

周浙昆,周忠和,王恽. 陆地生态系统与地球环境的协同演化[J]. 地球科学进展, 2016, 31(7): 682-688, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.07.0682. [Zhou Zhekun, Zhou Zhonghe, Wang Yi. Coevolution between terrestrial ecosystem and Earth environment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(7): 682-688, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2016.07.0682.]

陆地生态系统与地球环境的协同演化*

周浙昆¹, 周忠和², 王恽³

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 西双版纳 666303; 2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; 3. 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:陆地生态系统与地球环境协调演变是地球科学和生命科学研究的热点和重点,从志留纪有颌类的演化,新疆泥盆纪最早森林的出现,白垩纪缅甸琥珀中昆虫的多样性,始新世—渐新世转换期灵长类的演变以及碳同位素、硫同位素、四醚膜类脂物(GDGTs)等地球化学,甘肃临夏盆地的早更新世龙担动物群及青藏高原及其邻区所特有的裂腹鱼类,伍氏献文鱼全身粗壮的骨骼与柴达木盆地干旱的相关性研究,亚洲季风对生物多样性影响,西藏芒康新生代植物群,沉积环境对化石保存的影响,利用古地磁,哺乳动物等手段构建高精度的地层系列等多项研究报道了这一领域的最新研究进展。

关键词:陆地生态系统;地球环境;协同演化;古脊椎动物;古植物

中图分类号:P531 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2016)07-0682-07

“陆地生态系统与地球环境的协调演化”专题围绕以下4个科学问题展开:主要陆生生物类群的起源、演化和分布及其与重大全球构造运动及古地理变迁的关系;地史时期植物群演变与环境变化的耦合关系;沉积环境对化石保存的影响和高精度地质年代的确定等。报告内容涉及古地理、古气候、构造运动、沉积学、化石埋藏等内容,均取得了一些新的发现和认识。

1 主要陆生生物类群的起源、演化和分布

颌的出现使脊椎动物由被动的滤食生活转向主动的捕食生活方式,大大提高了脊椎动物的取食与适应能力。自此以后,有颌脊椎动物或有颌类迅速向更广阔的生态位辐射,演化出包括人类在内的各大类群,构成了现生脊椎动物物种数的9.8%。志

留纪和早泥盆世期间,有颌类的快速辐射演化直接促成了泥盆纪鱼类的登陆。长期以来,志留纪有颌类化石极为稀少,即使有所发现也十分破碎,学界只能从这些一鳞半爪中“瞎子摸象”式地推测最早期有颌类的形态和演化。有颌脊椎动物崛起的格局始终笼罩在迷雾之中,相关研究举步维艰。随着近年来我国志留纪有颌类化石的系列发现与研究,中国南方已成为全球志留纪脊椎动物化石最重要的产出地区,有颌类起源与早期演化研究迅速成为学界高度关注的一个方向,譬如,志留纪鬼鱼的发现为深入探讨有颌类各大类群的相互关系提供了关键资料;宏颌鱼的发现促使研究者重新思考氧气含量变化与脊椎动物演化之间的关系;全颌鱼的发现为盾皮鱼纲与硬骨鱼纲之间的密切亲缘关系提供了强有力的证据,使得我们对有颌类崛起的格局有了更深刻的认识。云南潇湘脊椎动物群在世界上独一无二

收稿日期:2016-07-05;修回日期:2016-07-08.

* 基金项目:国家重点基础研究计划项目“四亿年以来中国陆地生物群演变及其与环境的关系”(编号:2012CB821900)资助。

作者简介:周浙昆(1956-),男,浙江建德人,研究员,主要从事古植物学研究. E-mail:zhouzk@xtbg.ac.cn

地完好保存了大量志留纪有颌类化石,为探索有颌类崛起的格局及其古地理、古环境背景打开了一扇全新的窗户^[1]。朱敏^[1]对志留纪潇湘脊椎动物群与早泥盆世西屯脊椎动物群之间演替过程进行了综合研究,揭示了有颌类早期分化与环境的协同演变关系。

