

浅谈我国地球环境与生命过程研究中的一些科学问题

周忠和^① 骆永明^② 董云社^③ 袁训来^④ 高 星^①

(^① 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; ^② 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; ^③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^④ 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008. E-mail: zhou.zhonghe@pa.ivpp.ac.cn)

摘要 社会可持续发展的需求与人类环保意识的增强对地球地表环境与生命协同演变的研究提出了更高和更具体的要求. 地球表层环境生物地球化学过程及地生物学效应是认识与解决地表环境与生命演化的关键科学问题, 其核心研究内容概括为生源要素的环境生物界面动力学及生态效应; 毒害污染物的环境生物地球化学过程及机体影响; 地表环境变化的地生物学响应与生命适应机制; 污染地表环境的生态风险评估与生物修复等. 古生物学作为一门地质学和生物学的古老交叉学科, 在地球系统科学研究中能够发挥独特的作用. 古生物学家和地质学家应当更加关注地质历史时期环境的变化对生物演化的影响, 从而为研究现代环境和生物多样性的关系提供更多历史的借鉴. 基于我国地层古生物学研究的现状和资源的优势, 提出了我国在地史时期环境变迁与生命演化研究领域值得关注的几个热点的科学问题. 经济的快速发展推动了地球科学发展的同时也产生一些新的问题, 如荒漠化加重、环境污染的加重、化石资源的破坏等, 这些都对我国地球环境与生命过程的研究提出了严峻的挑战.

关键词 地球表层环境 地生物学效应 古生物学 学科交叉

地球环境与生命过程研究被国家自然科学基金委员会确定为我国地球科学“十五”优先资助领域之一^[1]. 其核心是研究现代和地质历史时期环境与生命演化的相互作用及其过程, 主要目的是更好地认识、保护并改善与人类息息相关的、复杂的地球生态与环境系统.

1 研究现状和发展趋势

地球表层环境的变化, 包括海洋、大气和土壤等因素, 都能够对生物的演化产生直接的影响. 国际地圈生物圈计划(IGBP)也把过去发生的重大气候、环境变化及其原因列为其中的一个重要科学问题^[2].

在地表环境进入人文时期, 人类改造利用的生物圈向智慧圈演化, 为协调人-地关系和促进可持续发展, 生物地球化学经过半个世纪的发展已进入环境生物地球化学新阶段. 目前, 随着人类对区域和全球环境问题认识的不断深化, 地球环境中的环境生物地球化学过程已是IGBP及全球环境变化的人文因素计划(IHDP)、世界气候研究计划(WCRP)等国际研究计划的核心研究内容和许多国家科学研究发展战略规划的主要方向之一, 并成为当今地球系统科学研究国际热点和地球科学与生命科学交叉研究的前沿领域, 在推动地球系统科学研究、环境保护研究等方面都具有重要的学术地位^[3,4].

当今地表环境中的生源元素、人工化学品及物理

化学条件与生命过程密切相关. 探讨生源化学元素在地表环境中的行为、循环及其与生命过程的关系, 追踪人工化学品的环境生物地球化学过程及地生物学效应, 揭示地表环境变化与生命响应、适应机制以及健康的关系, 阐明功能生物体及其生命过程对地表环境的修复作用和生态风险, 对进一步认识地表环境演变与生命演化的协同过程具有重要的科学意义, 同时可为相应的环境生物技术的创新与发展提供基础理论与方法, 对保护地球环境、维护生物多样性、保障生态系统和人类健康以及社会可持续发展也具有特别重要的现实意义^[5~8].

对地史时期生物和环境变化的研究不仅使人类认识到自身的来历, 而且充分了解到地球上的生命来自无机的世界, 现今的生物圈及其赖以生存的地球环境有着超过 35 亿年的漫长协同进化史. 另一方面, 重视现代环境和生物多样性关系的研究不仅能够更好地协调人-地关系和促进人类可持续发展, 而且也促使古生物学家和地质学家更加关注地质历史时期环境的变化^[9], 并更多探索地史时期生物多样性发生的理论^[10,11].

