盆地含冀北鸟等鸟类化石的沉积岩段和四岔口盆地含原羽鸟等鸟类化石的沉积岩段层位并不相同, 前者与辽西凌源义县组的大王杖子层相当, 后者则大致相当于冀北滦平的大店子组。这一发现厘清了森吉图和四岔口这两个相邻盆地含鸟类化石沉积岩段的上下关系, 进而建立了冀北地区热河生物群的两个脊椎动物化石早期组合, 其中较早的丰宁北票鲟-丰宁原羽鸟组合是热河生物群迄今最

早的脊椎动物化石组合.

1 原羽鸟的层位

原羽鸟是迄今所知世界上最为原始的反鸟 [17], 化石产自河北丰宁的四岔口盆地(图 1).

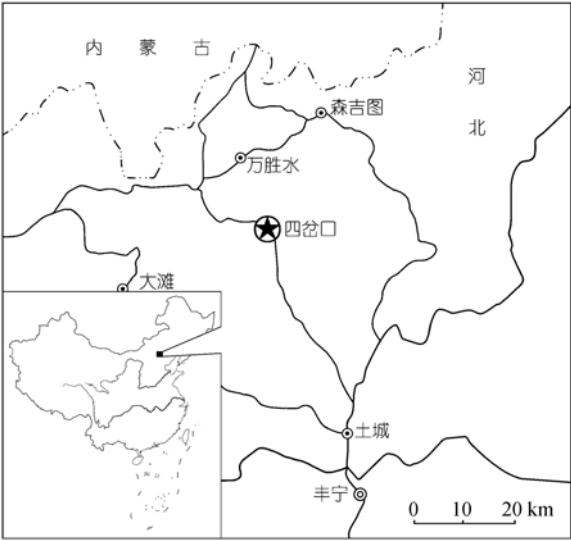


图 1 河北丰宁四岔口盆地的地理位置简图

河北丰宁四岔口盆地位处大兴安岭-太行山构造岩浆带与内蒙地轴的结合部位, 盆地的形成与发展明显受北北东向构造应力场的控制. 盆地在含鸟类化石的地层沉积时期, 东西宽可能不及 10 km, 但南北长可达 30 km; 盆地的沉积中心偏南, 位于红千沟-

芥菜沟附近.

有关四岔口盆地的地质研究程度较低. 自 1957 年以来, 相关部门涉及该区域地质与矿产资源的调查报告尚不到 20 份, 而专题地层古生物的研究基本上仍属空白. 在现有资料中, 原河北省地质局的 1:20 万上黄旗幅区域地质调查奠定了本区晚中生代地层的划分框架, 之后的地层划分方案与其大同小异(表 1). 毕子威和杨有世在 1:5 万区域地质调查工作的基础上, 讨论了森吉图-四岔口一带晚中生代地层的沉积序列与划分和对比, 但依据的主要是森吉图盆地的资料 [18].

四岔口盆地含原羽鸟等鸟类化石的地层为一套富含火山碎屑的河、湖相沉积(图 2: K_1h^2), 其上部为灰白、灰黄色流纹质岩屑、晶屑凝灰岩及角砾状凝灰岩, 凝灰质砂岩、粉砂岩与泥岩互层, 并夹多层页岩; 下部为灰白、灰褐色板状凝灰质粉砂岩、粉砂质泥岩、钙质泥岩夹凝灰岩和纸状页岩. 这套沉积在红千沟剖面的实测厚度有 251.3 m, 与下伏中基性火山岩(图 2: K_1h^1)整合或平行不整合接触. 原羽鸟等鸟类化石主要产于下部凝灰岩、泥岩、页岩互层的页岩中.