泥盆纪(420 ~ 350 Ma BP)是陆地植物起源与演化的早期阶段,也是陆地生态系统和景观发生显著改变的地质时期。到中泥盆世时,陆生植物多样性显著提高,除被子植物以外的所有植物类型在中泥盆世的化石记录中均已被发现。在植物的生殖策略方面,营孢子生殖的植物首次出现了异孢生殖现象,出现了最早的种子植物,植物生活型也发生多样性分化,出现了草本和乔木类型,陆地景观中出现了第一片森林。目前的研究表明,最早的乔木植物至少有3个类群:石松类、早期真蕨类(枝蕨)和前裸子植物类。我国泥盆纪地层非常发育,分布广泛,产有多门类的植物化石,既有全球广布的类群,也有地方性特有种。在我国中泥盆世地层中已经出现了煤层。我国泥盆纪植物化石的材料类型非常全面,构成最早森林的3种类型植物在我国的泥盆纪地层中均有化石记录,但是对石松类研究和报道较多,而对于其他2种类群的研究仍相对较少^[2]。最近徐洪河等^[2]在新疆北部中一晚泥盆世地层中,发现了一种硅化保存的枝蕨类化石,该植物茎干的直径可达70 cm,具有明确的次生木质部,是构成早期森林的一种非常特殊的植物。这些植物化石及其所保存的独特地层对于研究早期陆生植物的起源、演化、古植物地理以及系统分类均具有不可替代的重要意义。

琥珀中的化石是一种特殊的化石保存形式,一直备受古生物学家关注。缅甸琥珀分布于缅甸北部密支那省,时代为晚白垩世赛诺曼最早期(约100 Ma BP),出产了白垩纪数量和多样性最丰富的琥珀生物群。美国学者 Cockerell 从1916年开展对缅甸琥珀内含物的研究,描述了大量昆虫。尽管我国近代以来一直是缅甸琥珀最重要的集散地,但相关的科学研究却一直没有开展。王博等^[3]基于野外实地考察和新收集的大量标本,对缅甸琥珀生物群进行了再研究。迄今,已发现了昆虫纲(广义)和蛛形纲的几乎所有目级类群,并新发现了大量腹足纲、有爪类(栉蚕)、甲壳纲、唇足纲、多足纲、两栖纲、爬行纲、鸟纲代表以及大量的苔藓植物、蕨类植物、裸子植物和被子植物类群。同时,王博等还报道了缅甸琥珀中的双尾纲、螳螂目、竹节虫目等昆虫类群以

及蜘蛛、石蜈蚣、避日蛛、鞭蝎、短尾鞭蝎、螃蟹、青蛙等动物类群。这些研究结果极大地拓展了人们对该生物的认识。另外,他们还发现了一些重要的昆虫生态行为证据,例如育幼行为、社会行为、寄生行为、传粉行为等。这些行为学证据直接反映了昆虫、植物、脊椎动物之间复杂的生态关系,为重建白垩纪热带雨林生态系统提供了新线索和新见解。

2 地史时期植物群演变与环境变化的耦合关系

环境变化是生物演化的主要动力,然而,这一动力如何作用于生物的系统关系是较难检验的。灵长类是温度敏感性的哺乳动物,气候变化及与其相关的环境变化,对灵长类的分类的多样性和地理分布都表现出明显的相关响应,但是灵长类具体的系统分支演化如何响应环境变化,尚未有深入研究。始新世—渐新世转换期的古气候环境变化是新生代发生的最为剧烈的变化。在这段时间里,南极的冰盖急剧扩大,海平面急剧下降,森林大面积消失,热带雨林退缩到低纬度地区,干旱开阔的生境急剧扩展,地球由此从“温室”变成了“冰屋”。这一变化是全球性的,在欧洲被称为“大间断”,在亚洲北部则被称为“蒙古重建”。始新世—渐新世转换期的干冷气候导致灵长类大量灭绝。原来繁盛于北美、亚洲北部和欧洲的灵长类近乎完全灭绝。在非洲北部和亚洲南部仍然保留有热带丛林的区域,灵长类得以幸存,但灵长类动物群经历了显著的再组织过程。在非洲,狐猴型的灵长类在经历了始新世—渐新世转换期后几乎完全绝灭,只有少数小个体的种类生存下来,而类人猿的多样性急剧增加,占据了大多数的灵长类生态位。在亚洲的情况相反,狐猴型的灵长类几乎没有受到影响,但是类人猿的种类急剧减少,原有的大体型的类人猿都灭绝了。受迫于古气候环境剧变的压力,动物演化支系发生了明显的再组织,我们把这种现象归结为“演化滤器”效应,以区别于通常所知的“瓶颈”效应。始新世—渐新世过渡期这个“演化滤器”,强烈影响了灵长类动物的宏演化,使之演化轨迹发生巨大改变,这一变化直接导致现生类人猿主要支系的产生^[4]。