古生物学作为一门地质学和生物学的交叉学科在地球系统科学研究中具有独特的地位. 近年来, 地球科学的发展将地学与生命科学的交叉提高到一个新的高度^[12]. 例如, 稳定同位素(如碳、氧、锶等)作

为衡量全球环境变化的重要指标,其变化与地史时期生物圈的繁盛、衰败和埋葬率直接相关,它在古生物学和地层研究中的应用日趋广泛^[13~16]。

古生物学与分子生物学和地球化学等学科的交叉在早期生命的研究领域表现十分活跃^[17~21]。有机地球化学方法发挥重要的作用;分子化石的识别和研究被称为“新的分子窗口”^[22],不仅有助于识别地球上最早生物活动的痕迹,而且能够帮助探讨一些特殊生物种类的起源和演化,进而分析早期地球大气圈的演化。地微生物学(geomicrobiology)作为一门新兴学科近年来迅速发展,使得我们能够在分子生物学和生物地球化学的水平上去认识生物圈和其他地球圈层的相互作用。

对高精度、高分辨率地层学研究的重视,要求建立全球公认的年龄框架,从而保证各种分析研究建立在全球统一的时面上,并准确地确定生物的演化速率^[23]。古地磁、地质测年和生物地层学工作的结合在陆相地层和生物演化研究中起到不可替代的作用^[15,16,24~27]。我国古生物学者在建立全球统一的年代地层单位和界线层型与点位(金钉子)方面的突出贡献,也从另一个方面反映了古生物学与其他地球科学交叉的重要性;而各种国际地质对比计划(IGCP)项目,也为多学科的交叉和国际合作提供了条件。

2 地球表层环境生物地球化学过程与地生物学效应研究中的一些科学问题

2.1 生源要素的环境生物界面动力学及生态效应

物质的生物地球化学循环是地表/地理环境中的最普遍规律,其中C, N, P, S等生源元素的环境生物地球化学循环居首要地位。当前的核心科学问题是:(1)各生源要素的环境收支平衡性及对环境变化的响应性;(2)各生源要素之间如何相互作用;(3)又如何影响水、土、气、生等环境介质及其界面的物质循环和能量转换;(4)生命过程如何调控地表环境和生态系统的生源要素;(5)如何定量表征和预测以生命过程为核心的地球系统各组成部分之间生源要素的陆-水过程、水-气过程和地-气过程及其界面动力学通量^[28~32]。

2.2 毒害污染物的环境生物地球化学过程及机体影响

陆地表层系统中的重要毒害污染物包括重金属及稀土元素、农药及持久性有机物、放射性核素和病原生物体。重点是研究:(1)这些物质在复杂的地表

环境介质中,特别是在不同介质-生物界面微环境中的迁移转化机理、迁移转化动力学及其与生命过程的关系,尤其是非均相介质动力学过程的非平衡性及地生物学效应;(2)重要污染物质的形态、结构特征、剂量与生物有效性、生物毒性、生态毒理及现代生命多样性的关系;(3)生物参与下的污染物相互作用及复合污染形成机理;(4)环境毒害污染物对生命有机体健康的影响及其机理。

2.3 地表环境变化的地生物学响应与生命适应机制

在了解不同生态系统下地表环境变化的基础上,重点研究生命形式、形态及过程对环境变化的响应性、敏感性、脆弱性和适应性机制,以及不同时空尺度过程的耦合关系与模拟,揭示地表环境变化的生物学原因与规律。深入了解:(1)环境因素与背景对生物演化过程的影响及其机制;(2)生物多样性的变化过程及其与环境事件的耦合关系;(3)地表环境变化与微生物种类组成、功能的相互作用机理及其对生态系统的结构与功能的影响;(4)环境变化对人类生存环境及其安全性的影响,以及人类对环境变化的适应性;(5)代表性极端环境如极地环境、海底环境、地球深部环境、荒漠环境、严重污染环境等条件下生命活动的形式和特征、以及生物的适应机制。