早年的工作中, 由于化石的采集和鉴定较为粗略, 甚至有误, 加之火山沉积岩层横向对比的困难, 四岔口盆地这一含鸟类化石的沉积岩段因被认为产热河生物群的 3 个典型代表成员(东方叶肢介、三尾类蜉蝣和狼鲭鱼), 而被命名为“金刚山组”或“西瓜园

表 1 河北丰宁四岔口-森吉图一带晚中生代地层划分沿革

河北省地质局 ^{a)} 1975			河北省地质矿产局 ^{b)} 1985			河北省地质矿产局 ^{c)} 1992			本文		
四岔口-森吉图			四岔口-万胜永			森吉图-大河西			四岔口-森吉图		
J ₃	青石砬组		K ₁	青石砬组		K ₁	青石砬组				
	建昌组	三段		花吉营组	下店玄武安山岩 过河道砂岩 火叫沟脑玄武安山岩 碾子沟砂岩 南营子玄武安山岩 桥头砂岩 小菜园安山岩 大成号凝灰岩 岔菜沟安山岩		花吉营组	第五火山岩段			
		二段						过河道沉积岩段			
		一段						第四火山岩段			
								碾子沟沉积岩段			
								第三火山岩段			
	金刚山组			K ₁	西瓜园组		K ₁	花吉营组	桥头沉积岩段		
	义县组	二段			大北沟组				二段	第二火山岩段	
		一段							一段	四岔口沉积岩段	
	张家口组			J ₃	张家口组		J ₃	张家口组		J ₃	张家口组

a) 河北省地质局. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:200000 上黄旗幅 K-50-XXI. 1975; b) 河北省地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:50000 万胜永幅 K-50-77-D. 1985; c) 河北省地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查报告: 1:50000 森吉图幅 K-50-78-A, 大河西幅 K-50-78-C. 1992