古新世/始新世极热事件(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM)是发生在古新世—始新世世界线附近的一次快速变暖事件,使得全球温度升高5~6℃,并造成了大规模生物灭绝、演替和迁移现象。目前, PETM 事件的触发机制被认为是海底天

然气水合物大量释放所导致的温室效应。然而,有关 PETM 事件的研究多集中在海洋,尚缺少对陆相沉积记录的研究,致使我们无法全面了解事件发生时陆地不同区域的气候响应和环境特征。王旭等^[5]选取了南阳盆地古新世—始新世时期的一套陆相泥灰岩沉积地层,开展了碳同位素、硫同位素、四醚膜类脂物(GDGTs)和元素与黏土矿物组成等多指标分析,揭示南阳盆地的气候与环境变化。在碳同位素记录中,有机碳和黑碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现出较大的负漂幅度(约-6‰),可能与当时较高的大气 CO_2 浓度以及湿度的增加有关。而微晶碳酸盐中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则记录了约-4‰的CIE,反映了汇水盆地系统中同位素变化的平均状况,与浮游有孔虫中观测到的CIE幅度相一致,意味着海—气系统碳同位素负漂的真实幅度可能接近于-4‰。同时,基于GDGTs重建的陆地温度表明在PETM事件发生前,存在一次 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的升温,并且在PETM事件发生过程中温度增加了 $7\text{ }^\circ\text{C}$,温度变化方式和趋势均与 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化相同步。这些结果与CIE前的增温现象共同表明温度增加的正反馈过程导致了巨量轻碳的释放,暗示着这些轻碳可能来自于地表某一个或多个巨大的有机碳库。元素地球化学和矿物学分析结果表明PETM时期随着温度的增加碳酸盐 Mg/Ca 和 Sr/Ca 摩尔比均显著降低,显示出降雨量的总体增加,这与地层中白云石矿物的消失和高岭石矿物的出现相一致。同时,化学风化指数(Chemical Index of Alteration, CIA)表现出增加的趋势,伴随着高岭石的出现,共同指示在温暖湿润气候的影响下周围汇水盆地成壤作用与硅酸盐风化的加强。碳酸盐晶格替代硫酸盐(CAS)硫同位素分析结果显示在PETM时期湖水中 SO_4^{2-} 含量总体较低,硫同位素比值出现3次升高的阶段,可能揭示湖水至少出现过3次显著分层的阶段。在水体分层时,总有机碳含量出现明显降低,可能指示水生植物生产力显著降低^[5]。

虽然现代亚洲哺乳动物群具有组成和生态上的独特性,但今天的喜马拉雅高山动物群的组成却非常相似于中国西北地区甘肃临夏盆地的早更新世龙担动物群。邓涛等^[6]提出了“取代假说”,通过动物群水平的分析,解释上新世青藏高原哺乳动物在第四纪时期向华北地区的时空扩散。喜马拉雅高山动物群和临夏盆地龙担动物群在灵长类、食肉类、奇蹄类和偶蹄类的组成上具有相同或相似的多样性,其中食肉类具有最大的多样性,分别在龙担动物群中

有16个种,喜马拉雅高山地区有14个种,说明龙担动物群明显带有寒冷地区动物群的结构特点。在属级水平上,龙担动物群中的猕猴(*Macaca*)、旱獭(*Marmota*)、河狸(*Castor*)、鼯鼠(*Myospalax*)、狐(*Vulpes*)、狼(*Canis*)、獾(*Meles*)、斑鬣狗(*Crocuta*)、豹(*Panthera*)、猫(*Felis*)、猞猁(*Lynx*)、马(*Equus*)、猪(*Sus*)、瞪羚(*Gazella*)和羚牛(*Budorcas*)是现生类型。在临夏盆地,龙担动物群紧接于上新世的十里墩动物群,但这2个动物群中仅有4个属是相同的,而十里墩动物群中只有7个属(占动物群的35%)延续到第四纪。龙担动物群中的泥河湾披毛犀(*Coelodonta nihowanensis*)在临夏盆地找不到祖先类型,相反,十里墩动物群的无角犀种类林氏山西犀(*Shansirhinus ringstroemi*)在第四纪之前就绝灭了。另一方面,已知最早的披毛犀——西藏披毛犀(*C. tibetana*)发现于青藏高原札达盆地的上新世地层中,距临夏盆地西南方向远至1600 km。札达盆地位于西藏西南部阿里地区印度河支流萨特累季河上游的象泉河流域,是青藏高原上已知产出哺乳动物化石最丰富的地点。札达动物群中的17个属(占动物群的71%)存在于华北地区的早更新世哺乳动物群中。札达盆地的上新世哺乳动物显示出寒冷适应性谱系的发端,它们是第四纪冰期动物群的先驱。在随后的更新世冰期来临时,随着全球变冷的背景和严寒环境的蔓延,这些能够耐受严寒的物种开始扩散并取代了华北地区适应于上新世温暖气候的哺乳动物类型。邓涛等^[6]研究表明青藏高原由此成为华北等地区第四纪哺乳动物群起源的摇篮。

