中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 330 ~ 352
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国第四纪综合地层和时间框架

邓成龙[1,2,3*], 郝青振[2,3,4], 郭正堂[2,3,4,5], 朱日祥[1,2,3]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
5. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101
* E-mail: cldeng@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2017-08-16; 收修改稿日期: 2017-11-03; 接受日期: 2018-03-21; 网络版发表日期: 2018-05-02
国家自然科学基金项目(批准号: 41690110, 41621004, L1524016)资助

摘要 中国第四纪地层以陆相为主, 沉积类型多样, 北方以风成沉积、河湖相沉积为主, 南方以受风化作用影响较强的网纹红土以及河湖相沉积和洞穴/裂隙沉积为特征, 青藏高原地区主要为河湖相沉积及山麓沉积. 海相第四系主要沉积类型有碎屑沉积和生物礁沉积. 综合生物地层学、磁性地层学、气候地层学研究和轨道调谐定年, 已建立海相第四系和黄土高原第四纪黄土-古土壤序列的高精度气候地层年代学标尺. 通过^{230}Th定年, 已建立64万年来石笋记录的高精度绝对年代标尺及轨道-亚轨道尺度气候变化的高分辨率氧同位素时间序列. 对于其他第四纪陆相地层, 目前已建立地磁极性倒转控制下的第四纪年代地层学框架. 中国陆相更新统自下而上包括下更新统泥河湾阶、中更新统周口店阶和上更新统萨拉乌苏阶, 全新统待建阶. 本文在总结中国代表性第四纪地层单元年代学进展的基础上, 建立中国第四纪综合年代地层框架和中国各大区第四系对比格架. 综合多学科的年代地层学研究, 将来有望建立冰期-间冰期旋回尺度上的中国陆相第四系气候地层学年表以及综合考虑海陆相地层的、统一的中国第四纪年代地层系统.

关键词 第四系, 年代地层学, 磁性地层学, 生物地层学, 气候地层学, 中国

1 概论

第四纪是地球演化历史最晚的一个时段, 现今的全球海陆分布、地形、气候格局和陆地生态系统都在第四纪期间最终形成. 第四纪的一个重要特点是地球南北两极均发育大冰盖, 全球气候以冰期-间冰期旋回为特征, 人类在迁移、扩散的过程中从人属逐渐演化为现代人, 并最终发展为现代文明. 因此, 对人类来说, 第四纪也是最为重要的一个时段.

第四纪包括更新世和全新世. 国际地层年表中, 更新统包括4个阶, 其中下更新统"格拉斯阶"(Gelasian Stage)(Rio等, 1998)和卡拉布里雅阶(Calabrian Stage)(Aguirre和Pasini, 1985)的底界层型已经建立; 中更新统和上更新统的底界层型尚未建立. 全新统底界层型已被确定在格陵兰NGRIP冰心的1492.45m深度处(Walker等, 2008). 在相当长的时期内, 第四系底界(亦

中文引用格式: 邓成龙, 郝青振, 郭正堂, 朱日祥. 2019. 中国第四纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 330–352, doi: 10.1360/N072017-00269
英文引用格式: Deng C L, Hao Q Z, Guo Z T, Zhu R X. 2019. Quaternary integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 324–348, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9195-4

© 2018 《中国科学》杂志社

即更新统底界)由Calabrian阶底界来定义, 其年龄约为1.8Ma (Gradstein等, 2004). 2009年6月, 国际地科联正式批准将第四系底界下移至Gelasian阶底界(Gibbard等, 2010), 其年龄约为2.6Ma, 该界线可与海洋氧同位素阶段103(简称MIS103)或高斯/松山(Gauss/Matuyama)地磁极性倒转(简称G/M界线)对比(图1). 中国黄土的气候地层学和年代地层学研究结果为该方案提供了强有力的支持.

我国的第四纪地层以陆相为主, 包括风成沉积、河湖相沉积、洞穴/裂隙沉积、山麓沉积等, 并富含哺乳动物化石(图2、3, 表1、2). 海相第四系主要发育于渤海、黄海、东海和南海等四大海域, 主要沉积类型有碎屑沉积(分布于东部陆架和南海)和生物礁沉积(分布于南海). 早期的第四纪陆相地层年代学研究主要依赖生物地层学方法. 20世纪70年代以来, 由于磁性地层学方法广泛应用于中国陆相第四纪地层定年以及黄土气候地层学研究的突破, 导致建立中国第四纪海洋氧同位素地层表这一重要思想的提出(刘东生等, 2000). 本世纪初以来, 由于石笋的高精度同位素年代学、南海大洋钻探计划(ODP)184航次钻孔岩芯的氧同位素地层学以及陆相沉积盆地的古地磁年代学等研究的进一步突破, 显著提升了中国第四纪地层年代学的研究水平. 综合多种年代学方法, 将来有望建立更精细的中国第四纪气候地层年代框架, 既适用于区域及全球陆相地层对比, 又适用于海陆地层对比.

2　中国第四纪年代地层划分沿革

我国的第四纪年代地层学工作始于20世纪20~30年代在中国北方地区开展的生物地层学研究. 例如, 法国古生物学家、地质学家桑志华(Emile Licent)与德日进(Pierre Teilhard de Chardin)早在1922年就在萨拉乌

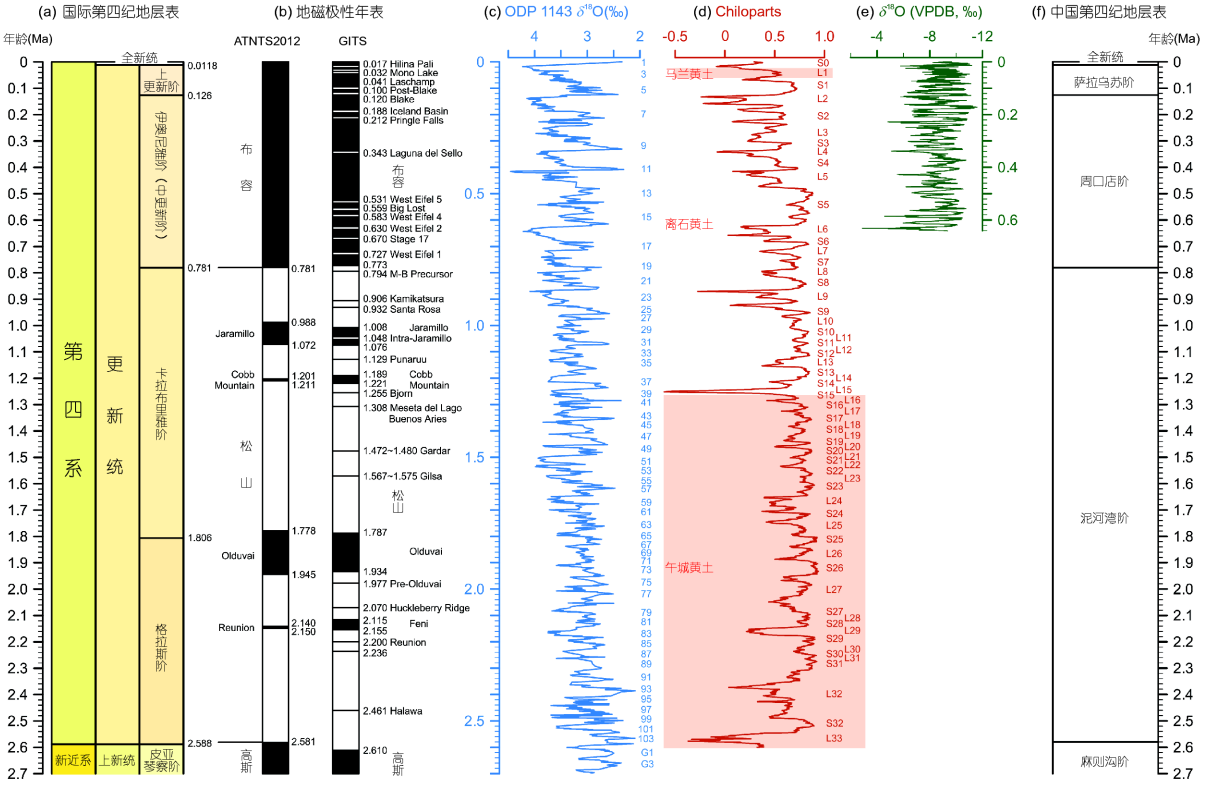


图 1　中国第四系综合地层年代框架

(a) 国际第四纪地层表(Pillans和Gibbard, 2012); (b) 地磁极性年表(Hilgen等, 2012; Singer, 2014; Singer等, 2014); (c) 中国南海ODP1143站底栖有孔虫的氧同位素序列(Tian等, 2002), 右侧数字为氧同位素阶段; (d) 中国黄土-古土壤序列时间标尺(Chiloparts) (Ding等, 2002), 右侧的L和S分别表示黄土层和古土壤层; (e) 0.64Ma以来中国南方石笋氧同位素序列集成曲线 (Cheng等, 2016); (f) 中国第四纪地层表(全国地层委员会, 2017)