2.4 污染地表环境的生态风险评估与生物修复

基于环境生物地球化学过程与生态毒理研究的污染环境风险评价是在不同地理尺度上探讨地表环境污染的生态与环境效应的重要手段。当前的研究重点包括:(1)复合/混合污染的源识别、生物与生态效应及其早期预警系统;(2)污染物的时空暴露途径风险评价方法、以及土壤/水体/沉积物环境标准;(3)基于生态健康风险评估的污染环境的生物修复过程、机理及其调控原理,包括自然环境下的生物净化体系和人为干预下加快其净化的微生物修复、植物修复及其联合生物修复体系,为最终发展相应的污染生态系统恢复重建技术提供必要的理论基础。

3 地史时期环境变迁与生命演化研究中一些热点和科学问题

3.1 早期生命进化

从生命起源到“寒武纪生物爆发”,早期生命的演化历史约占整个地球生命演化史的七分之六,其间发生了一系列生命演化的“里程碑”事件。如,46~

35 亿年间生命的起源和原始生态系统的建立; 25 亿年左右氧化大气圈的形成和真核生物的出现; 中元古代至新元古代多细胞动物和多细胞植物的起源、早期辐射以及复杂生态系统的建立和演化. 现代动物多样性的基本框架, 即门一级的动物分类, 在寒武纪大爆发过程中就已基本形成.

我国在早期生命进化研究上具有优越的资源优势. 中国华北地台具有跨越 25 亿年的晚太古代和早、中元古代连续沉积岩层. 中国扬子地台和新疆等地广泛发育了新元古代和早寒武世未变质的沉积岩石并保存了丰富的化石资源^[33~35], 包括一些特殊埋藏的化石生物群, 如瓮安生物群和澄江动物群等. 对早期生命的研究还要与可靠的地球化学工作相结合, 从而更深入地探讨生物进化事件发生的环境背景, 如, 新元古代“雪球地球”和真核生物的辐射乃至“寒武纪大爆发”的关系便是其中一个重要的理论问题^[17,36]. 极端环境(如高温、高压、高盐、低温或外地球环境等)下的生命过程可能与早期地球史上某些特定时期非常类似.

3.2 华南古生代生物的起源、灭绝和复苏

华南完整连续的古生代地层和丰富的化石为研究多种生物的起源、灭绝、复苏等理论问题提供了翔实的资料, 包括四足动物起源^[37]、奥陶纪末的生物灭绝^[38]、晚泥盆世 F/F 灭绝事件^[39,40]、二叠纪末的大灭绝及其后的复苏^[13,41~43]等.

华南古生代生物的演替和变化与若干全球性重要地质事件具有显著的关系. 例如, 奥陶纪末期由于气候变化、冰川活动和海平面升降等因素而引发的全球性生物灭绝事件, 不仅导致海洋生物多样性的急剧下降, 而且还改变了奥陶纪生物地理区系的格局. 古-中生代之交发生了显生宙以来全球最大的一次生物绝灭; 与此对应的是, 地球经历了显生宙最大规模的海退、火山爆发、缺氧事件、气候大幅度变动、古海洋异常等变化^[42]. 大灭绝后的生物复苏是近年国际上十分重视的理论问题^[44,45], 在这一前沿问题的研究上, 华南的古生代地层和化石纪录成为研究生物大灭绝与复苏不可多得的资料^[38]. 以“重大地史时期生物的起源、辐射、灭绝和复苏”为题的“973”项目正在建立我国华南古生代古生物数据库, 其目的是为构建更多的生物进化的理论模型打下基础.

3.3 热河生物群与早白垩世的地质背景

热河生物群的发现和研究是我国近年来古生物学的热点之一. 在鸟类起源^[46]、早期鸟类的辐射^[47]、哺乳类的早期进化^[48,49]、被子植物、银杏等植物的起源或早期演化^[50~52]等方面均具有重要的意义.