青藏高原及其邻区所特有的裂腹鱼类因其形态特征的阶段性分化和栖息地的阶梯状分布与高原的阶段性隆升高度吻合,而被视为“系统演化与高原隆升并进”(Ascent with modification)的典型。现代裂腹鱼类根据体鳞、口须和咽齿的减少程度,被划分为原始、特化和高度特化3个演化等级,依次对应着它们在高原上由低到高的分布范围和高原隆升历史的不同阶段。寻找这3个等级的化石代表以及等级之间的过渡类型以及裂腹鱼类的鲃类祖先,可以了解这一独特类群随高原隆升而逐渐演化的历史,并据此反推各地质历史时期不同演化阶段的裂腹鱼类栖息地的古高度。除了上述裂腹鱼类的化石近亲以及其他鲤科鱼类外,吴飞翔^[7]最近在西藏中部的尼玛、伦坡拉盆地晚渐新世地层中新发现了众多保存完整的攀鲈类(鲃形目)骨架。现生攀鲈主要分布于南亚、东南亚和非洲中西部的热带平原,其余的少

数种类分布于南非东南部的沿海平原。其生态习性非常独特:因为具有由第一对鳃弓部分骨骼特化而成的呼吸空气的迷鳃(labyrinth organ),且这一器官在很大程度上取代了鳃的功能,这些鱼类必须不时地冒出水面直接呼吸空气。它们偏好季节性缺氧的浅静水体,甚至某些种类可以在湿润的条件下离开水体在陆上“行走”。西藏的攀鲈化石保存精良,在电镜下甚至能窥得其迷鳃的残余结构,可知其与现代攀鲈有着相似的生态习性和栖居环境。攀鲈出现在古近纪末的高原中部,与同层的植物化石(如棕榈、栾树、马蹄荷等)一起,显示高原腹地当时的气候非常温暖湿润,其海拔可能在1 000 m。目前已知的青藏高原新生代鱼化石所指示的古高度及环境类型,与新近基于构造学、地球物理学和地球化学等方法重建高原古高度的结论反差较大。更多的化石类型,特别是对环境(尤其是古高度)指示性更强的鱼化石的出现,或可为补充和修正已有的高原构造隆升模型提供较可靠的独立证据^[7]。

自新近纪以来,柴达木盆地经历了持续的干旱化,以往对干旱化过程的了解,主要是通过盆地中的蒸发岩和耐盐的无脊椎动物化石如介形类等。张弥曼^[8]根据形态学特征将采自柴达木盆地中部偏西的鸭湖背斜轴部的上新统狮子沟组地层的鱼类化石,定为鲤科(Cyprinidae)中的裂腹鱼亚科(Schizothoracinae)的一个新属新种,并将它命名为伍氏献文鱼(*Hsianwenia wui*)。伍氏献文鱼是一个原始的裂腹鱼亚科鱼类,裂腹鱼亚科鱼类是广义的鲃亚科(Barbinae sensu lato)中的一个单系类群。伍氏献文鱼全身长有粗壮的骨骼,这一形态特征与地中海北岸西班牙、意大利、希腊等地中新世末期墨西哥干旱期的蒸发岩(主要是碳酸钙和硫酸钙)中全身骨骼增粗的厚尾秘鲈(*Aphanius crassicaudus*)相似。虽然伍氏献文鱼和厚尾秘鲈的时代不同(上新世和中新世末期),生活的环境也不相同(湖水和海水或泻湖),它们却有许多相似的地方:二者全身骨骼均变粗,而且这种极度增粗的骨骼对于这2种鱼类的生活并无大碍;在2种鱼中,越大的鱼骨骼越粗;在大多数化石地点只有1种鱼,说明外界环境不允许多种鱼类生存;它们各自的现生代表均具有广盐性;二者均产自富含碳酸钙和硫酸钙的地层中。因此可以认为,伍氏献文鱼和厚尾秘鲈全身的骨骼都变得很粗是由于它们生活水域的钙含量特别高,并非先天遗传。在采集伍氏献文鱼的鸭湖背斜的西北方向的鄂博梁背斜的轴部出露的是上油砂山组,向东南方