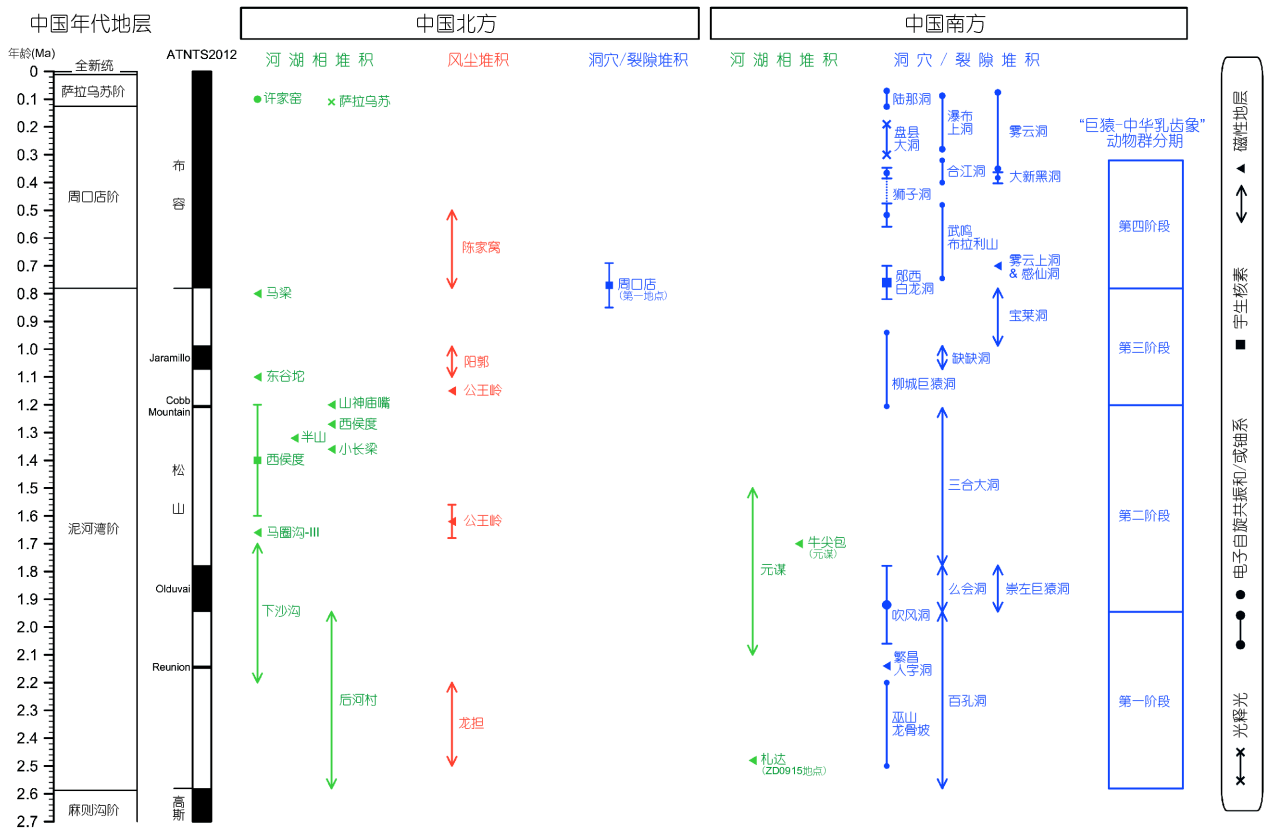


图 2　中国第四纪哺乳动物群的分布、年代序列及对比

数据来源和参考文献见表1、表2及正文

苏河地区发掘出大量的古生物化石、智人牙齿化石与旧石器(Teilhard de Chardin和Licent, 1924). 随后, 德日进与皮孚陀(Jean Piveteau)于1930年发表了专著“Les mammifères fossiles de Nihowan (Chine)”(泥河湾哺乳动物化石), 开启了泥河湾盆地研究走向世界的序幕. 1933年, 步达生(Davidson Black)、德日进、杨钟健与裴文中又发表对周口店遗址系统研究的第一部专著《中国的化石人类》(*Fossil Man in China*)(Black等, 1933), 不但使得北京猿人为世人熟知, 而且系统地总结了当时中国第四纪生物地层学研究成果. 事实上, 这些开创性的工作为中国陆相第四系建阶奠定了坚实的生物地层学基础.

由于缺乏精准的绝对定年数据, 早期的第四纪生物地层学研究主要针对单个动物群. 随着生物地层学资料不断丰富, 进入了划分“陆生哺乳动物分期”的研究阶段, 陆生哺乳动物分期成为新生代地质年表的重要组成部分(Gradstein等, 2012). 中国第四纪陆生哺乳动物分期的研究工作至少可追溯至1957年裴文中对中国第四纪哺乳动物群的地理分布的研究, 他提出北方区有四个、南方区有两个不同时期的第四纪哺乳动物群(裴文中, 1957). 此后, 古生物学家对中国新生代陆生哺乳动物分期开展了持续的系统研究, 大大提高了中国新生代地层年代学的研究水平, 但第四纪部分主要涉及早更新世“泥河湾期”(Qiu和Qiu, 1995; 邱占祥, 2000; 邓涛, 2006; Wang等, 2013a). 2000年第三届全国地层会议以来, 中国第四系建阶工作得到快速推进, 目前已建立下更新统“泥河湾阶”、中更新统“周口店阶”和上更新统“萨拉乌苏阶”, 并被纳入目前最新版的《中国地层表(2014)》(全国地层委员会, 2017).

由于气候变化强烈影响和控制了第四纪期间的风化、剥蚀、搬运和沉积过程, 因此, 气候地层学成为第四纪陆相地层划分、对比的重要基础. 其中, 最具代表性的实例当属中国黄土的年代学研究, 中国黄土年代地层学的发展在很大程度上引领了中国第四纪陆相地

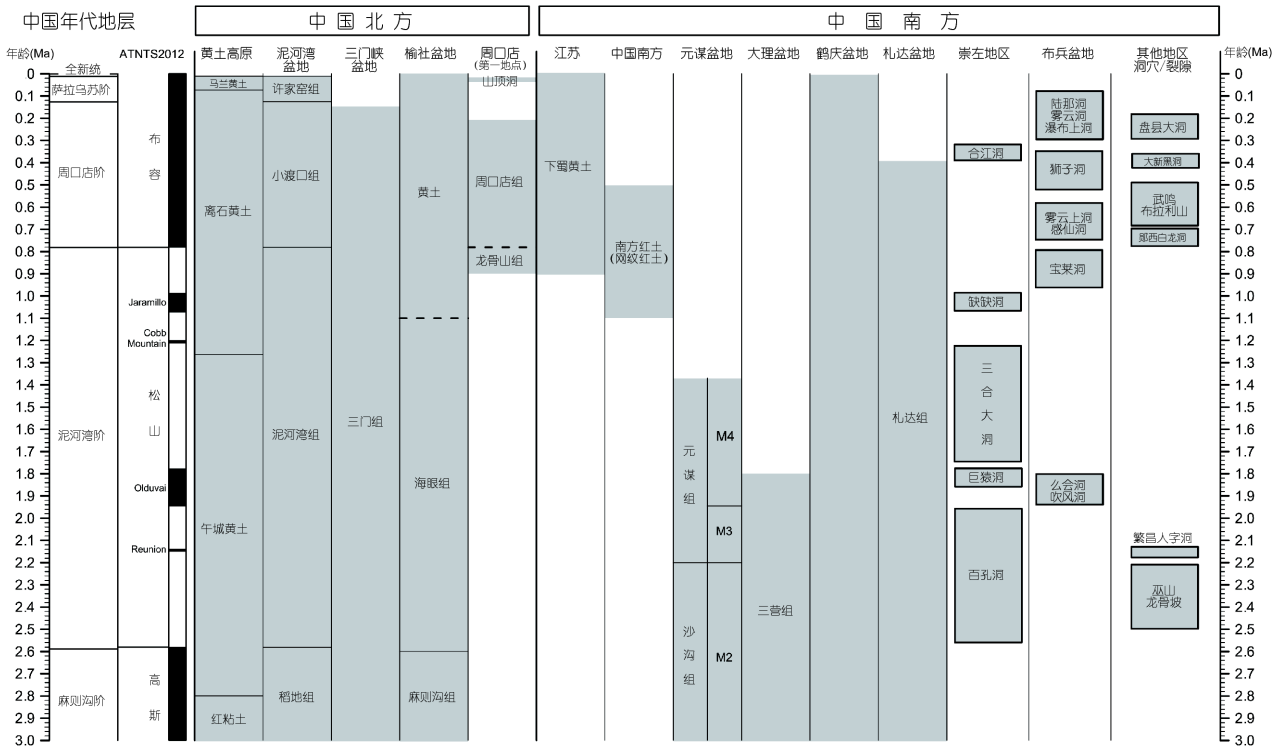


图 3　中国第四纪陆相地层对比框架

图中灰色阴影代表地层分布的时间范围. 数据来源和参考文献见正文

表 1　中国北方第四纪动物群化石地点及其年代

沉积相	地区	地点	年龄(Ma)	测年手段	参考文献
河湖相沉积	泥河湾盆地	许家窑	0.1	铀系	陈铁梅等, 1982
		马梁	0.8	磁性地层学	Wang等, 2005a
		东谷坨	1.1	磁性地层学	Wang等, 2005a
		山神庙嘴	1.2	磁性地层学	Liu 等, 2016b
		半山	1.32	磁性地层学	Zhu等, 2004
		小长梁	1.36	磁性地层学	Zhu等, 2001
		马圈沟III	1.66	磁性地层学	Zhu等, 2004
		下沙沟	2.2~1.7	磁性地层学	Liu等, 2012
	三门峡盆地	西侯度	1.27	磁性地层学	Zhu等, 2003
			1.4±0.2	^{26}Al/^{10}Be埋藏法	Kong等, 2013
	河套盆地	萨拉乌苏	0.15~0.075	热释光、光释光、放射性碳	闵隆瑞等, 2009
风成沉积	渭河盆地 (三门峡盆地)	公王岭	1.15	磁性地层学	An和Ho, 1989
			1.62	磁性地层学	Zhu等, 2015
		陈家窝	0.78~0.50	磁性地层学	岳乐平和薛祥煦, 1996
		阳郭	1.10~0.99	磁性地层学	岳乐平等, 1994
	临夏盆地	龙担	2.5~2.2	磁性地层学	Zan等, 2016
洞穴沉积	华北平原	周口店第一地点	0.77±0.08	^{26}Al/^{10}Be埋藏法	Shen等, 2009

表 2　中国南方第四纪动物群化石地点及其年代

沉积相	地区	地点	年龄(Ma)	测年手段	参考文献
河湖相沉积	元谋盆地	牛尖包	1.7	磁性地层学	Zhu等, 2008b
		元谋盆地	2.1~1.5	磁性地层学	Zhu等, 2008a, 2008b 钱方和周国兴, 1991
	札达盆地	IVPP ZD0915地点	2.48	磁性地层学	Wang等, 2013b
洞穴/裂隙沉积	崇左地区	百孔洞	2.58~1.95	磁性地层学	Sun等, 2014
		巨猿洞	1.95~1.78	磁性地层学	Sun等, 2014
		三合大洞	1.78~1.07	磁性地层学	Sun等, 2014
		缺缺洞	1.07~0.99	磁性地层学	Sun等, 2014
		合江洞	0.4~0.32	铀系	Zhang等, 2014
	布兵盆地	吹风洞	1.92±0.14	电子自旋共振、铀系与磁性地层学	Shao等, 2014
		么会洞	1.95~1.78	磁性地层学	Sun等, 2017a
		宝莱洞	0.99~0.78	磁性地层学	Sun等, 2017a
		雾云上洞	0.7	磁性地层学	Sun等, 2017a
		感仙洞	0.7	磁性地层学	Sun等, 2017a
		狮子洞	0.517~ 0.366	铀系	孔丽娟等, 2012
		雾云洞	0.35~0.20	铀系	Wang等, 2007a
			0.279~0.076	电子自旋共振	Rink等, 2008
		瀑布上洞	0.28~0.088	电子自旋共振	Rink等, 2008
		陆那洞	0.127~0.07	铀系	Bae等, 2014
	重庆巫山	龙骨坡	2.5~2.2	电子自旋共振与铀系	Han等, 2017
	广西柳城	巨猿洞	1.206~0.94	电子自旋共振与铀系	Rink等, 2008
	广西武鸣	步拉利山	0.745~0.481	电子自旋共振	Rink等(2008) 金昌柱等(2009)
	广西大新	黑洞	0.383±0.02	电子自旋共振与铀系	Shao等(2017)
	湖北郧县	白龙洞	0.76±0.06	$^{26}Al/^{10}Be$埋藏法	Liu等, 2015
	贵州盘县	大洞	0.3~0.19	光释光	Zhang等, 2015
	安徽繁昌	人字洞	2.15~2.14	磁性地层学	王元等, 2013

层年代学的进步. 根据黄土中脊椎动物化石组合特征, 刘东生和张宗祜(1962)提出上更新统马兰黄土、中更新统离石黄土和下更新统午城黄土的岩石地层划分、命名方案. 随后, 黄土磁性地层年代学(Heller和Liu, 1982)和气候地层学(Heller和Liu, 1984, 1986)研究的突破, 建立了较为准确的中国黄土-古土壤序列时间标尺, 这个重要进展也使中国黄土被纳入了全球古环境的框架. 在此基础上开展的一系列轨道调谐研究工作(Ding等, 1994, 2002; Lu等, 1999; Heslop等, 2000; Sun等, 2006), 建立了更精准的中国黄土-古土壤序列天文年代标尺. 中国黄土的地层年代学研究成果也为国际地层年表中第四系底界由约1.8Ma的Calabrian阶底界移至约2.6Ma的Gelasian阶底界提供了关键的地层年代学支持(Gibbard等, 2010; 姚玉鹏和刘羽, 2010).