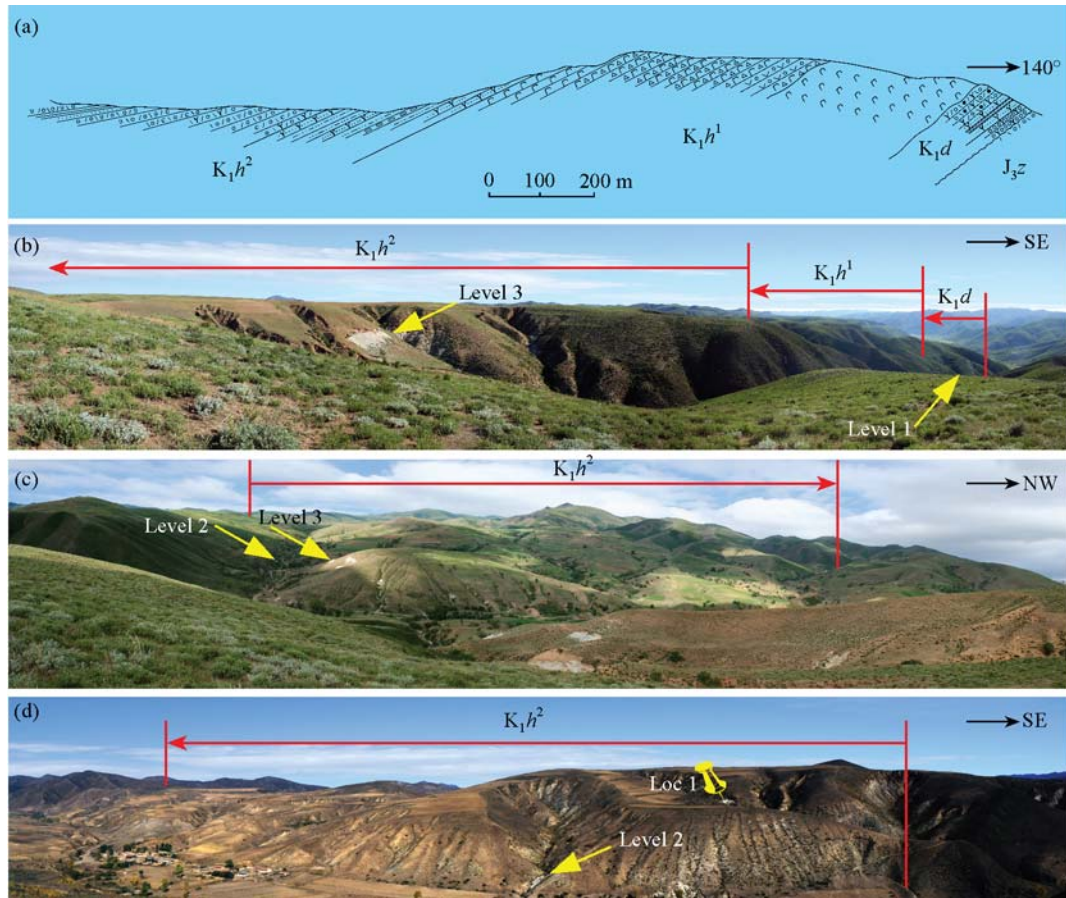


图2 河北丰宁四岔口盆地早白垩世花吉营组四岔口沉积岩段剖面图

(a) 红千沟实测剖面(简化自河北省地质局, 1975, 图II~14); (b) 油房西沟门剖面; (c) 油房尖长沟剖面; (d) 芥菜沟剖面。K₁h², 花吉营组四岔口沉积岩段; K₁h¹, 花吉营组第一火山岩段; K₁d, 大北沟组; J₃z, 张家口组。Level 1, 北票鲟始现层; Level 2, 原羽鸟产出层; Level 3, 鸟类化石富集层; Loc 1, 原羽鸟产出地点

组”,在横向上与森吉图盆地的含鸟类化石沉积岩段亦未加区分,以致后来的一些报告中将两者完全等同对比。

在对四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段的多次野外考察和两次较大规模的化石发掘中,我们从未发现确切无疑的森吉图盆地含鸟类化石沉积岩段所常见的标志性属种,如戴氏狼鳍鱼(*Lycoptera davidi* (Sauvage));而四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段常见的鱼类和鸟类化石,显示出比森吉图盆地含鸟类化石沉积岩段或相当层位同类化石原始的特征^[13~17],这表明2个沉积岩段应分属不同时期的沉积。最近,河北省区域地质矿产调查研究所野外地层横向追索中,亦发现前者伏于后者之下(康子林等,个人通讯)。

除了脊椎动物,四岔口盆地的含鸟类化石沉积岩段还产植物和无脊椎动物的腹足类、双壳类、叶肢

介、介形类、昆虫与蜘蛛等化石,其中尤以植物和昆虫化石较为丰富。我们在含鸟类化石层及其上下岩层中采集的无脊椎动物包括:大盘螺未定种(*Amplivalva* sp.),凌源额尔古纳蚌(*Arguniella lingyuanensis* (Gu))、热河球蚬(*Sphaerium jeholense* (Grabau)),三道沟亚洲叶肢介(*Asioestheria sandogouensis* Wang)、南营盘亚洲叶肢介(*A. nanyingpanensis* Wang)、亚洲叶肢介未定种(*Asioestheria* sp.)、西顺井燕山叶肢介(比较种)(*Yanshanina* cf. *xishunjingensis* Wang)、燕山叶肢介未定种(*Yanshanina* sp.),刺星介未定种(*Rhinocypris* sp.)、蒙古介未定种(*Mongolianella* sp.)、优越蒙古介(比较种)(*M. cf. palmosa* Mandelstam)以及燕山介?未定种(*Yanshanina* ? sp.)。已初步鉴定的这些无脊椎动物化石中,腹足类、双壳类和介形类多为辽西义县组下部和冀北大店子组常见的分子;但叶肢介则为多见于

冀北大北沟组和大店子组的种类。此外,很有意义的是在四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段所产的无脊椎动物化石中,既无辽西义县组的典型分子,如东方叶肢介(*Eosestheria*)、女星介(*Cypridea*),也无冀北大北沟组的标志性属种,如尼斯托叶肢介(*Nestoria*)、背角叶肢介(*Keratestheria*)、滦平介(*Luanpingella*)、始似女星介(*Eoparacypripis*)。