与热河生物群相关的地学综合研究具有很大的潜力. 在早白垩世发生了许多重大的全球性地质事件, 如剧烈的岩浆活动和大火成岩省的形成^[53~55]、缺氧事件和海平面的变化^[56,57]、二氧化碳浓度增加和温室气候的形成^[58~60]等. 白垩纪超静磁带也起始于早白垩世晚期(120~83 Ma). 超静磁带期间磁场强度相对较强^[61,62]; 而此前磁场频繁倒转、强度相对较弱^[63,64]. 已知早白垩世地理格局和环境的变化对生物的影响十分显著^[65,66]. 著名的翁通-爪哇海台(Ontong-Java Plateau)就形成于早白垩世晚期(约 123 Ma), 和热河生物群的繁盛期十分吻合. 古地磁学和相关地质研究还将为解答这一时期重要地质事件对地球表层环境和生物的影响、和洋中脊扩张、大洋壳生成的关系, 并探询地球深部的过程提供重要的资料^[57].

3.4 新生代哺乳动物和植被的演化与青藏高原的隆起

新生代地球生态系统发生的重要变化之一, 是中新生世开始出现的以 C3 植物为主导的生态系统向 C4 植物为主导的生态系统的转变, 并进一步表现为森林环境的退缩和草原植被的大规模扩张. 与之密切相关的是新生代哺乳动物群的重要演替. 新生代青藏高原的隆升以及引起的一系列生物与环境的变化不仅是国际地球科学研究的热点, 而且也是地球系统科学研究思想在我国地球科学研究中表现最为显著的领域之一.

在这一领域, 我国的古生物学研究也具有得天独厚的优势. 例如, 甘肃临夏盆地处于青藏高原与黄土高原的过渡带, 发育了从渐新世至全新世的连续沉积序列, 并富含大量的哺乳动物化石, 是整个欧亚大陆晚新生代哺乳动物化石最富集的地区之一^[67]. 位于青藏高原北缘的甘肃党地区是亚洲古近纪研究的经典地区之一, 对青藏高原的隆起同样具有重要的意义^[68]. 新近纪哺乳动物群和植被类型的演替、以及古地磁学、生物地层学和沉积地层的研究, 可以与地质学和生物学的其他结果进行比较和相互论证^[69], 进而为青藏高原隆升的时间、期次和幅度、气候环境的演变等提供重要的证据^[70].

3.5 古人类研究和环境变化

中国古人类的体质演化和生存模式研究在国际学术界占有重要的一席,在探讨东亚地区人类起源与史前技术发展方面更是举足轻重。中国许多地区有广泛分布的新近纪和更新世陆相堆积,保存了丰富的古猿类、古人类化石和相关的材料^[71,72]。此外我国古老的灵长类化石也具有诱人的研究前景^[73]。在旧石器考古方面我国材料丰富,特点鲜明,是研究古人类在特定环境下的生存方式和古人类行为对地球环境的改造作用与程度、探讨史前东、西方人类文化差异的重要区域,可以与古人类体质研究相互补充、相互印证^[25]。目前初始人类和现代人类起源的时间、地点与环境背景均是国际古人类学研究的热点问题,与我国的材料皆息息相关^[72,74,75]。要想在这些热点课题上取得重大突破并保证这一领域在21世纪的长足发展,我国古人类学应进行资源整合并加强与分子生物学等相关学科的交叉与结合,同时尽快建立起坚实的年代框架^[72]。

我国在第四纪古环境和气候演化研究方面具有较强的优势^[76]。我国发现的多种古猿生活的古环境可能同样也适于人类生存,因此在今后发现更早的人类化石及其遗存的潜力很大。此外,我国各地不同阶段的古人类无论是在形态还是生活的环境上都具有很大的差异,这也为研究人类演化与环境的相互作用提供了条件。

4 机遇和挑战

随着我国国民经济的持续发展,对地球科学研究的支持力度将不断加大,研究条件日趋改善,研究队伍中人才断层问题逐渐消失。我国庞大的、学科齐全的地球科学研究队伍和广泛的国际合作都为具有较强学科交叉特色的地球环境与生命过程领域的创新研究奠定了便利的基础。同时,我们认为今后还需要进一步加强学科的整合和跨学科的交流,用科学问题带动学科的交叉研究,并注意人才培养中狭隘的专业学科思想的限制。

近阶段的经济快速发展已经并还将不可避免地产生一些新的严峻的现实问题,如荒漠化的加重、环境污染的区域性蔓延、生物多样性的减少等等。地球表层环境生物地球化学过程及地生物学效应是认识与解决这些地表环境与生命演化的关键科学问题,是地球环境与生命过程领域的核心研究内容,并将