得益于磁性地层学方法的广泛应用, 20世纪70年代以来, 中国其他第四纪陆相地层的磁性地层年代学研究获得了极大发展, 含元谋人、北京猿人化石地层的年代学研究(李普等, 1976; 刘椿等, 1977)是早期的部分代表性工作. 80年代以来, 由于对沉积物剩磁机理认识的深入以及低温超导磁力仪逐渐广泛使用, 若干第四纪重要地层单元、重要生物群的年龄被准确厘定(表1、2, 图2、3). 本文将在总结中国第四纪地层及其

赋存的哺乳动物群年代学若干新进展的基础上，提出中国第四纪综合年代地层框架和中国各大区第四系对比格架(图1~3)，并对中国第四纪地层年代学研究存在的问题和今后努力的方向提出一些看法. 但是, 我们不求面面俱到，对一些相对缺乏年代学数据或者年代学方面有较大争议的典型地层单元，例如昔格达组、西域组等, 本文暂不涉及.

3　中国陆相第四系

中国地层表(2014)中，更新统自下而上包括下更新统泥河湾阶、中更新统周口店阶和上更新统萨拉乌苏阶, 全新统待建阶.

3.1　泥河湾阶

泥河湾阶为中国第四系下更新统. 1999年全国地层委员会第四系工作组提出建立泥河湾阶的年代地层单位, 其阶名源自同名岩石地层单位“泥河湾组”. 泥河湾盆地东部边缘的下沙沟剖面可作为泥河湾阶的候选层型剖面之一, 因为该剖面不仅产出著名的“下沙沟动物群”(Teilhard de Chardin和Piveteau, 1930), 而且记录了第四系底界(亦即G/M界线)以及约3Ma以来近乎完整的″泥河湾层″(Liu等, 2012). 另外, 李传夔等(1984)建议以狭义的泥河湾动物群(即下沙沟动物群)命名哺乳动物时代“泥河湾期”. 因此，作为哺乳动物时代的“泥河湾期”和作为年代地层单位的“泥河湾阶”可以比较完美地结合.

“泥河湾动物群”有广义、狭义之分. 广义的泥河湾动物群指泥河湾盆地河湖相沉积物中赋存的一系列动物群，而狭义的泥河湾动物群仅指下沙沟动物群. Teilhard de Chardin和Piveteau(1930)首次报道了泥河湾动物群(狭义), 其化石材料主要来自下沙沟村附近的剖面. 后来, 古生物学家总结并重新修正了下沙沟动物群化石名单，代表性的修订工作有周廷儒等(1991)和Qiu和Qiu(1995). 下沙沟剖面是经典的泥河湾动物群(狭义)的命名地，是泥河湾盆地走向世界的起点，其年龄的准确确定对于完善中国第四纪陆生哺乳动物年代框架以及确定中国陆相第四系下限非常重要.

邱占祥(2000)将下沙沟动物群与欧洲“维拉方动物群”(Villafranchian fauna)中属级相同的20种哺乳动物进行了详细的形态和进化水平上的对比，进而认为下沙沟动物群与欧洲晚维拉方早期的Olivola动物群最为接近，并推断其年龄约为1.8Ma. 为了更准确地确定下沙沟动物群的年龄，我们对下沙沟剖面进行了精细的磁性地层学研究(Liu等, 2012). 卫奇先生在下沙沟村附近确定了很可能是当年采集下沙沟动物群化石的三个层位, 磁性地层学定年结果显示, 这三个化石层位的年龄范围约为2.2~1.7Ma (Liu等, 2012), 与邱占祥(2000)推断的下沙沟动物群年龄一致.

泥河湾阶与国际地层年表中的Gelasian阶和Calabrian阶对比，其底界与Gelasian阶底界一致，年龄为2.588Ma，与G/M界线基本一致. 下沙沟剖面底部清楚地呈现出G/M界线(Liu等, 2012), 该界线之上为典型的河湖相沉积物, 之下亦为河湖相沉积物, 但含有较多的红色粉砂和粉砂质粘土，可能由上新世风成红粘土被搬运再沉积而形成.

泥河湾阶以含“长鼻三趾马-真马动物群”为特征, 但其底界生物识别标志尚待深入研究后定义. 邓涛和薛祥煦(1997)认为真马(*Equus*属)在欧亚大陆的首次出现可作为第四纪下限的标志，近年来许多哺乳动物群的磁性地层年代学研究支持这一观点. 例如，在泥河湾盆地东部，真马化石发现于马梁、东谷坨、半山、小长梁、山神庙嘴、马圈沟、下沙沟和大南沟等地点, 在这些地点中, 最高的层位为马梁, 年龄约为0.8Ma (Wang等, 2005a); 最低的层位为下沙沟或者大南沟, 其年龄约为2.0~1.8Ma (Deng等, 2008; Liu等, 2012), 古生物学家认为在1.8Ma左右(邱占祥, 2000). 在元谋盆地, 云南马(*Equus yunnanensis*)产出于第三段中部的第18层至第四段上部的第27层(属于元谋组)(钱方和周国兴, 1991), 相应的磁性地层学年龄约为2.1~1.5Ma (Zhu等, 2008a, 2008b). 临夏盆地含真马的龙担动物群的磁性地层学年龄为2.5~2.2Ma (Zan等, 2016). 在西藏札达盆地ZD0915地点，真马的最低层位位于Matuyama负极性时早期, 年龄约为2.48Ma (Wang等, 2013b). 另外, 我们尚未发表的初步磁性地层学结果表明，榆社盆地海眼组中的真马化石层位稍高于奥杜威(Olduvai)上界, 其年龄约为1.7Ma; 渭河盆地含真马的后河村动物群(汪洪, 1988)产出于Matuyama负极性时早期, 可能接近G/M界线(亦即第四纪底界).

3.2　周口店阶

周口店阶为中国第四系中更新统，由裴文中等

(1963)命名, 命名地点在北京市房山区周口店, 其层型剖面位于周口店第一地点的奥陶纪石灰岩洞穴中, 其阶名源自同名岩石地层单位“周口店组”. 周口店组为产出北京猿人化石的一套洞穴堆积, 厚约40m, 自上而下包括第1层至第13层沉积物(吴汝康等, 1985). 这套沉积物的岩性以灰岩角砾和含角砾的粘土、粉砂、砂和砾石为主, 夹灰烬层、钙质胶结层以及具有水流作用特征的砂砾层. 周口店组(第1~13层)的下伏地层为第14~17层, 其中第14~15层又被称为“龙骨山组”(图3).

周口店组产出丰富的脊椎动物化石, 据此建立的“周口店动物群”是我国北方中更新世动物群的重要代表. 目前, 在周口店第一地点已发现62种鸟类化石(侯连海, 1985)和97种哺乳动物化石(胡长康, 1985). 周口店阶以含中更新世的北京猿人(*Homo erectus pekinensis*)和肿骨鹿(*Megaloceros pachyosteus*)为主要生物标志, 具有比较明确的生物年代学意义的其他哺乳动物还有硕猕猴(*Macaca robustus*)、居氏大河狸(*Trogontherium cuvieri*)、柯氏短耳兔(*Ochotona koslowi*)、变异仓鼠(*Cricetulus varians*)、中国鬣狗(*Hyaena sinensis*)、三门马(*Equus sanmeniensis*)、洞熊(*Ursus spelaeus*)、意外剑齿虎(*Machairodus inexpectatus*)、纳玛象(*Palaeoloxodon* cf. *namadicus*)、周口店额鼻角犀(*Dicerorhinus choukoutienensis*)、巨副驼(*Paracamelus gigas*)、德氏水牛(*Bubalus teilhardi*)、裴氏转角羚羊(*Spirocerus peii*)、豪猪(*Hystrix subcristata*)、杨氏虎(*Felis youngi*)等.

前人曾利用古地磁、裂变径迹、热释光、铀系、电子自旋共振、宇生核素埋藏等多种定年方法对周口店第一地点的沉积序列进行定年, 结果表明周口店组的沉积起始于约78万年前、结束于约20万年前(陈铁梅和周力平, 2009), 松山/布容(Matuyama/Brunhes)地磁极性倒转(简称M/B界线)位于第13层与第14层之间(钱方等, 1985). 需要指出的是, Shen等(2009)利用宇生核素埋藏测年法得到第7~10层沉积物的年龄约为77±8万年, 但若考虑古地磁研究揭示的M/B界线的位置, 这一铝铍埋藏年龄有可能偏老(陈铁梅和周力平, 2009). 尽管如此, 该年龄为周口店组和周口店动物群提供了独立的同位素年龄制约.

在中国地层表(2014)中, 将周口店阶与国际地质年表(Gradstein等, 2012)中的“伊奥尼雅(Ionian)阶”(即“中更新阶”)对比, 其底界与伊奥尼雅阶底界一致, 年龄为0.781Ma, 与M/B界线一致. 根据目前的年代学数据基本可以确定周口店组的时代为中更新世. 周口店第一地点的沉积序列中, 虽然M/B界线位于第13层与第14层之间(钱方等, 1985), 但由于早期古地磁研究的客观条件所限, 例如采样分辨率较低、使用无定向磁力仪及交变退磁方法, 以及缺乏详细的岩石磁学研究等等, 周口店阶底界的确切位置尚未最终确定. 在今后周口店遗址的发掘过程中, 可进行高分辨率的古地磁采样, 利用零磁空间和低温超导磁力仪等测试条件, 在详细的岩石磁学研究的基础上, 建立周口店遗址剖面的地磁极性序列, 结合同位素年代学和生物地层学研究结果, 准确确定M/B界线(亦即周口店阶底界)的位置.