此外,在四岔口盆地张家口组酸性火山岩之上的第一个沉积岩段(图 2: K₁d),我们还发现了鱼类的零散骨骼、丰富的双壳类以及少量的叶肢介化石。这一沉积岩段上部为灰白色凝灰岩、凝灰质砂岩和粉砂岩;下部为灰绿、灰褐色凝灰质粉砂岩、泥岩,夹薄层页岩,底部含砾岩。这套沉积在红千沟剖面的实测厚度有 76.7 m。上述化石主要见于下部的泥岩和页岩中,初步鉴定有北票鲟未定种(*Peipiaosteus* sp.),额尔古纳蚌(未定多种)(*Arguniella* spp.),西顺井优美叶肢介(*Abrestheria xishunjingensis* Wang)、西顺井优美叶肢介(比较种)(*A. cf. xishunjingensis* Wang)、似卵形优美叶肢介(比较种)(*A. cf. subovato* Wang)和优美叶肢介未定种(*Abrestheria* sp.)。优美叶肢介广泛分布于冀北和内蒙东南部的大北沟组及与其相当的地层中,其中的似卵形优美叶肢介在冀北滦平盆地可上延到大店子组下部。

综合以上化石资料以及地层接触关系,可以确定四岔口盆地的含鸟类化石沉积岩段与相邻的森吉图盆地含鸟类化石沉积岩段的层位并不相同,前者应位于后者之下;四岔口盆地的含鸟类化石沉积岩段和含北票鲟未定种与优美叶肢介等化石的第一个沉积岩段在横向对比上,大致分别相当于滦平盆地的大店子组和大北沟组。考虑到重新厘定岩组的条件尚不成熟,我们在此暂将四岔口盆地的第一个沉积岩段仍然划归大北沟组,含鸟类化石沉积岩段与其下伏的中基性火山岩段则一并划归花吉营组,作为本区该火山沉积岩组的二段和一段(表 1; 图 2)。

2 热河生物群的脊椎动物化石早期组合

在四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段中,最早发现的脊椎动物化石是丰宁北票鲟(*Peipiaosteus fengningensis* Bai)和长背鳍燕鲟(*Yanosteus longidorsalis* Jin et al.)^[14]。我们在 2000 年和 2007 年的发掘中,发现该岩段下部的很多岩层富含北票鲟和燕鲟化石,其中有不少个体很大的材料,表明这两种鲟形鱼类

在当时已颇为繁盛。

四岔口盆地的鸟类化石开始发现于 20 世纪 90 年代后期,最早记述的就是如今著名的丰宁原羽鸟(*Protopteryx fengningensis* Zhang et Zhou)^[17]。迄今,在四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段中发现的鸟类化石已数以百计,其中有相当数量的新属种仍有待科学研究。结合已发现的大量植物和昆虫化石,推测当时的四岔口盆地已是相当繁荣的生态景象。

除了鱼类和鸟类,当地的化石爱好者侯志启于 20 世纪 90 年代后期曾在芥菜沟南侧含原羽鸟的岩层中发现过有尾两栖类化石。我们在 2007 年的发掘中亦发现了一个不完整的哺乳动物下颌化石。短短十年间,在四岔口盆地含鸟类化石沉积岩段发现的脊椎动物化石已包括鱼类、两栖动物、鸟类和哺乳动物四大类。相信随着工作的深入,爬行类化石的发现亦指日可待。

冀北的中生代鸟类化石最初发现于森吉图盆地。该盆地与四岔口盆地相邻(图 1),其已知的鸟类化石全部发现于桥头-大骡子沟一带的沉积岩段(本文的花吉营组桥头沉积岩段),已记述的属种有滦河冀北鸟(*Jibeinia luanhera* Hou)^[15]和河北细弱鸟(*Vescornis hebeiensis* Zhang et al.)(= *Hebeiorins fengningensis* Yan (nom. nud.))^[16,19]。此外,相同层位还发现了可能属于伤齿龙类的带羽毛的恐龙——华美金凤龙(*Jinfengopteryx elegans* Ji et al.)^[20,21],以及哺乳动物真三尖齿兽类的阿氏燕兽(*Yanoconodon allini* Luo et al.)^[22]。森吉图盆地桥头含鸟类化石沉积岩段的鱼类化石丰富程度远大于四岔口盆地的含鸟类化石沉积岩段,除了四岔口已有的两种鲟形鱼类外,还出现了匙吻鲟类的原白鲟(*Protosephurus* sp.),以及丰富的真骨鱼类的戴氏狼鳍鱼(*Lycopera davidi* (Sauvage))和被认为是戴氏狼鳍鱼同物异名的德永氏狼鳍鱼(*L. tokunagai* Saito)^[23]。