向延伸到含伍氏献文鱼的狮子沟组之下。上油砂山组中发现的零散鱼骨都是发育正常的,并没有变粗。在同一层位采集的孢粉样品香蒲属(*Typha*)占82.9%,说明当时的水域应是淡水。可以想象,当上油砂山组沉积时,当地尚为十分宽广的淡水水域。待到狮子沟组沉积时,水体已经缩小,水域中的钙含量已相当高,以至于生活其中的鱼类全身的骨骼都变得很粗。而狮子沟组之上的七个泉组中,鱼类化石已经绝迹,纯石膏层随处可见。从上油砂山组到狮子沟组到七个泉组的过渡,展示了晚新生代这一地区的逐渐干旱化。全身骨骼变粗的伍氏献文鱼见证了柴达木盆地的干旱化^[8]。

季风气候的特征是大气环流季节性反转所引起的干湿季交替,其形成、演变与青藏高原隆升密切相关。以冬春季干旱为特征的亚洲季风气候,必然会影响到植物对水分的利用效率,从种子保存、萌发和幼苗生长等方面从个体水平影响植物的生长发育,植物也会因此产生适应、迁移或灭绝的响应,从而导致植物区系成分和植被类型的变化。周浙昆等^[9]的研究表明:新近纪云南的年均温,最热月均温和最冷月均温稍高于现在,但是降雨显著高于现在,而且降雨分布较为均匀,季节性小于现在,从中新世到现在,季风强度逐步增强。北美红杉、雪松和水杉的化石历史和种子生物学的研究表明,北美红杉和雪松在中国的灭绝和季风强度逐步增强、冬春季干旱加剧有显著关系。北美红杉是美国西海岸的特有种,而在中新世北美红杉在云南和东亚许多地区都有分布;现代北美红杉每年10月种子成熟,12月种子落地随即萌发,北美红杉现在的分布地是地中海型气候,冬春季是全年降雨最多的时期;在季风气候条件下,冬春季是全年最干旱的时期,我们推测季风气候逐步增强是北美红杉在东亚灭绝的原因,雪松灭绝的原因和北美红杉十分相似。孑遗植物分布区变迁过程也验证了上述假说,孑遗植物现在主要集中在冬春季降雨相对较为丰富中国中部和东部地区^[9]。

青藏高原隆升及其对环境变化和生物多样性演变的影响长期以来就是地质学家和生物学家们广泛关注的热点和难点问题。苏涛等^[10]近年来在西藏东部芒康县卡均村海拔约4 000 m的古新统采集到了大量植物化石并对其进行深入研究。该植物群(卡均植物群)种类丰富,有裸子植物4个属,被子植物36个形态种,以常绿类青冈亚属(*Quercus subgenus Cyclobalanopsis*)植物为优势种,兼有落叶类桦木科植物,同时发现其他的伴生植物类群,如扁柏属

(*Chamaecyparis*)、胡颓子属(*Elaeagnus*)、山胡椒属(*Lindera*)、铁杉属(*Tsuga*)、莢迷属(*Viburnum*)、杜荆属(*Vitex*)等。从植物类群的组合上看,代表了常绿落叶阔叶林植被类型。通过物种海拔共存区间分析,并排除地质时期气候变化的影响,该地区在古近纪(大约早渐新世)已经达到 3 000 m 左右,但是还不及现在的海拔高度。通过气候—叶相多变量分析程序(Climatic Leaf Analysis Multivariate, CLAMP)定量重建卡均植物群的古气候表明,当时的年均温为低于该地区现在,而年降雨高于现在,降雨的季节性变化远不及现在。综合上述结果表明,西藏东部自晚中新世以来经历了继续隆升的过程,高原的隆升使得该地区气候逐渐转冷变干,季风气候进一步增强。芒康县卡均植物群的发现,对于认识西藏东部的隆升历史以及古环境变化提供了重要的化石证据^[10]。