3.3 萨拉乌苏阶

萨拉乌苏阶为中国第四系上更新统. 1999年全国地层委员会第四系工作组提出建立萨拉乌苏阶的年代地层单位, 其阶名源自同名岩石地层单位“萨拉乌苏组”. 其命名剖面位于内蒙古伊克昭盟萨拉乌苏河(又名红柳河)流域, 层型剖面位于内蒙古乌审旗无定河镇酒房台剖面(闵隆瑞等, 2009).

酒房台剖面的地层自下而上分为三个组(闵隆瑞等, 2009): 底部为中更新统离石黄土; 中部为上更新统下部萨拉乌苏组, 以湖沼相粘土、粘土质粉砂为主, 夹河流相细砂, 自下而上分为1~5段; 上部为上更新统上部城川组, 以河流相细砂为主, 自下而上分为1~3段. 在酒房台剖面, 萨拉乌苏阶底界位于萨拉乌苏组第3段底部(闵隆瑞等, 2009).

萨拉乌苏阶内产出丰富的脊椎动物化石, 包括河套人, 并由此建立“萨拉乌苏动物群”. 萨拉乌苏动物群化石主要产出于萨拉乌苏阶下部的萨拉乌苏组, 共计45个属种, 包括33种哺乳类和12种鸟类(同号文等, 2008). 萨拉乌苏动物群的成员是我国北方晚更新世地层中常见的种类, 其中部分种类在中更新世就已出现, 例如诺氏古棱齿象(*Palaeoloxodon naumanni*)、赤鹿(*Cervus elaphus*)等; 许多种类在晚更新世出现, 例如狼(*Canis lupus*)、最后斑鬣狗(*Crocuta ultima*)、普氏野马(*Equus* cf. *przewalskii*)、野驴(*Equus hemionus*)及原始牛(*Bos primigenius*)等; 另外, 河套大角鹿(*Megaloceros ordosianus*)和王氏水牛(*Bubalus wansjocki*)是首次在萨拉乌苏发现而命名, 其他地点尚没有发现更

早的化石记录(同号文等, 2008).

前人利用热释光、光释光、碳-14等定年方法, 对萨拉乌苏河流域的酒房台、米浪沟湾、滴哨沟湾等剖面的萨拉乌苏组、城川组进行年代学研究, 结果表明, 萨拉乌苏组第3段底界(亦即萨拉乌苏阶底界)年龄约为150ka, 城川组顶界(亦即萨拉乌苏阶顶界)年龄约为10ka, 萨拉乌苏组与城川组界线(亦即萨拉乌苏阶下部和上部界线)年龄约为75ka (闵隆瑞等, 2009). 因此, 萨拉乌苏组大致与黄土高原末次间冰期古土壤S1和MIS5对比, 城川组大致与马兰黄土L1和MIS2~4对比(李保生等, 2004). 在中国地层表(2014)中, 将萨拉乌苏阶与国际地质年表(Gradstein等, 2012)中的"上更新阶"对比, 其底界与上更新阶底界一致, 年龄为0.126Ma. 因此, 还需要更多、更精准的年代学数据来约束代表性剖面上萨拉乌苏阶底界的准确位置.

4　中国第四纪代表性地层单元的年代学

4.1　风尘堆积

4.1.1　黄土高原黄土-古土壤序列

中国北方新生代风尘堆积包括黄土高原的上新世末-第四纪黄土-古土壤序列(刘东生, 1985; Ding等, 2002; Yang和Ding, 2010)、六盘山以东的晚中新世-上新世红粘土(孙东怀等, 1997; Ding等, 1998)以及六盘山以西的中新世-上新世红土(Guo等, 2002; Hao和Guo, 2004; Ge等, 2012; 郭正堂, 2017)等三套地层. 其中上新世末-第四纪黄土-古土壤序列分布最广, 西起祁连山、东至太行山、北到腾格里沙漠边缘、南到秦岭北坡, 通常被称为"黄土高原", 面积逾40万平方千米.

黄土高原完整的黄土-古土壤序列包括如下地层单元, 全新世部分为L0、S0, 更新世部分为L1/S1至L33, 上新世末期部分为S33、L34(刘东生, 1985; 丁仲礼和刘东生, 1989; Ding等, 2002; Yang和Ding, 2010). 因其在古全球变化研究方面的极端重要性及其对高精度时间标尺的需求, 大量的年代学研究工作导致该序列的时间标尺越来越趋向准确、精确, 其年代学研究的重要进展大致包括3个阶段.

(1) 磁性地层学定年阶段. 黄土高原黄土-古土壤序列的早期地层年代框架是利用磁性地层学方法建立起来的, 其中里程碑式的进展当属Heller和Liu (1982)的研究工作, 他们通过对洛川黄土钻孔剖面的磁性地层学研究, 将洛川黄土-古土壤序列底界年龄下延至Matuyama负极性时早期, 但尚未到达G/M界线, 并将其底界年龄估计为约2.4Ma, 由此奠定了中国第四纪黄土-古土壤序列的基本年代框架, 并被后来的诸多研究工作进一步确证. 目前, 黄土高原黄土-古土壤序列中最低的层位为黄土层L34, 其底界(亦即黄土-古土壤序列与下伏红粘土的界线) 跨越了G/M界线, 年龄约为2.8Ma (Yang和Ding, 2010).

大量的研究结果显示, 黄土高原黄土-古土壤序列记录了Gauss正极性时末期、Matuyama负极性时和Brunhes正极性时, 以及Olduvai和哈拉米洛(Jaramillo)两个正极性亚时. 其中, G/M界线多位于黄土层L33内(Yang和Ding, 2010); 而M/B界线的记录位置则差异较大(强小科等, 2016), 在黄土高原西北部多位于黄土层L8 顶部甚至古土壤层S7中-下部, 而在东南部M/B界线则位于L8底部或L8/S8过渡带附近. M/B界线记录位置的差异可能与黄土沉积物剩磁记录的滞后效应(即lock-in效应)有关(Zhou和Shackleton, 1999; Wang等, 2006). Jaramillo上、下界通常分别位于L10、L12内; Olduvai上界通常位于L25中部, 下界通常位于S26下部至L27顶部. 虽然lock-in效应对黄土的古地磁结果造成一定影响, 但影响是有限的, 例如, 马兰黄土记录了Mono Lake和Laschamp地磁漂移, 说明马兰黄土的剩磁不存在显著的lock-in效应(Zhu等, 1999; 朱日祥等, 2006). 总之, G/M界线、M/B界线、Olduvai上/下界、Jaramillo上/下界等主要地磁极性倒转构成了黄土高原黄土-古土壤序列年代框架的重要年龄基准点.

此外, 黄土高原黄土-古土壤序列还记录了Mono Lake、Laschamp、Norwegian-Greenland、Blake、Santa Rosa、Punaruu、Cobb Mountain、Gilsa、Reunion等地磁漂移, 其中Blake地磁漂移有较为广泛的记录(Zhu等, 1994, 1999; Zheng等, 1995; Pan等, 2002). 然而, 由于黄土沉积物剩磁获得过程十分复杂, 例如受到lock-in效应和平滑效应(即smoothing效应)(Zhou和Shackleton, 1999; Wang等, 2006; Zheng等, 1995)、粗颗粒磁铁矿被重磁化(Wang等, 2005b; Deng, 2008)或者某些剖面上黄土沉积物局部层位堆积过程的不连续性(Stevens等, 2006; Zhu等, 2007; Deng, 2008)等因素的影响, 地磁漂移在黄土中的记录远不如G/M、M/B等地磁极性倒转的记录广泛、稳定, 因此, 地磁漂移在黄土地层定年中的作用还比较有限.

(2) 磁化率与海洋氧同位素对比阶段. 在磁性地层年代学研究的基础上, Heller和Liu (1984, 1986)发现黄土高原黄土-古土壤序列的磁化率与海洋沉积物氧同位素序列能很好对比, 表明中国风尘堆积与大陆冰量、全球气候之间存在密切的内在联系. 这项工作使中国黄土成功融入了全球古环境框架, 是气候地层学领域的重要进展. 从地层年代学角度看, 可视为黄土高精度年代地层学的另一里程碑式进展. 将黄土的磁化率、粒度或其他气候代用指标序列与海洋氧同位素序列对比, 成为建立不同黄土剖面精细年代标尺的重要手段, 一直沿用至今(Kukla等, 1988; Hovan等, 1989; Guo等, 2000; Deng等, 2006a; Hao等, 2012).

(3) 轨道调谐定年阶段. 在业已建立黄土磁性地层学年代框架和磁化率与海洋氧同位素对比关系的基础上, 古气候学家着手建立更高精度的天文年代标尺. Ding等 (1994)建立了中国黄土的第一个天文年代标尺DYRL94. 随后, 多位学者考虑了不同地磁极性倒转界线的lock-in深度以及气候系统对太阳辐射变化响应的滞后效应, 利用磁化率和粒度序列建立了中国黄土的多个天文年代标尺, 包括LLZAD99 (Lu等, 1999)、HLD00 (Heslop等, 2000)、Chiloparts (Ding等, 2002)、SCAY06 (Sun等, 2006). 其中, 基于黄土高原5个剖面的高分辨率粒度序列(采样间距3~5cm)建立的Chiloparts (Ding等, 2002)被广泛使用, 并被纳入2012年版地质年表(GTS2012)(Gradstein等, 2012; Pillans和Gibbard, 2012).

总之, 对于黄土高原的黄土-古土壤序列, 其顶部的L0、S0属于全新统, L1、S1属于萨拉乌苏阶, L2至L8顶部属于周口店阶, L8中-下部至L33属于泥河湾阶, 底部的S33、L34属于上新统麻则沟阶. 另外, 黄土高原产出丰富的哺乳动物群(岳乐平和薛祥煦, 1996), 例如龙担、公王岭、阳郭、陈家窝等, 得益于较精准的黄土-古土壤序列时间标尺, 这些哺乳动物群的年代已得到较为准确的约束(表1、图1).

4.1.2 下蜀黄土

“下蜀黄土”是我国南方重要的第四纪风尘堆积, 结合气候地层学、磁性地层学等研究, 通常认为下蜀黄土发育于中更新世中期(乔彦松等, 2003; Zhang等, 2009; Hao等, 2010)至全新世(武春林等, 2006). 最近, 对扬州青山剖面和镇江大港钻孔岩芯(李徐生等, 2018)以及南京周家山剖面(Wang等, 2018)开展磁性地层学和光释光定年综合研究, 在下蜀黄土中揭示出了可靠的M/B界线, 从而将其底界年龄确定为约0.9Ma. 因此, 下蜀黄土跨越了泥河湾阶顶部、周口店阶、萨拉乌苏阶和全新统(图3).