比较四岔口和森吉图盆地 2 个不同含鸟类化石沉积岩段的脊椎动物化石,发现两者不但在组成上有一定的差异,而且在类群分异度与属种特征状态上亦有明显不同。丰宁原羽鸟是迄今为止发现的最原始的反鸟。反鸟类(*Enantiornithes*)作为中生代重要的一个鸟类单系类群,在义县组和九佛堂组均有许多重要的代表属种,九佛堂组的反鸟类化石(如华夏鸟、长翼鸟)明显较义县组的反鸟类(如始反鸟、辽西鸟)进步,而目前原羽鸟的层位尚未发现其他反鸟类

的种类,因此在反鸟类的分异度上明显低于义县组
和九佛堂组.四岔口盆地发现的另一种鸟类,与孔子
鸟的关系很密切,至少可以归入孔子鸟科,但特征明
显较义县组发现的孔子鸟类原始.四岔口和森吉图
的鲟类化石在现有的文献中,虽然归入了相同的属
种,但随着标本的增加,还是可以观察到一些特征差
别.如四岔口发现的北票鲟,体型更为侧扁、尾鳍的
背棘鳞更为发育,显示了北票鲟类的近祖特征状态.
此外,2个层位所含鱼类化石很大的差异就是四岔口
盆地含鸟类化石沉积岩段中,未见无疑的狼鳍鱼类.
因此,这两个含鸟类化石沉积岩段的脊椎动物化石
明显可划分为两个组合,四岔口沉积岩段的丰宁北
票鲟-丰宁原羽鸟组合与森吉图桥头沉积岩段的戴氏
狼鳍鱼-滦河冀北鸟组合.前一组合的生存时代大致
为距今 130.7 Ma^[24],是迄今所知热河生物群最早的
脊椎动物化石组合;后一组合的确切年代目前还不
十分清楚.

四岔口盆地的第一个沉积岩段已开始出现北票
鲟,这是脊椎动物化石在本区的始现层位.相邻森吉
图盆地茶棚剖面的大北沟组中下部,北票鲟亦已开
始出现.此外,滦平盆地的大北沟组近底部含有尾两
栖类化石.这些线索表明还可能存在另一个比丰宁
北票鲟-丰宁原羽鸟组合更早的脊椎动物化石组合.

由于火山沉积岩层的复杂多变,地层的横向对
比十分困难,尤其是跨区的对比,目前最为直接有效
的手段仍是依据生物组合和单系类群中亲缘关系较

为密切的种类间的比较.冀北丰宁四岔口和森吉图
盆地新确立的2个早期脊椎动物组合,亦为地层的跨
区横向对比提供了依据.如戴氏狼鳍鱼-滦河冀北鸟
组合,其面貌与辽西凌源义县组大王杖子层(=大新
房子层)的脊椎动物化石十分相近,尤其是已知的鱼
类均为丰宁北票鲟、长背鳍燕鲟、刘氏原白鲟、戴氏
狼鳍鱼和德永氏狼鳍鱼^[14,23],组成完全相同,就鱼类
化石而言无疑可归入同一组合,据此可认为冀北丰
宁的花吉营组桥头沉积岩段与辽西凌源的义县组大
王杖子层相当(图 3).如果冀北与辽西的这一地层对
比关系无误,则含著名的孔子鸟类群的北票尖山沟
层(=炒米甸子组、四合屯组等)的层位仍有待进一步
确定.尖山沟层以往大多与凌源的大新房子层(现在
多称为大王杖子层)对比,但亦曾作为辽西义县组最
下部的含化石沉积岩夹层^[25].尖山沟层的已知鱼类
有潘氏北票鲟(*Peipiaosteus pani* Liu et Zhou)和中华
狼鳍鱼(*Lycoptera sinensis* Woodward),潘氏北票鲟以
其较为扁平的体型、退化以至消失的尾鳍背棘鳞等特
征,明显比丰宁北票鲟进步;中华狼鳍鱼最初发现于
山东莱阳盆地的莱阳组中上部,早年曾与义县组金
刚山层所产的室井氏狼鳍鱼(*Lycoptera muroii* (Takai))
等一并归入亚洲鱼属^[14,23].尖山沟层以孔子鸟为代
表的早期鸟类已相当繁盛,并已经出现了今鸟类的
长趾辽宁鸟(*Liaoningornis longiditris* Hou).因此,从
鱼类和鸟类化石的面貌看,北票尖山沟层的层位不
会低于凌源的大王杖子层,甚至很有可能高于大王