是实现我国区域可持续发展战略目标的重要理论基础。我国的地层古生物学研究尽管享有得天独厚的资源优势^[77],但是由于体制的不完善,我国的古生物学研究还面临严峻的化石资源破坏、管理上的混乱和地方保护主义等等问题^[78~80]。如果不从社会的高度对这些问题加以重视,不仅会对我国地球环境与生命过程研究产生不利的影响,而且对于整个国民经济和社会的可持续发展也将构成极大的威胁。

参 考 文 献

- 1 马福臣,林海. 地球科学“十五”优先资助领域. 中国科学基金, 2000, 3: 183~185[DOI]
- 2 陈泮勤. 地球系统科学的发展与展望. 地球科学进展, 2003, 18(6): 974~979
- 3 刘东生. 全球变化和可持续发展科学. 地学前缘, 2002, 9(1): 1~8
- 4 韩兴国,李凌浩,黄建辉主编. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社; 海德堡: 施普林格出版社, 1999. 1~20
- 5 中国科学院地学部. 东南沿海经济快速发展地区环境污染及其治理对策. 地球科学进展, 2003, 18(4): 493~496
- 6 Jones D. Daedalus: Green smelters. Nature, 2000, 406: 34[DOI]
- 7 Ross P S. PCBs are a health risk for humans and wildlife. Science, 2000, 289: 1878~1879[DOI]
- 8 Copley J. Ecology goes underground. Nature, 2000, 406: 452~454[DOI]
- 9 陈旭,阮亦萍,布科 A J, 主编. 中国古生代气候演变. 北京: 科学出版社, 2001. 1~325
- 10 Crampton J S, Beu A G, Cooper R A, et al. Estimating the rock volume bias in paleobiodiversity studies. Science, 2003, 301: 358~360[DOI]
- 11 Jablonski D, Roy K, James W, et al. The impact of the pull of the Recent on the history of marine diversity. Science, 2003, 300: 1133~1135[DOI]
- 12 汪品先. 我国的地球系统科学研究向何处去? 地球科学进展, 2003, 18(6): 837~851
- 13 Jin Y, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in south China. Science, 2000, 289: 432~436[DOI]
- 14 邓涛,董军社,王杨. 化石稳定同位素记录的中国华北第四纪陆地生态系统演变. 科学通报, 2001, 46(14): 1213~1215
- 15 Bowen G J, William C C, Koch P L, et al. Mammalian dispersal at the Paleocene/Eocene boundary. Science, 2002, 295: 2062~2065[DOI]
- 16 Xiao S, Bao H, Wang H, et al. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation. Precambrian Research, 2004, 130: 1~26[DOI]
- 17 Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball Earth. Science, 1998, 281: 1342~1346[DOI]
- 18 Conway Morris S. Evolution: Bringing molecules into the fold. Cell, 2000, 100: 1~11
- 19 Yang Q, Lü B. Molecular respiratory mechanisms in the Cambrian metazoans. J Gen Mol Biol, 2001, 12 (1): 10~11