3 沉积环境对化石保存的影响

与其他类型的湖泊相比,火山成因湖泊沉积物中产出的化石不仅种类多、数量丰富,保存也特别精美,如冀北辽西—内蒙古东南部地区中—晚侏罗世、早白垩世、美国科罗拉多州始新世、德国麦塞尔始新世、山东省临朐县中新世、日本盐原更新世湖泊等。这些沉积物中不仅产有大量的水生动物,还包含丰富的“外来”的陆生动物化石,如鸟类、非鸟类恐龙和哺乳动物等。火山成因湖泊有利于化石特异埋藏的机制,如陆生生物是如何死亡,遗体是如何被完整地保存到湖泊中,软体组织如何被保存等问题,还没有得到很好的回答。保存于火山成因湖泊中的陆生动物化石及其赋存岩层直接记录了生物死亡时期的环境信息。姜宝玉^[11]的研究以冀北—辽西—内蒙古东南部地区中—晚侏罗世和早白垩世火山成因的古湖泊为例,通过对陆生动物化石及其赋存的岩层进行沉积学、埋藏学和地球化学的综合研究,探寻生物的死亡、遗体的搬运埋藏和化石化过程,探讨火山成因湖泊有利于化石特异埋藏的机制。

索伦霍芬灰岩以产出始祖鸟而闻名于世,但其化石产出的丰度较低。而 *Leptolepides sprattiformis* (鱼)的产出方式是一个例外,通常密集出现在层面上,有时每平方米的密度可高达 300 多个。泮燕红等^[12]通过对收藏在 Eischtate 和 Solnhofen 2 个博物馆的 3 个 *Leptolepides sprattiformis* 鱼化石集群进行了埋葬学研究,分别统计和分析了 10 个埋葬特征,包括平面分布长轴的方向,脊柱弯曲的方向和弯曲的

程度,下颞的闭合程度,鱼鳍的闭合程度,脊椎的错位情况,骨骼的完整性等。揭示了它们集群死亡的原因和埋葬的过程,并讨论了当时的海水环境和气温。同时证实鱼化石中出现的脊柱后弯是一个死亡后的埋葬特征,并不能作为突然死亡而发生僵直反应的指示特征。最后与辽西热河生物群义县组狼鳍鱼化石集群的埋葬特征进行了对比,讨论了造成埋葬差异的环境因素。通过对索伦霍芬 *Leptolepides sprattiformis* 鱼化石集群和热河生物群狼鳍鱼化石集群这 2 个案例的分析,证实对大量埋葬特征的统计分析,不仅可以解析化石死亡到掩埋所经历的过程,同时还可以提供丰富的古环境信息,如水深、水化学条件、水动力状态和气温等^[12]。

4 高精度地层年代框架

青藏高原东南缘云南地区的晚新生代沉积盆地在古生物地层学、生物演化(特别是古猿演化)与环境变化关系等方面具有重要意义。邓成龙等^[13]对云南地区产出重要植物群和动物群的沉积盆地(包括昭通盆地、小龙潭盆地、大理盆地和文山盆地等)进行了高分辨率的磁性地层年代学研究,建立了这些盆地的高分辨率磁性地层年代学框架和沉积环境演变序列,主要结果如下:昭通盆地记录了 C3Br 负极性时到 C2An. 1n 正极性时之间的沉积,相应的地层年龄为 8 ~ 3 Ma,即中新世晚期到上新世晚期,其中昭通盆地发现的禄丰古猿化石及其伴生哺乳动物群产于 C3An. 1n 正极性时早期,年龄约 6.2 Ma;大理盆地记录了 C4n. 1r 负极性时到 C2n 正极性时之间的沉积,相应的地层年龄为 7.6 ~ 1.8 Ma,即中新世晚期到更新世早期,三营植物群产出于上新世地层中;小龙潭盆地记录了 C5Ar. 1r 负极性时到 C5n. 2n 正极性时之间的沉积,相应的地层年龄为 12.7 ~ 10 Ma,即中中新世晚期到晚中新世早期,开远古猿的年龄为约 11.6 Ma 或约 12.5 Ma;文山盆地记录了 C5Cn 正极性时与 C5Br 负极性时,即早中新世与晚中新世界限(15.97 Ma),因此,文山植物群产出于中中新世气候适宜期(17 ~ 15 Ma)地层中^[13]。

尽管同位素年代地层学和磁性年代地层学的广泛应用。然而,对于新近纪陆相地层,哺乳动物化石在年代地层学中仍然具有不可替代的作用。哺乳动物年代地层学的测定取决于化石的保存情况。由于陆相地层的复杂性,这些条件往往不能同时满足,只有多种方法结合才能得到满意的年代地层学结果。