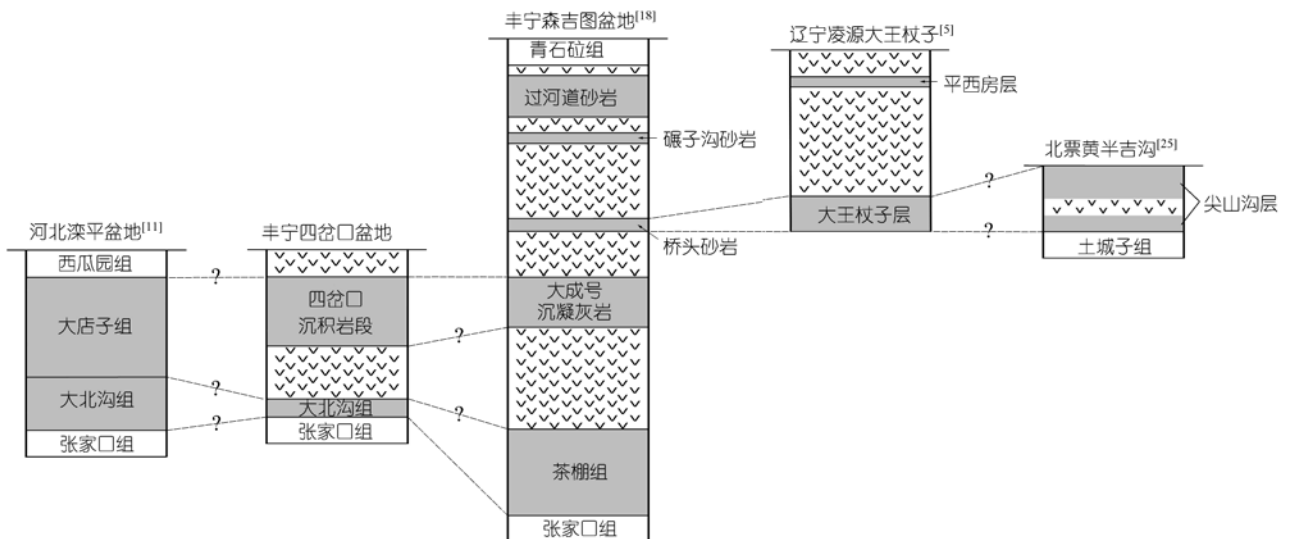


图 3 冀北-辽西含热河生物群早期组合化石的沉积岩段的对比

杖子层. 当然, 这仍有待于更多门类生物化石的组合来确认.

3 存在问题

冀北地区的滦平、丰宁、围场以及相邻的内蒙赤峰和多伦等地, 普遍发育了蕴含热河生物群早期属种的沉积. 这些沉积在不同的资料中, 被分别划归大北沟组、金刚山组、西瓜园组、花吉营组或义县组, 亟待在今后的工作中通过系统的野外考察和化石采集加以识别和清理.

丰宁四岔口盆地的基础地质工作与森吉图盆地相比^[5,18,26,27], 更显薄弱. 以含鸟类化石沉积岩段为例, 现有的无脊椎动物和植物化石资料仍很零星, 虽然迄今没有发现冀北大北沟组和辽西义县组的标志性化石, 同时也缺乏本沉积岩段的标志性化石和各种无脊椎动物化石带与植物化石组合, 从而严重影响了地层的精确划分和对比. 此外, 四岔口和森吉图目前的火山沉积岩组花吉营组包含了多个喷发沉积旋回, 地层厚度达四千余米, 堪比一个岩群(图3), 亦有待在今后的工作中进一步予以厘定.