4.1.3 其他地区的黄土-古土壤序列

除了黄土高原的黄土-古土壤序列和长江下游的下蜀黄土外, 内蒙东部、新疆昆仑山地区、四川西部以及东秦岭以南的山间盆地也发育较好的黄土-古土壤序列. 将磁性地层学、光释光及热释光定年方法相结合, 成功建立了这些黄土-古土壤序列的年代框架并准确确定其底界年龄. 例如, 昆仑山北坡的黄土-古土壤序列底界年龄可达88万年(方小敏等, 2001); 内蒙古东部赤峰地区的黄土-古土壤序列底界年龄可达1.22Ma (曾琳等, 2011; Zeng等, 2016); 东秦岭以南洛南盆地和汉中盆地的黄土-古土壤序列底界年龄至少分别为1.1Ma (鹿化煜等, 2007; Lu等, 2011)和1.2 Ma (Sun等, 2017b); 川西甘孜和金川地区的黄土-古土壤序列底界年龄分别为1.16Ma (乔彦松等, 2007)和2.84Ma (Qiao等, 2015).

4.2 河湖相地层

中国的第四纪河湖相地层分布广泛, 但地层发育较好、综合地层年代学研究程度较高的主要有河北泥河湾盆地和三门峡盆地, 以及云南元谋盆地和鹤庆盆地. 其次, 在山西榆社盆地、云南大理盆和西藏札达盆地, 除了发育良好的上新统外, 也发育了较好的第四系. 本节将总结上述代表性沉积盆地的地层年代学研究结果.

4.2.1 泥河湾盆地

泥河湾盆地的晚新生代河湖相地层被称之为“泥河湾层”, 最早由Barbour (1924)命名. 20世纪50年代初, 泥河湾层被确定为中国下更新统标准地层(Young, 1950). 现在, 通常认为泥河湾层是指泥河湾盆地内三趾马红土之上、晚更新世黄土(包括L1、S1)之下的一套河湖相沉积, 主要分布于河北阳原盆地、怀来盆地、蔚县盆地, 北京延庆盆地以及山西大同盆地. 其中, 阳原盆地东部泥河湾村附近的泥河湾层出露最好且富含哺乳动物化石. 泥河湾层曾被称为泥河湾组(袁

宝印等, 1996; Deng等, 2008), 后来, 泥河湾层被进一步划分为上新统稻地组、下更新统泥河湾组、中更新统小渡口组和上更新统许家窑组(图3)(周慕林等, 2000).

近十几年来, 不同学者对泥河湾盆地东部的十余个代表性剖面开展了高分辨率的磁性地层学研究(朱日祥等, 2007), 结果表明, 泥河湾层记录了Gauss正极性时以来的地磁极性特征, 包括Gauss、Matuyama和Brunhes极性时, 以及Olduvai和Jaramillo两个正极性亚时, 而且记录了第四纪地磁场的一些精细结构, 例如Kamikatsura、Santa Rosa、Punaruu和Cobb Mountain地磁漂移. 因此, 泥河湾层的沉积时代至少始于晚上新世(Deng等, 2008; Liu等, 2012). 由于地处不同的古地貌部位以及断裂活动等因素, 各代表性天然露头剖面底界的时代从上新世晚期到中更新世早期不等, 例如, 下沙沟约3Ma(Liu等, 2012), 大长梁约2Ma(Deng等, 2006b), 台儿沟约2Ma(未见底)(Wang等, 2004), 郝家台-马圈沟约1.7Ma(未见底)(Zhu等, 2004), 小长梁约1.5Ma(Zhu等, 2001), 飞梁约1.2Ma(Deng等, 2007b), 东谷坨约1.1Ma(Wang等, 2005a), 后沟约0.8Ma(左天文等, 2012), 虎头梁<0.78Ma. 其中, 下沙沟剖面不仅产出著名的下沙沟动物群(Teilhard de Chardin和Piveteau, 1930), 而且记录了第四系底界以及约3Ma以来近乎完整的泥河湾层(Liu等, 2012), 对中国北方河湖相地层年代学研究具有重要价值. 泥河湾层中产出丰富的哺乳动物群, 其年代学结果见3.1节.

泥河湾层的顶界具有一定的穿时性. 根据泥河湾层之上堆积了晚更新世黄土(例如郝家台、小长梁、东谷坨、后沟等剖面)或者全新世土壤(例如花豹沟、红崖和虎头梁等剖面)等特征, Deng等 (2008)曾推断, 自晚更新世早期开始, 泥河湾层沉积逐渐结束, 最终结束于晚更新世晚期. 稍后, 光释光年代学研究对泥河湾层顶部及其上覆黄土的年龄给出了更准确的制约, 例如, 郝家台剖面泥河湾层上覆的S1底部年龄为(127.5±6.6)ka(Zhao等, 2010)或约130ka(年小美等, 2013), 郝家台剖面泥河湾层顶部年龄为(266±16)ka(Zhao等, 2010)或约420~360ka(年小美等, 2013), 后沟和红崖剖面泥河湾层顶部年龄为420~360ka(年小美等, 2013), 虎头梁剖面泥河湾层顶部年龄为约270ka(年小美等, 2013). 考虑到黄土沉积之前泥河湾层顶部已被部分侵蚀, 因此, 泥河湾盆地东部泥河湾层沉积的结束时间可能早至20~30万年前的中更新世晚期, 大致相当于黄土高原的S2~S3发育时期.

根据目前的地层年代学研究结果, 泥河湾层底部的稻地组属于上上新统麻则沟阶, 下部的泥河湾组属于下更新统泥河湾阶, 中部的小渡口组属于中更新统周口店阶, 顶部的许家窑组属于上更新统萨拉乌苏阶.

4.2.2　三门峡盆地

晚新生代三门古湖的沉积记录被较为完整地保存在三门峡盆地. 这套河湖相沉积最早于1918年被丁文江命名为“三门系”(裴文中和黄万波, 1959), 分布于晋、陕、豫之间的黄河和渭河谷地及其支流谷地, 东起三门峡, 西至宝鸡(王苏民等, 2001). 近百年来, 学术界对三门系的划分和时代归属进行了广泛研究和探讨, 目前将这套地层统称为″三门组″(图3)(周慕林等, 2000). 王苏民等(2001)通过详细的地质考察, 选择山西平陆黄底沟天然剖面开展磁性地层学和热释光年代学研究, 结果表明, 黄底沟剖面几乎完整地记录了近5Ma以来三门古湖的沉积和演化历史. 他们将三门组的底界确定在C3n.3n (即Sidufjall, 4.896~4.799Ma)内, 将其顶界年龄确定为0.15Ma; 黄底沟剖面厚度约280m, 其中第四系部分厚约188m. 三门组的上部、下部亦分别被称为“黄三门”、“绿三门”, 薛祥煦(1981)在绿三门上部发现游河动物群, 并建立了游河组, 其时代为上新世晚期(袁复礼和杜恒俭, 1984). 因此, 黄三门和绿三门大致分别归属于更新统和上新统. 虽然三门组中产出丰富的哺乳动物化石, 其时代早至上新世晚期、晚至第四纪泥河湾期和周口店期(裴文中和黄万波, 1959), 但是许多化石产出的具体层位不清楚, 磁性地层学和生物地层学相结合的研究亦比较缺乏, 因此, 还需要更多的工作来准确厘定三门组各层位及其哺乳动物群的年代.

4.2.3　榆社盆地

榆社盆地发育从晚中新世到第四纪河湖相地层, 厚800余米, 统称“榆社群”, 分布于山西东南部的榆社、武乡一带. 榆社盆地由云簇、泥河、沤泥洼、潭村、张村等五个次级盆地组成, 其中云簇和张村两个次级盆地的榆社群发育最为完整, 化石最为丰富(邱占祥等, 1987; Shi等, 1993; Tedford等, 2013). 张村盆地的榆社群包括下上新统任家垴组和王宁组、上上新统张村组和下更新统楼则峪组(Shi等, 1993; Li等, 2004). 云

簇盆地的榆社群包括上中新统马会组、下上新统高庄组、上上新统麻则沟组和下更新统海眼组(图3), 富含哺乳动物化石(邱占祥等, 1987; Tedford等, 2013), 中国陆相上新统的高庄阶和麻则沟阶即在此建立(邓涛等, 2010; 邓涛和侯素宽, 2011). 早期的磁性地层学结果显示, 张村盆地的楼则峪组时代跨越了C2r、C2n(即Olduvai)和C1r.2r早期, G/M界线位于张村组顶部(Shi等, 1993); 云簇盆地的海眼组为C2r的沉积(Tedford等, 1991). 因此, 楼则峪组和海眼组均属于泥河湾阶.

4.2.4 元谋盆地

元谋盆地发育一套厚达700余米的晚新生代河湖相地层, 剖面保存良好, 含有丰富的哺乳动物化石. 这套地层一直被作为我国南方下更新统河湖相沉积的典型地层单元. 1938年卞美年考察了元谋盆地, 稍后将这套地层命名为"元谋层", 并将其与欧洲维拉方层对比, 视为上新世晚期沉积(Bien, 1940). 中国地质学编辑委员会和中国科学院地质研究所(1956)编制的《中国区域地层表(草案)》中, 将这套地层命名为"元谋组", 归属于早更新世沉积. 1961年周明镇将元谋层分为两部分: 下部为沙沟含水獭化石层, 产法式大水獭(*Enhydriodon falconeri*), 时代为上新世晚期; 上部为第四纪含马、鹿、牛的化石层, 时代为早更新世, 相当于华北的泥河湾层. 1965年钱方在上那蚌村附近发现两颗元谋人牙齿化石. 1965~1977年间钱方等对这套地层进行了深入系统的研究, 建立了其岩性序列, 并统称"元谋组", 共分为4段(M1~M4)、28层, 从老到新依次为M1(1~4层)、M2(5~13层)、M3(14~23层)和M4(24~28层); 其古地磁年龄为3.1~1.5Ma(浦庆余和钱方, 1977), 后来又修订为3.40~1.33Ma(钱方和周国兴, 1991). 张宗祜等(1994)将这套地层称为"元谋群", 其中, 对下部地层沿用"沙沟组"的名称(周明镇, 1961), 对上部地层则称为"元马组". 目前学术界多采用沙沟组和元谋组的划分方案(图3)(周慕林等, 2000).