王世骥等^[15]开展的中国新近纪长鼻类生物年代学研究可以成为高分辨率陆相生物地层学的一个范例。长鼻类在新近纪早期从非洲侵入欧亚大陆,继而进入美洲大陆。由于长鼻类具有强大的迁移能力和非常快的演化速率,在跨区域的陆相生物地层对比中往往具有标志意义。然而,长鼻类究竟具有多高的年代地层分辨率,这个问题却从来没有系统的研究和明确的结论。研究表明,大部分长鼻类化石种的延限带一般不超过一个 MN Zone (Mammalian Neogene Zone)。一个 MN Zone 的时间跨度一般在 1~2 Ma,因此,长鼻类化石对地层的时间分辨率至少能达到 1~2 Ma,而且应该更高(原因是我们目前没有比 MN Zone 时间分辨率更高的年代地层框架)。长鼻类在新近纪中国地区具有很高的分异度和演化速率。长鼻类物种的周期一般在 1~2 Ma,之后很快进化成新的物种或者原有物种被取代。反过来说,如果在地层中发现保存良好的长鼻类化石,能够鉴定到种一级的水平,那么就可以把地层的时代确定在 1~2 Ma 之内,从而达到相对比较精确的年代学确定^[14]。

剑齿象在上新世和更新世的亚洲大陆最为繁盛。最早的剑齿象出现于晚中新世,最晚可以生存到晚更新世。目前在我国有甘肃兰州盆地和山西榆社盆地 2 个地点产出了晚中新世的剑齿象化石,其中榆社盆地剑齿象化石通过磁性地层学确定其年代约 600 万年,而兰州盆地的剑齿象化石年代目前只受到伴生哺乳动物群的生物地层年代学制约,即只知道位于晚中新世,缺乏更加准确的年代。张鹏等^[14]对兰州盆地蕴含剑齿象化石的邢家湾剖面开展了详细的岩石磁学和磁性地层年代学研究。岩石磁学结果表明,邢家湾剖面的河湖相沉积物中主要磁性矿物为赤铁矿和磁铁矿。以 20~50 cm 间距对剖面样品建立的邢家湾剖面磁性地层序列与晚中新世标准极性年表存在 2 种对比方案。一种对比方案表明邢家湾剖面记录了从 C5r. 2n 到 C4n. 1n 的极性带,剖面年代为 11.6~7.6 Ma。邢家湾动物群位于 C5r. 1r 和 C5n. 2n 极性带的界线附近,其年代约 11 Ma。另外一种对比方案表明,邢家湾剖面记录了从 C4An. 2n 到 C3n. 2n 的极性带,剖面年代为 8.9~4.8 Ma。邢家湾动物群位于 C4r. 1r 和 C4n. 2n 极性带的界线附近,其年代约为 8 Ma。本研究表明邢家湾动物群蕴含的剑齿象化石年代至少 800 万年,也可能达到了 1 100 万年,这 2 个年代都比非洲的剑齿象出现的年代(约 700 万年)要早,是目前全球

最早的剑齿象化石。因此这为剑齿象起源于亚洲的传统观点提供了新的年代学证据^[15]。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Min. The pattern and background of the ancient geography and environment on rising of Jawed vertebrates [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [朱敏. 有颌脊椎动物崛起的格局与古地理、古环境背景 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [2] Xu Honghe, Wang Yi. A study on early middle-late devonian forest in Xinjiang [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [徐洪河, 王怿. 新疆中一晚泥盆世早期森林研究 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [3] Wang Bo, Zhang Qingqing, Shi Gongle. Myanmar amber biota: A world of Cretaceous tropical rain forests [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [王博, 张青青, 史恭乐. 缅甸琥珀生物群: 一个白垩纪热带雨林世界 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [4] Ni Xijun, Li Qiang, Li Lüzhou, et al. Environmental upheaval is "evolution filters" for primates in Eocene-Oligocene [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [倪喜军, 李强, 李绿洲, 等. 始新世-渐新世环境剧变是灵长类的“演化过滤器” [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [5] Wang Xu, Chen Zuoling, Ding Zhongli. A study on environmental changes in Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) period, China Nanyang Basin [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [王旭, 陈祚伶, 丁仲礼. 中国南阳盆地古新世-始新世极热事件 (PETM) 时期环境变化研究 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [6] Deng Tao, Wang Xiaoming, Li Qiang, et al. The substitution of Pliocene mammal in Qinghai-Tibet Plateau to Quaternar mammal fauna in North China [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [邓涛, 王晓鸣, 李强, 等. 青藏高原上新世哺乳动物在华北第四纪哺乳动物群中的取代作用 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [7] Wu Feixiang. The role of Cenozoic fish fossils on the reconstruction of the ancient height in Qinghai-Tibetan Plateau [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [吴飞翔. 新生代鱼化石在青藏高原古高度重建中的作用 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [8] Zhang Miman. Bones thicker of *Hsianwenia wui* witnessed a drought in the Qaidam Basin [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [张弥漫. 全身骨头变粗的伍氏献文鱼 (*Hsianwenia wui*) 见证了柴达木盆地的干旱化 [C] // 第四届系统科学大会摘要集. 上海, 2016.]
- [9] Zhou Zhekun, Su Tao, Huang Yongjiang. The evolution of monsoon climate and its impact on biodiversity [C] // Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [周浙昆, 苏涛, 黄永江. 季风气候的演变及其对生物多样性的影响