热河生物群的研究历史已逾百年, 但迄今对该生物群的定义尚无一致的观点. 自葛利普 1923 年和 1928 年分别命名热河系和热河动物群以来, 其含义几经变化, 一度曾扩展到包括相当于辽西义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组 4 个岩组的地层与其所含的生物化石^[28]. 近年来, 较为流行的热河生物群观点基本上仅限于辽西义县组、九佛堂组及与其相当层位的地层中的化石, 即以经典的东方叶肢介、三尾类蜉蝣和狼鳍鱼为代表的生物群^[1,2]. 这种认识排除了冀北等地大北沟组和大店子组下部以及相当层位地层中的化石, 因为虽然三尾类蜉蝣在大北沟组就已出现, 但无疑的狼鳍鱼到大店子组的顶部才开始出现. 事实上, 这些层位的化石, 尤其是大店子组的生物与

热河生物群的关系十分密切, 代表了该生物群的早期演变历史. 因此, 我们认为应该以控制生物阶段性发展的大尺度构造沉积旋回来界定热河生物群, 上限与下限分别以沙海和阜新组为代表的扇三角洲与湖沼相含煤沉积开始和以张家口组酸性火山岩为代表的喷发沉积旋回结束来界定, 热河生物群则应包含限内以中基性火山岩为特征的喷发沉积旋回中的各门类生物化石. 就脊椎动物化石而言, 以北票鲟替代狼鳍鱼作为热河生物群的代表化石, 更符合我们以上对该生物群的界定.

近年来, 冀北、辽西热河生物群的重要化石产出层位的同位素测年有了很大的进展, 但遗憾的是对冀北和辽西地层对比具有关键作用的层位花吉营组桥头沉积岩段和义县组大王杖子层, 虽然已有一些测年数据(122.1~126.9 Ma), 但因为不够精确可信而未得到普遍接受^[3,6,29]. 在此, 亦作为一个有待解决的问题提出.

4 结论

原羽鸟是迄今已知最原始的反鸟类化石, 其鸟类组合明显较义县组的鸟类组合原始. 综合同层位鱼类、鸟类、腹足类、双壳类、叶肢介、介形类等化石组合的特征和比较, 以及地层接触关系, 初步确认原羽鸟的层位低于辽西凌源的义县组大王杖子层, 大致相当于冀北滦平的大店子组, 是目前国内鸟类化石与世界上反鸟类的最低产出层位.

与原羽鸟伴生的还有一定数量的其他鸟类, 以及大量的鲟形鱼类与有尾两栖动物和哺乳动物, 据此可建立一个新的脊椎动物化石组合——丰宁北票鲟-丰宁原羽鸟组合. 这一组合是迄今所知热河生物群最早的脊椎动物化石组合, 将热河生物群中脊椎动物的演变历史至少推进到 130.7 Ma 前.

致谢 本文撰写过程中, 得到中国地质科学院地质研究所王思恩研究员多方面的帮助, 叶肢介、腹足类、双壳类、介形类化石分别由王思恩和中国科学院南京地质古生物研究所潘华璋、陈金华和曹美珍研究员鉴定, 两位审稿专家为本文初稿提出了建设性的修改意见, 在此一并谨致谢忱.

参考文献

- 1 Chang M M, Chen P J, Wang Y, et al. The Jehol Biota, the Emergence of Feathered Dinosaurs, Beaked Birds and Flowering Plants. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003