元谋盆地磁性地层学研究有悠久的历史, 本文不再赘述. 基于钱方等的岩石地层划分方案, Zhu等(2008a, 2008b)对元谋盆地的甘棠-茂易、大坡箐和牛尖包剖面开展了高分辨率的磁性地层学研究, 将其顶、底界分别确定在C1r.2r(1.778~1.072Ma)和C3n.3r(4.997~4.896Ma)内, 其年龄范围约为4.9~1.4Ma. 其中, 第1、2段界线(M1/M2)位于C2An.2n(3.207~3.116Ma)中部, 年龄约为3.2Ma; 第2、3段界线(M2/M3, 亦即沙沟组和元谋组的界线)位于Reunion之下20m左右, 年龄约为2.2Ma; 第3、4段界线(M3/M4)相当于Olduvai底界, 年龄约为2.0Ma. 因此, 沙沟组年龄为4.9~2.2Ma, 跨越了上新统高庄阶和麻则沟阶以及下更新统泥河湾阶; 元谋组年龄为2.2~1.4Ma, 为下更新统泥河湾阶. 含云南马(*Equus yunnanensis*)的"元谋动物群"(Bien, 1940; 裴文中, 1961; 钱方和周国兴, 1991)主要产出于第三段中部第18层至第四段上部第27层的元谋组中(钱方和周国兴, 1991), 相应的年龄约为2.1~1.5Ma(Zhu等, 2008a, 2008b).

4.2.5 鹤庆盆地

2002年实施的鹤庆钻探获得737.72m湖泊沉积岩芯, 其校正深度为665.83m, 岩性主要为粘土和粘土质粉砂. 通过对连续的U形槽岩芯进行高分辨率的古地磁测量, 获得了鹤庆钻孔岩芯的磁极性序列(An等, 2011), 结果显示, 鹤庆钻孔岩芯连续地记录了Gauss正极性时晚期(C2An.1n)以来的沉积, 不仅包括Gauss、Matuyama和Brunhes极性时, 以及Olduvai和Jaramillo两个正极性亚时, 而且可能记录了Laschamp、Santa Rosa、Gardar、Gilsa、Reunion等地磁漂移. M/B和G/M界线分别位于152.00m和614.47m深度. 钻孔底界年龄为2.78Ma. 钻孔顶部4.37~4.59m记录的Laschamp地磁漂移说明钻孔顶界时代为晚更新世晚期. 根据上述磁性地层年代学研究结果, 鹤庆钻孔岩芯底部属于上上新统麻则沟阶, 钻孔主体属于下更新统泥河湾阶和中更新统周口店阶, 顶部属于上更新统萨拉乌苏阶.

4.2.6 大理盆地

大理盆地发育一套厚达千米的晚新生代沼泽相、河湖相和冲洪积相地层, 剖面保存良好, 统称为"三营组", 含"三营植物群". Li等 (2013)对大理盆地大松坪剖面开展了高分辨率的磁性地层学研究, 结果显示, 这套地层记录了C4n.1r(7.695~7.642Ma)到C2n(即Olduvai, 1.945~1.778Ma)之间的沉积, 相应的年龄为7.6~1.8Ma, 即中新世晚期到更新世早期. 这套地层从下到上分为4段FA1~FA4, 其中FA1段(厚约295m)主要为湖沼相粘土, FA2段(厚约195m)和FA3段(厚约260m)主要为河湖相粉砂、细砂, FA4段(厚约215m)主要为冲洪积相细砂和砂砾层. 第四系底界位于FA4段下

部、FA3/FA4界线之上约30m处. 根据Li等(2013)的磁性地层年代学研究结果, FA1段为上中新统灞河阶上部和保德阶下部; FA2段和FA3段包括上中新统保德阶上部、下上新统高庄阶和上上新统麻则沟阶; 对于FA4段, 除了其底部约30m沉积物属于麻则沟阶顶部之外, 其余部分均属于下更新统泥河湾阶.

4.2.7　札达盆地

青藏高原西南缘札达盆地发育了一套新近纪-第四纪河湖相沉积物, 厚度约800m, 富含哺乳动物化石, 统称为"札达组"(Wang等, 2013b). 下部(厚约200m)主要为快速堆积的砾岩和含砾砂岩, 中部(厚约250m)为湖相泥岩和砂岩互层, 上部(厚约350m)以巨厚的砾岩和薄层泥岩互层为特征(王世峰等, 2008; Wang等, 2013b). 钱方(1999)、王世峰等(2008)和Saylor等(2009)先后对札达盆地沉积序列开展了磁性地层学定年工作, 所获得的年代学结果有一定差异, 比如, 其底界年龄早至9.5Ma、晚至6.15Ma, 顶界年龄早至2.6Ma、晚至<1Ma. Wang等(2013b)在上述三项研究的基础上, 综合磁性地层学和生物地层学资料将札达盆地沉积序列的年代重新厘定在C3An.1r(6.436~6.252Ma)至C1n(即Brunhes)之间, 相应的年龄约为6.4~0.4Ma. 根据这一方案, 札达盆地沉积序列的下部152m厚的沉积物年龄为6.4~5.3Ma, 属于上中新统保德阶, 产出三趾马化石; 中部468m厚的沉积物年龄为5.3~2.6Ma, 属于上新统高庄阶和麻则沟阶; 上部180m厚的沉积物年龄为2.6~0.4Ma, 其中顶部的56m属于中更新统周口店阶, 其他部分属于下更新统泥河湾阶, 泥河湾阶底部沉积物中产出真马化石.

4.2.8　其他沉积盆地

还有一些沉积盆地也发育较好的第四纪地层, 例如, 柴达木盆地的"七个泉组"(Wang等, 2007b)和银川盆地的"银川组"(童国榜等, 1998)大致相当于泥河湾阶; 青海湖一郎剑钻孔岩芯的磁性地层学研究结果显示其中-上部约400m沉积物岩芯记录了较完整的第四纪沉积(Fu等, 2013); 华北平原广泛分布巨厚的新生代冲洪积、河湖相沉积和海陆交互相沉积, 初步的磁性地层学研究结果显示第四系部分厚约300~500m(刘立军等, 2010; 袁桂邦等, 2014). 另外, 对于全国各地广泛发育的晚第四纪(特别是末次盛冰期以来)湖相沉积(包括玛珥湖沉积)的地层年代学问题, 本文不做详细讨论.

4.3　南方红土(网纹红土)

我国热带-亚热带地区广泛分布一套以红色和白色网纹镶嵌为特征的古土壤, 被称为"网纹红土"(尹秋珍和郭正堂, 2006)或"南方红土"(袁宝印等, 2008). 南方红土的母质有风尘堆积(乔彦松等, 2003)和河流阶地堆积(Hou等, 2000)等. 磁性地层学研究表明, 长江中、下游地区的南方红土沉积始于Matuyama负极性时晚期(即早更新世晚期), 多数已研究的剖面都记录了M/B界线; 部分剖面还记录了Jaramillo正极性亚时, 如浙江七里亭(Liu等, 2008)、江西九江长虹大道(蒋复初等, 1997)以及四川胜利和黄甲(赵志中等, 2007); 部分剖面沉积起始于Matuyama负极性时末期, 如安徽宣城(乔彦松等, 2003). 因此, 北亚热带长江中、下游地区南方红土沉积的起始年龄可早至1.2Ma. 南亚热带的广西百色盆地也广泛发育南方红土沉积, 由于强烈的化学风化导致重磁化从而使磁性地层学定年方法失效(Deng等, 2007a; Liu等, 2010), 但是, 百色盆地的南方红土中-上部产出玻璃陨石, 通过氩-氩同位素定年, 其年龄被精确测定为(803±3)ka(Hou等, 2000), 因此, 百色盆地南方红土的沉积时代为早更新世末期. 需要指出的是, 南方红土中网纹化作用发生的时代要显著晚于其母质沉积的时代. 结合气候地层学和土壤学分析, 尹秋珍和郭正堂(2006)揭示出网纹红土的发育期应当与北方黄土中的S4和S5对应, 大致相当于0.6~0.4Ma (Ding等, 2002). 因此, 南方红土相当于泥河湾阶上部和周口店阶下部(图3).

4.4　中国南方洞穴和裂隙沉积

中国南方更新世哺乳动物群传统上以"大熊猫-剑齿象(*Ailuropoda-Stegodon*)动物群"为代表. 随着后续的化石地点不断发现, "步氏巨猿(*Gigantopithecus blacki*)"更适合作为中国南方更新世早期哺乳动物群的特征分子, 含有该化石的动物群被称为"巨猿动物群"(周明镇, 1957; 金昌柱等, 2008). 于是, "巨猿动物群"和"大熊猫-剑齿象动物群"两个名称被沿用下来, 分别作为中国南方地区早、中更新世的代表性哺乳动物群(袁复礼和杜恒俭, 1984).

长期以来, 中国南方地区更新世洞穴、裂隙哺乳

动物群的年代确定多依靠生物年代学方法. 近10余年来, 该地区洞穴沉积物及其赋存的哺乳动物群的年代学研究取得了重要进展, 获得了大量的磁性地层学、铀系、电子自旋共振等方法的年代学数据(表2). 在此基础上, Wang等(2014)将"巨猿动物群"进一步修订为"巨猿-中华乳齿象(*Gigantopithecus-Sinomastodon*)动物群", 其时代从更新世早期一直延续到中更新世中期. 空间上, 该动物群在广西分布最为集中, 在贵州、海南、重庆和湖北等地零星分布. 根据已有的年代学和生物演化资料, "巨猿-中华乳齿象动物群"在更新世期间的演化过程可分为四个阶段(图2)(Jin等, 2014; Wang等, 2017).

阶段一为早更新世早期, 年龄为2.58~1.95 Ma, 对应于C2r (即Matuyama负极性时早期), 以崇左百孔洞(2.58~1.95Ma) (Sun等, 2014)、巫山龙骨坡(2.5~2.2Ma) (Han等, 2017)以及柳城巨猿洞为代表, 这些动物群都包含齿形较小的步氏巨猿、新近纪孑遗分子以及一些更新世首次出现的属种(Jin等, 2014; Wang等, 2017). 尽管Rink等(2008)通过电子自旋共振与铀系定年法将柳城巨猿洞的年龄确定为1.21~0.94Ma, 古生物学家基于生物年代学结果仍然认为柳城巨猿洞动物群应该代表早更新世早期的巨猿–中华乳齿象动物群, 与百孔洞、龙骨坡等动物群的时代相近(金昌柱等, 2008; Jin等, 2014).

阶段二为早更新世中期, 年龄为1.95~1.20Ma, 即从Olduvai底界至Cobb Mountain顶界, 以布兵盆地吹风洞((1.92±0.14)Ma) (Shao等, 2014)、么会洞(1.95~1.78Ma)(Sun等, 2017a), 以及崇左巨猿洞(1.95~1.78Ma)(Sun等, 2014)、三合大洞(约1.2Ma) (金昌柱等, 2009; Sun等, 2014)为代表, 动物群特征具有过渡性质, 例如步氏巨猿的体型变大、一些原始种类消失以及新种的出现等(Jin等, 2014; Wang等, 2017).