- 20 Zhou C, Tucker R, Xiao S, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. *Geology*, 2004, 32 (5): 437~440[DOI]
- 21 Furnes H, Banerjee N R, Muehlenbachs K, et al. Early life recorded in Archean pillow lavas. *Science*, 2004, 304: 578~581[DOI]
- 22 Knoll AH. A new molecular window on early life. *Science*, 1999, 285: 1025~1026[DOI]
- 23 张弥曼, 陈旭. 20 世纪古生物学的重大进展及 21 世纪战略重点. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 624~628
- 24 Swisher III C C, Wang Y, Wang X, et al. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58~61[DOI]
- 25 Hou Y, Potts R, Yuan B, et al. Mid-Pleistocene Acheulean-like stone technology of the Bose Basin, south China. *Science*, 2000, 287: 1622~1626[DOI]
- 26 Zhu R, Hoffman KA, Potts R, et al. Earliest presence of humans in northeast Asia. *Nature*, 2001, 413: 413~417[DOI]
- 27 He H, Wang X, Zhou Z, et al. Timing of the Jiufotang Formation (Jehol Group) in Liaoning, northeastern China and its implications. *Geophy Res Lett*, 2004, 31 (12): L12605
- 28 Callendar G S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Q J R Meteorol Soc*, 1938, 64: 223~240
- 29 Prentice I C. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide in Climate Change 2001: The Scientific Basis (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 184~237
- 30 Houghton R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Climatic Change*, 2001, 48: 525~534[DOI]
- 31 Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 1993, 365: 119~125[DOI]
- 32 Harrison K, Broecker W. A strategy for estimating the impact of CO₂ fertilization on soil carbon storage. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7(1): 69~80
- 33 Shu D, Conway Morris S, Zhang Z J, et al. A new species of *Yunnanozoan* with implications for Deuterostome evolution. *Science*, 2003, 299: 1380~1384[DOI]
- 34 Dong X, Donoghue P C J, Cheng H, et al. Fossil embryos from the Middle and Late Cambrian period of Hunan, south China. *Nature*, 2004, 427: 237~240[DOI]
- 35 Chen J, Bottjer D J, Oliveri P, et al. Small bilaterian fossils 40 to 55 million years before the Cambrian. *Science*, 2004, 305: 218~222[DOI]
- 36 Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. Neoproterozoic 'snowball Earth' simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature*, 2000, 405: 425~429[DOI]
- 37 Zhu M, Yu X. A primitive fish close to the common ancestor of tetrapods and lungfish. *Nature*, 2002, 418: 767~770[DOI]
- 38 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代的证据. 合肥: 中国科学技术出版社, 2005
- 39 廖卫华. 中国晚泥盆世 F/F 生物集群灭绝事件及其后的生物复苏的研究. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(8): 662~667
- 40 Ma X, Bai S. Biological, depositional, microspherule, and geochemical records of the Frasnian/Famennian boundary beds, South China. *Palaeogeog Palaeoclimat Palaeoecol*, 2002, 181(1-3): 325~346[DOI]
- 41 Wang X, Sugiyama T. Diversity and extinction patterns of Permian coral faunas of China. *Lethaia*, 2000, 33: 285~294[DOI]
- 42 彭元桥, 殷鸿福. 古-中生代之交的全球变化与生物效应. *地学前缘*, 2002, 9(3): 85~93
- 43 Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe I, et al. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*, 2004, 305: 1760~1763[DOI]
- 44 Jablonski D. Survival without recovery after mass extinctions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(12): 8139~8144[DOI]
- 45 Solé R V, Montoya J M, Erwin D H. Recovery after mass extinction: evolutionary assembly in large-scale biosphere dynamics. *Phil Trans R Soc Lond B*, 2002, 357: 697~707[DOI]
- 46 Xu X, Zhou Z, Wang X, et al. Four-winged dinosaurs from China. *Nature*, 2003, 421: 335~340[DOI]
- 47 Zhou Z. The origin and early evolution of birds: Discoveries, disputes, and perspectives from fossil evidence. *Naturwissenschaften*, 2004, 91: 455~471[DOI]
- 48 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
- 49 Luo Z, Ji Q, Wible J R, et al. An Early Cretaceous tribosphenic mammal and metatherian evolution. *Science*, 2003, 302: 1934~1940[DOI]
- 50 Sun G, Dilcher D L, Zheng S, et al. Archaeofractaceae, a new basal angiosperm family. *Science*, 2002, 296: 899~904[DOI]
- 51 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 Syst Evol*, 2003, 241 (1-2): 77~88[DOI]
- 52 Zhou Z, Zheng S. The missing link in Ginkgo evolution. *Nature*, 2003, 423: 821~822[DOI]
- 53 Renne P. Flood basalts—bigger and badder. *Science*, 2002, 296: 1812~1813 [DOI]
- 54 Riisager P, Hall S, Antretter M, et al. Paleomagnetic paleolatitude of Early Cretaceous Ontong Java Plateau basalts: implications for Pacific apparent and true polar wander. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 208: 235~252[DOI]
- 55 Ingle S, Coffin M F. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau? *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 218: 123~134[DOI]
- 56 Stoll H M, Schrag D P. Evidence for glacial control of rapid sea level changes in the Early Cretaceous. *Science*, 1996, 272: 1771~1774
- 57 史瑞萍, 朱日祥. 白垩纪地球物理场异常与地球深部动力学. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 295~300
- 58 Barron E J. A warm, equable Cretaceous: The nature of the problem. *Earth Sci Rev*, 1983, 19: 305~338[DOI]
- 59 Huber B T, Hodel D A, Hamilton C P. Middle-Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: Stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients. *Geol Soc Amer Bull*, 1995, 107: 1164~1191[DOI]
- 60 Larson R L, Erba E. Onset of the mid-Cretaceous greenhouse in the Barremian-Aptian: Igneous events and the biological, sedimentary, and geochemical responses. *Paleoceanography*, 1999, 14: 663~678[DOI]
- 61 Tarduno J A, Cottrell R D, Smirnov A V. High geomagnetic intensity during the mid-Cretaceous from Thellier analyses of single plagioclase crystals. *Science*, 2001, 291: 1779~1783[DOI]
- 62 Zhu R, Lo C H, Shi G, et al. Palaeointensities determined from the