- 2 Zhou Z H, Barrett P M, Hilton J. An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem. *Nature*, 2003, 421: 807—814[[doi](#)]
- 3 季强, 陈文, 王五力, 等. 中国辽西中生代热河生物群. 北京: 地质出版社, 2004
- 4 周忠和. 热河生物群脊椎动物的辐射及其环境背景. *科学通报*, 2004, 49(8): 718—720
- 5 王五力, 张宏, 张立君, 等. 土城子阶、义县阶标准地层剖面及其地层古生物、构造-火山作用. 北京: 地质出版社, 2004
- 6 Zhou Z H. Evolutionary radiation of the Jehol Biota: Chronological and ecological perspectives. *Geol J*, 2006, 41: 377—393[[doi](#)]
- 7 王思恩. 冀北晚期中生代地层研究. 地层古生物论文集. 第 15 辑. 北京: 地质出版社, 1986. 161—180
- 8 王思恩. 热河动物群的起源、演化与机制. *地质学报*, 1990, 64(4): 350—360
- 9 田树刚, 柳永清, 李佩贤, 等. 冀北滦平侏罗-白垩系层序地层学研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(9): 871—880
- 10 李佩贤, 柳永清, 田树刚. 冀北滦平盆地陆相侏罗系-白垩系岩石地层研究新进展. *地质通报*, 2004, 23(8): 757—765
- 11 田树刚, 庞其清, 牛绍武, 等. 冀北滦平盆地陆相侏罗系-白垩系界线候选层型剖面初步研究. *地质通报*, 2004, 23(12): 1170—1179
- 12 庞其清, 田树刚, 李佩贤, 等. 冀北滦平盆地大北沟组-大店子组介形类生物地层和侏罗系-白垩系界线. *地质通报*, 2006, 25(3): 348—356
- 13 金帆, 田燕平, 杨有世, 等. 河北丰宁早期鲕类化石一新属. *古脊椎动物学报*, 1995, 33(1): 1—16
- 14 金帆. 冀北、辽西中生代中晚期鲕形鱼类化石. *Palaeo world*, 1999, 11: 188—280
- 15 侯连海. 中国中生代鸟类. 南投: 台湾省立凤凰谷鸟园, 1997
- 16 徐桂林, 杨有世, 邓绍颖. 河北省中生代鸟类化石的首次发现及意义. *中国区域地质*, 1999, 18(4): 444—448
- 17 Zhang F C, Zhou Z H. A primitive enantiornithine bird and the origin of feathers. *Science*, 2000, 290: 1955—1959[[doi](#)]
- 18 毕子威, 杨有世. 冀北森吉图-四岔口一带晚中生代地层新认识. *中国区域地质*, 1992, (3): 211—218
- 19 Zhang F C, Ericson G P, Zhou Z H. Description of a new enantiornithine bird from the Early Cretaceous of Hebei, northern China. *Can J Earth Sci*, 2004, 41: 1097—1107[[doi](#)]
- 20 季强, 姬书安, 吕君昌, 等. 中国发现世界上最原始的鸟类化石: 华美金凤鸟(新属、新种)(*Jinfengopteryx elegans* gen. et sp. nov.). *地质通报*, 2005, 24(3): 197—210
- 21 Xu X, Norell M A. Non-avian dinosaur fossils from the Lower Cretaceous Jehol Group of western Liaoning, China. *Geol J*, 2006, 41: 419—437
- 22 Luo Z X, Chen P J, Li G, et al. A new eutriconodont mammal and evolutionary development in early mammals. *Nature*, 2007, 446: 288—293[[doi](#)]
- 23 金帆, 张江永, 周忠和. 辽宁西部晚中生代鱼群. *古脊椎动物学报*, 1995, 33(3): 169—193
- 24 He H Y, Wang X L, Jin F, et al. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the early Jehol Biota from Fengning, Hebei Province, northern China. *Geochem Geophys Geosyst*, 2006, 7, Q04001 [[doi](#)]
- 25 陈丕基, 王启飞, 张海春, 等. 论义县组尖山沟层. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(10): 883—895
- 26 柯东昂, 国继华. 冀北早白垩世地层划分. *中国区域地质*, 1997, 16(3): 315—320
- 27 任东, 尹继才, 黄伯衣. 河北丰宁中生代晚期昆虫群落与生态地层的初步研究. *地质科技情报*, 1999, 18(1): 39—44
- 28 金帆. 辽宁西部晚中生代地层研究之进展及存在问题. *古脊椎动物学报*, 1996, 34(2): 102—122
- 29 金帆. 评介 Smith 等的热河群 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年结果. *古脊椎动物学报*, 2001, 39(2): 151—156