阶段三为早更新世晚期, 年龄为1.20~0.78Ma, 即从Cobb Mountain上界至M/B界线, 以崇左缺缺洞(1.07~0.99Ma) (Sun等, 2014)为代表, 动物群特征表现为新近纪孑遗分子的下降和现生种的比例升高、早更新世与中更新世的典型物种共存以及巨猿等物种的齿形显著增大等(Jin等, 2014), 体现出由早更新世向中更新世过渡的特点.

阶段四为中更新世早-中期, 年龄为0.78~0.32Ma, 以崇左合江洞动物群(400~320ka)(Zhang等, 2014)为代表. 合江洞动物群与越南北部的Tham Khuyen洞动物群((475±125)ka) (Ciochon等, 1996)年龄接近, 该动物群中的早更新世分子被典型的中更新世种类替代而消失, 现生种的比例增高(Wang等, 2017).

得益于多种地质年代学手段的成功应用, 一些重要地点的大熊猫-剑齿象动物群的年龄也得到了更为准确的约束. 例如, 利用电子自旋共振与铀系等定年法, 确定了布兵盆地一系列动物群的年龄, 包括狮子洞(0.517~0.366Ma) (孔丽娟等, 2012)、雾云洞(0.35~0.20Ma)(Wang等, 2007a)或(0.279~0.076Ma)(Rink等, 2008)、瀑布上洞(0.28~0.088Ma) (Rink等, 2008)和陆那洞(0.127~0.07Ma) (Bae等, 2014). 此外, Liu等(2015)利用宇生核素埋藏测年法, 将湖北郧县的白龙洞动物群年龄确定为(0.76±0.06)Ma. 贵州盘县大洞动物群的年龄也由光释光测年法确定为300~190ka (Zhang等, 2015).

广西武鸣步拉利山与大新黑洞都产出"巨猿"和"大熊猫-剑齿象"两个动物群, Rink等(2008)根据动物群组成对二者进行了区分, 并得到其绝对年龄分别为481~745ka(武鸣)和308~380ka(大新), 但作者并没有明确指出这两个年龄对应于哪个层位、应代表哪个动物群. 基于生物年代学资料, 金昌柱等(2009)认为大新黑洞巨猿动物群要老于武鸣步拉利山巨猿动物群. 最近, Shao等(2017) 将大新黑洞大熊猫-剑齿象动物群年龄确定为(383±20)ka, 并推测层位较低的大新黑洞巨猿动物群年龄应大于400ka, 这一结果是对Rink等(2008)年代学工作很好的补充.

综上所述, 巨猿-中华乳齿象动物群主要生活于早更新世泥河湾期, 延续至中更新世周口店期中期; 大熊猫-剑齿象动物群主要生活于周口店期中-晚期, 延续至萨拉乌苏期. 在巨猿–中华乳齿象动物群演化的末期, 即中更新世早、中期, 大熊猫-剑齿象动物群开始逐步繁盛, 并渐渐将前者取而代之.

4.5 石笋

20世纪80年代以来, 热电离质谱(TIMS)(Edwards等, 1987)、电感耦合等离子质谱(ICP-MS)(Luo等, 1997; Shen等, 2002)和多接收器电感耦合等离子质谱(MC-ICP-MS)(Cheng等, 2009)等高精度定年方法成功用于^{230}Th定年, 从而实现建立石笋记录的高精度绝对年代标尺. 这一定年方法的突破有力地推动了第四纪

晚期全球气候变化研究和气候地层学的发展. 近20年来, 科学家利用中国(尤其是南方)丰富的石笋记录, 获得了多条有高精度绝对年龄控制的石笋氧同位素序列, 在建立第四纪晚期气候对比的中国基准方面迈出了重要一步, 代表性工作有南京葫芦洞、湖北神农架三宝洞、贵州董哥洞等洞穴的石笋氧同位素序列.

本世纪初获得的南京葫芦洞石笋氧同位素序列记录了末次冰期(75~11ka)完整的东亚季风变化历史(Wang等, 2001). 稍后, 在湖北神农架三宝洞、贵州董哥洞等获得的石笋氧同位素序列, 将高分辨率的亚洲季风记录逐步延伸至末次间冰期(Yuan等, 2004)、倒数第二次间冰期(Wang等, 2008)、倒数第四次间冰期(Cheng等, 2009)乃至倒数第六次间冰期(Cheng等, 2016). 这些石笋氧同位素序列精细刻画了过去七个冰期-间冰期旋回中季风气候轨道-亚轨道尺度变化的高分辨率时间序列, 证实了过去七次主要冰期终止是由岁差引起的太阳辐射变化驱动(Cheng等, 2016).

4.6　海相地层

中国第四纪海相沉积主要包括南海碎屑沉积和生物礁沉积以及东部陆架沉积. 其中, 中国东部陆架沉积既有海相又有陆相, 在本节一并论述.

4.6.1　南海碎屑沉积

南海碎屑沉积主要分布在南海北部的珠江口盆地和南海海盆. 珠江口盆地更新统主要为一套灰色、灰绿色海相粘土, 夹有薄层粉砂, 根据钙质超微化石组合, 其底界与钙质超微化石带NN18一致, 接近第四系底界(Huang, 1997). 南海海盆包括南北两部分. 基于ODP184航次岩芯的系统研究, 包括岩石地层学、生物地层学, 以及碳、氧同位素地层学等, 显著提升了南海海盆北部的地层年代学研究水平(汪品先等, 2003). 其第四系主要为深海相粉砂和粘土, 夹砂砾层, 含丰富的生物碎屑. 其中在南海北部的1148站获得了跨越整个新近纪-第四纪的氧同位素序列(汪品先等, 2003), 南海南部的1143站则为ODP钻孔中上新世以来时间分辨率最高的氧同位素序列之一(Tian等, 2002). 南部盆地的沉积序列与北部盆地相似, 但其地层年代学研究程度较低.

在南海深海盆地的第四系中, 微玻陨石和火山灰层是区域地层对比的重要标志层. 其中, 南海北部陆坡ODP1146B孔的M/B界线之下0.58~1.09m为微玻陨石层(李霞等, 2004), 南沙北部海域17957-2柱状样柱深7.80~8.10m层段(相当于氧同位素19/20期界线附近)也发现微玻陨石层 (赵泉鸿等, 1999). 该微玻陨石层与广西百色盆地红土堆积中的玻璃陨石很可能是同一次撞击事件的产物, 后者的氩-氩同位素年龄为(803±3)ka (Hou等, 2000).

梁细荣等(2001)在南海南部ODP1143A孔上部发现了三层2cm厚火山灰, 其深度分别为5.55m(A层)、42.66m(B层)和48.25m(C层). 通过地球化学分析, 作者认为这三层火山灰很可能是印尼苏门答腊岛火山喷发在南海的记录, 可分别与Toba火山喷发形成的YTT、OTT和HDT等火山灰层对应. 作者进一步根据微体古生物年代学确定ODP1143A孔中A、B和C三层火山灰的年龄分别约为0.07、0.80和1.0Ma. 这些年龄估计值与上述火山灰层的氩-氩同位素年龄基本一致: YTT为(73.7±0.3)ka(Mark等, 2017), OTT为(792.4±0.5)ka (OTTA)和(785.6±0.7)ka(OTTB) (Mark等, 2017), HDT约为1.2Ma(Chesner和Rose, 1991).

4.6.2　南海生物礁沉积

南海生物礁沉积时代几乎跨越整个新近纪-第四纪, 主要发育在中-西沙和南沙台地上. 其中, 西沙的生物礁沉积最典型, 包括下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组和第四系乐东组(邵磊等, 2016). 基于西沙群岛东北部的西科一井钻孔岩芯的层序地层学研究(朱伟林等, 2015), 乐东组的底界被置于埋深215m处的主暴露面. 随后, 王振峰等(2017)对西科一井钻孔岩芯进行磁性地层学与^{230}Th定年, 揭示出乐东组的底界大致相当于Olduvai底界, 年龄约为2.0Ma; M/B界线位于65m深度处; 32.7m深度处的^{230}Th年龄为(151±1)ka. 根据上述年代学结果, 西科一井大约30m深度之上属于上更新统萨拉乌苏阶, 约30~65m深度范围的沉积物属于周口店阶, 65~215m深度范围的沉积物属于泥河湾阶, 第四系底界应该位于莺歌海组内.

4.6.3　中国东部陆架沉积

对于中国东部陆架区的地层年代学, 渤海和南黄海的研究较为深入, 北黄海和东海的研究相对较弱(袁桂邦等, 2014; 刘建兴等, 2015; 易亮等, 2016; Yi等,

2016; Xu等, 2017, 2018).

渤海及其周边地区第四系由两套不同的地层单元组成, 即晚第四纪以来的三次主要海侵事件沉积及其下伏的河湖相地层. 晚第四纪三次主要海侵事件由赵松龄等(1978)提出, 从老到新分别为沧州海侵、黄骅海侵(含渤海海侵)和献县海侵. 通过综合^{14}C、光释光、磁性地层学以及天文调谐等多种年代学方法, 三次海侵事件的时代已被确定为MIS7、MIS5~3和全新世(易亮等, 2016). 上述海侵沉积的下伏河湖相地层可进一步划分为三套沉积, 即下部的冲洪积相细砂、粗砂, 中部的湖相粘土质粉砂, 以及上部夹有弱海侵沉积的湖相沉积. 磁性地层学研究(袁桂邦等, 2014; 易亮等, 2016; Yi等, 2016; Xu等, 2017, 2018)表明, 这套河湖相沉积在中新世末期开始发育, 由于受到断裂活动影响, 地层厚度变化较大, 其中M/B界线一般浅于150m, G/M界线深至476m、浅至150m左右.

综合环渤海地区的地层年代学研究结果, 上新世以来渤海陆架(盆地)演化可分为三个阶段(Yi等, 2016; 易亮等, 2016): 阶段一, 即大约3.7Ma之前, 盆地快速沉降, 以河流相、冲洪积相沉积为主, 主要属于高庄阶; 阶段二, 即3.7~0.3Ma, 盆地沉降较为稳定, 表现为"渤海古湖"发育, 庙岛古隆起相对地势较高, 隔绝了渤海与北黄海盆地, 这一阶段主要为湖相沉积, 地层时代跨越麻则沟阶、泥河湾阶和周口店阶; 阶段三, 即大约0.3Ma以来, 伴随着庙岛古隆起的解体, "渤海古湖"消失, 渤海陆架形成, 这一阶段主要为海相沉积, 地层时代主要属于周口店阶和萨拉乌苏阶.