- [C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [10] Su Tao, Xu He, Li Shihu, *et al.* The Miocene paleo elevation and climate in the eastern part of Tibet: Evidence from fossil of Markham flora[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [苏涛,许贺,李仕虎,等. 西藏东部中新世古海拔与古气候:基于芒康植物群的化石证据[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [11] Jiang Baoyu. Fossil specific burial mechanisms in Volcanogenic lakes[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [姜宝玉. 火山成因湖泊中的化石特异埋藏机制[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [12] Pan Yanhong, Franz Fürsich. Study on the burial of riching fish layer of limestone Solnhofen[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [泮燕红, Franz Fürsich. 索伦霍芬灰岩中鱼富集层的埋葬学研究[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [13] Deng Chenglong, Li Shihu, Zhu Rixiang. Magnetic stratigraphic framework and sedimentary environment evolution of Late Neogene sedimentary basin in Yunnan[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [邓成龙,李仕虎,朱日祥. 云南晚新近纪沉积盆地磁性地层年代框架及沉积环境演变[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [14] Zhang Peng, Ao Hong, Dekkers M J, *et al.* Study on magnetic chronology of Late Miocene mammal fauna and its significance for mammalian migration and Palaeoenvironmental[C]// Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [张鹏,敖红, Dekkers M J,等. 青藏高原东北缘晚中新世哺乳动物群磁性年代学研究及对哺乳动物迁移和古环境意义[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]
- [15] Wang Shiqi, Deng Tao, Ye Jie. The Neogene age of proboscidean biochron: An example of high-resolution terrestrial biostratigraphy in China[C]//Abstract of the 4th Conference on Earth System Science. Shanghai, 2016. [王世骥,邓涛,叶捷. 中国新近纪长鼻类生物年代—高分辨率陆相生物地层的范例[C]//第四届系统科学大会摘要集.上海,2016.]

Coevolution between Terrestrial Ecosystem and Earth Environment*

Zhou Zhekun¹, Zhou Zhonghe², Wang Yi³

- (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna 666303, China;
2. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China;
3. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Coevolution between terrestrial ecosystem and Earth environment is a hot research topic in both biology and geology. Last progresses in these field are reported from following research subjects; evolution of jawed vertebrates (gnathostomata) from Silurian; occurrence of earliest forests from Devonian of Xinjiang; biodiversity of insects in amber from Cretaceous of Myanmar; Evolution of primates and geochemistry studies from Eocene/Oligocene; studies of Longdan fauna from Lingxia basin, Gansu Province of earlier Pleistocene and endemic cloven-breast fishes from Pliocene Tibet; the correlations thick-boned fish, *Hsianwenia wui*, and the aridification of the Qaidam Basin; monsoon climate and its impact on biodiversity; study on the flora from Mankang, Tibet of Miocene and its palaeoclimate; depositional environment and its impact on the preservation of fossils; contraction of high resolution Stratigraphic series by using data of paleomagnetism and mammal fossils.

Key words: Terrestrial ecosystem; Earth environment; Coevolution; Vertebrate paleontology; Palaeobotany.

* **Foundation item:** Project supported by the National Key Basic Research Project "Coevolution between terrestrial biota and environmental of China since 400 Ma" (No. 2012CB821900).

First author: Zhou Zhekun (1956-), male, Jiande City, Zhejiang Province, Professor. Research areas include botany and palaeobotany.

E-mail: zhouzk@xtbg.ac.cn