- middle Cretaceous basalt in Liaoning province, northeastern China. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 142: 49~59[DOI]
- 63 Zhu R, Hoffman K A, Pan Y, et al. Evidence for weak geomagnetic field intensity prior to the Cretaceous normal superchron. *Phys Earth Planet Inter*, 2003, 136: 187~199[DOI]
- 64 Pan Y, Hill M, Zhu R, et al. Further evidence for low intensity of the geomagnetic field during the early Cretaceous time: Using the modified Shaw method and microwave technique. *Geophy J Int*, 2004, 157: 553~564[DOI]
- 65 Chang M, Chen P, Wang Y, et al, eds. *The Jehol Biota, the Emergence of Feathered Dinosaurs, Beaked Birds and Flowering Plants*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003
- 66 Zhou Z, Barrett P M, Hilton J. An exceptionally preserved Lower Cretaceous ecosystem. *Nature*, 2003, 421: 807~814[DOI]
- 67 邓涛. 临夏盆地晚新生代哺乳动物群演替与青藏高原隆升背景. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 413~420
- 68 王伴月, 邱占祥, 王晓鸣, 等. 甘肃省党河地区的新生代地层和青藏高原隆升. *古脊椎动物学报*, 2003, 44(1): 66~75
- 69 孙航, 李志敏. 古地中海植物区系在青藏高原隆起后的演变和发展. *地球科学进展*, 2003, 18(6): 852~862
- 70 邱铸鼎, 李传夔. 中国哺乳动物区系的演变与青藏高原的抬升. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(9): 845~854
- 71 Wu X. Investigating the possible use of fire at Zhoukoudian, China. *Science*, 1999, 283: 299
- 72 吴新智. 人类起源研究回顾与中国古人类学展望. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 629~633
- 73 Ni X, Wang Y, Hu Y, et al. An euprimate skull from the early Eocene of China. *Nature*, 2004, 427: 65~68[DOI]
- 74 高星, 黄万波, 徐自强, et al. 三峡兴隆洞出土 12~15 万年前的古人类化石和象牙刻划. *科学通报*, 2003, 48(23): 2466~2472
- 75 Zhu R, Potts R, Xie F, et al. New evidence regarding the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia. *Nature*, 2004, 431, 559~562[DOI]
- 76 An Z, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62~66[DOI]
- 77 Stokstad E. Exquisite Chinese fossils add new pages to book of life. *Science*, 2001, 291: 232~236[DOI]
- 78 Dalton R. Chasing the dragons. *Nature* 2000, 406: 930~932[DOI]
- 79 Du L. Scientists warn of threats to fossil-rich Chinese site. *Science*, 2004, 305: 172~173[DOI]
- 80 Normile D, Xiong L. China clamps down on mining to preserve Cambrian site. *Science*, 2004, 305: 1893~1894[DOI]

(2004-12-16 收稿, 2005-01-06 收修改稿)