黄海陆架区的第四系也由上部的海相地层和下部的陆相地层组成. 该区长尺度的磁性地层学研究主要集中在南黄海, 代表性钻孔有QC2(周墨清和葛宗诗, 1990)、EY02-2(葛淑兰等, 2005)、NHH01(Liu等, 2014)、DLC70-3(Mei等, 2016)和CSDP-1(Liu等, 2016a). 上述磁性地层学研究结果显示, M/B界线位于60~70m深度附近. 在CSDP-1钻孔中还首次揭示了黄海陆架第四系的底界(亦即G/M界线), 相应的深度为227.16m, 该钻孔的底界年龄约为3.5Ma(Liu等, 2016a). 综合磁性地层年代学和沉积学研究结果, Liu等(2016a)认为海水首次达南黄海CSDP-1钻孔位置的时间不晚于约1.7Ma, 南黄海中部地区自约1Ma以来基本为海相沉积, 而南黄海西部地区约0.7Ma之后才以海相沉积为主, 此前以陆相沉积为主. 综上所述, 对于南黄海陆架沉积序列, 泥河湾阶和周口店阶分别以陆相和海相沉积为主.

5 中国各大区第四系对比格架

中国第四纪地层以陆相为主. 北方的陆相第四系主要为风尘堆积和河湖相堆积, 南方的陆相第四系则以网纹红土、洞穴堆积和河湖相堆积为特征, 青藏高原地区主要为河湖相堆积及山麓堆积. 第四纪海相地层在我国东部、南部的四大海域皆有分布, 以碎屑沉积为主, 第四纪生物礁沉积只分布于南海地区. 可见, 中国第四系沉积类型多样, 分布广泛. 全国地层委员会牵头编写的《中国地层典》中, 将中国第四系分为四个大区, 即西部地层区、中部地层区、东部地层区、海域及岛屿地层区(周慕林等, 2000; 程裕淇等, 2009). 考虑到第四纪时期我国的地理、地貌与环境格局与现今基本一致, 以秦岭-淮河为界, 生物群和沉积物特征显示出明显的南北差异. 因此, 对于陆相第四系, 本文暂分为北方和南方两个大区进行论述; 对于海相第四系, 则不再细分, 单列一节进行论述.

5.1 北方陆相第四系

中国北方的第四系以风成沉积与河湖相沉积为主, 洞穴沉积分布局限. 风成沉积以黄土高原的黄土-古土壤序列为代表. 黄土高原内部与周缘分布有零星的河湖相堆积和风成沙丘等类型的沉积. 在黄土高原之外的一些沉积盆地内, 则赋存典型的河湖相地层, 如东北地区、泥河湾盆地、三门峡盆地、渭河盆地等, 洞穴堆积仅在秦岭、华北平原及东北地区有零星分布.

在我国北方, 泥河湾阶的典型地层包括午城黄土及离石黄土下部(即L33至L8)、泥河湾盆地的泥河湾组、三门峡盆地的三门组中部(即"黄三门"中下部)以及榆社盆地的海眼组和楼则峪组等. 周口店阶的典型地层包括离石黄土上部(即L8至L2)、周口店第一地点的洞穴堆积、泥河湾盆地的小渡口组、三门峡盆地的三门组上部等. 萨拉乌苏阶的典型地层包含马兰黄土和离石黄土顶部(即L1与S1)、萨拉乌苏河流域的萨拉乌苏组与城川组、泥河湾盆地的许家窑组等. 全新统的典型地层主要有黑垆土(S0)和全新世黄土(L0)、湖相沉积, 以及部分地区洞穴中的石笋.

5.2　南方陆相第四系

中国南方地区处于热带-亚热带地区, 气候温暖湿润, 且广泛发育古生代、中生代碳酸盐沉积, 因此该区的第四系以网纹红土及洞穴/裂隙沉积物为主, 在一些小型盆地内发育河湖相沉积. 此外, 长江下游地区可见风成黄土-古土壤序列(即下蜀黄土). 作为一个特殊的地理单元, 青藏高原内部主要以零星分布的河湖相沉积为主, 高原周缘则常常发育以砾石为特征的冲积扇、洪积扇等山麓沉积, 在青藏高原东缘的川西高原还发育较好的黄土-古土壤序列.

在中国南方地区, 泥河湾阶的代表性地层包括网纹红土下部、广西崇左地区与布兵盆地内含有巨猿-中华乳齿象动物群的洞穴沉积物、重庆巫山龙骨坡洞穴沉积, 以及青藏高原东南缘的鹤庆盆地钻孔中-下部(152.00~614.47m深度)、元谋盆地沙沟组上部与元谋组、大理盆地三营组上部的冲洪积物(厚度约215m)、青藏高原札达盆地上部的湖滨相和冲洪积物(厚度约180m). 周口店阶以网纹红土上部、中国南方地区含大熊猫-剑齿象动物群的洞穴沉积物、鹤庆盆地钻孔上部、下蜀黄土中-下部以及中国南方洞穴中(如湖北神农架三宝洞、贵州董哥洞)的石笋为代表. 萨拉乌苏阶的代表性地层包括下蜀黄土上部、鹤庆盆地钻孔顶部及一些含有人类化石的洞穴沉积物. 全新统的典型地层主要有下蜀黄土顶部、湖相沉积以及石笋等. 川西高原的黄土-古土壤序列时代则跨越了上上新统麻则沟阶顶部以及更新统泥河湾阶、周口店阶和萨拉乌苏阶.

5.3　海相第四系

我国的渤海、黄海、东海和南海均发育第四纪海相沉积, 均以碎屑沉积为主, 只有南海海域发育第四纪生物礁沉积. 在东部陆架地区, 以渤海和南黄海陆架沉积的地层年代学研究较为深入. 渤海地区的海相沉积主要自约0.3Ma以来发育, 0.3Ma至第四纪初期以陆相沉积为主. 在南黄海, 其中部地区自约1Ma以来基本为海相沉积, 而其西部地区约0.7Ma之后才以海相沉积为主, 此前主要为陆相沉积. 南海的碎屑沉积和生物礁沉积都跨越整个新近纪到第四纪.

泥河湾阶的典型地层包括西科一井乐东组中下部和莺歌海组上部的生物礁沉积, 以及ODP184航次岩芯中MIS103至MIS19之间的部分; 周口店阶以南黄海钻孔约60~70m深度之上的地层、西科一井乐东组上部(约30~65m深度)和ODP184航次岩芯中MIS19至MIS5之间的部分为代表; 萨拉乌苏阶的地层则见于西科一井乐东组顶部(约30m深度之上的部分)和ODP184航次岩芯中MIS5至MIS2之间的部分; 海相全新统分布广泛, 例如ODP184航次岩芯的顶部.

6　结论、存在问题和今后努力的方向

考虑到中国第四纪地层以陆相为主, 并且以南海ODP184航次钻孔岩芯为代表的第四纪海相地层的高精度气候地层年代学标尺已经建立, 本节内容主要针对陆相第四系.

对于中国的第四纪陆相地层, 结合生物地层学和磁性地层学研究, 已基本实现地磁极性倒转框架控制下的不同沉积盆地之间以及不同沉积类型之间的区域地层对比. 中国黄土的气候地层年代学研究引领了中国第四纪地层年代学的发展, 通过将古气候代用指标(如磁化率、粒度)与海洋氧同位素对比以及轨道调谐定年, 已建立黄土高原第四纪黄土-古土壤序列的高精度气候地层年代学标尺, 并实现不同黄土剖面之间的地层在轨道尺度上的精细对比.

统一的地层年表是地质工作的标准. 建立统一的年代地层系统不仅对地学基础研究有重要意义, 而且对资源、环境、工程等应用和应用基础领域亦具有重要价值. 中国(尤其是东部)中、新生代地层以陆相为主, 因此, 在建立中国中、新生代地层年代系统时, 既要考虑陆相地层对比, 又要考虑海陆地层对比. 其中, 中国第四纪陆相地层年代学的一个重要特点是与磁性地层学和气候地层学具有紧密联系, 其近期努力方向至少包括以下几个方面.

(1) 加强精细的生物地层学研究, 强调生物地层年代学在中国第四纪陆相地层年代系统中的基础地位. 因此, 建立中国第四纪陆相地层年代系统的努力方向之一是, 综合多种年代学手段精确厘定重要动物群的年龄, 并综合多种古环境替代指标分析, 准确重建其生存环境, 建立代表性动物群的气候地层年代学序列, 实现有精确年龄控制的生物年代地层框架与气候地层年代框架的有机结合.

(2) 中国第四纪陆相地层普遍缺乏可进行精确同

位素定年的火山灰等物质, 因此, 在建立中国第四纪陆相地层年代系统的过程中, 应在高精度磁性地层年代学框架的基础上, 结合轨道调谐定年, 建立有精确年龄控制的代表性非风尘堆积序列的高精度时间标尺, 实现其与黄土高原黄土-古土壤序列在轨道尺度上的精细对比, 从而实现不同区域之间和不同沉积类型之间在轨道尺度上的精细地层对比.

(3) 将上述高精度的陆相第四系气候地层年代学研究结果与海洋沉积的高精度气候地层年代学相结合, 实现海陆相第四系在冰期-间冰期旋回尺度上的精细对比, 不仅建立冰期-间冰期旋回尺度上的中国陆相第四系气候地层学年表, 而且建立综合考虑海陆相地层的、统一的中国第四纪年代地层系统.

致谢 戎嘉余院士和沈树忠院士组织和约稿, 沈树忠院士、葛俊逸博士和两位审稿人提出了建设性意见, 孙蕗帮助准备图件, 孙蕗、易亮、刘彩彩、李仕虎、蔡书慧、刘建兴、胥勤勉、杨石霞、刘平、张岩和刘素贞提供了资料和文献, 在此表示衷心感谢.

参考文献

陈铁梅, 原思训, 高世君, 王良训, 赵桂英. 1982. 许家窑遗址哺乳动物化石的铀子系法年代测定. 人类学学报, 1: 91–95

陈铁梅, 周力平. 2009. 周口店北京猿人遗址的年代综述兼评该遗址的铝铍埋藏年龄. 人类学学报, 28: 285–291

程裕淇, 王泽九, 黄枝高. 2009. 中国地层典. 总论. 北京: 地质出版社. 411

邓涛. 2006. 中国新近纪哺乳动物生物年代学. 古脊椎动物学报, 44: 143–163

邓涛, 侯素宽. 2011. 中国陆相上新统麻则沟阶. 地层学杂志, 35: 237–249

邓涛, 侯素宽, 王太明, 穆永清. 2010. 中国陆相上新统高庄阶. 地层学杂志, 34: 225–240

邓涛, 薛祥煦. 1997. 重论真马(*Equus*属)首次出现可作为第四纪下限的标志. 地层学杂志, 21: 109–116

丁仲礼, 刘东生. 1989. 中国黄土研究新进展(一): 黄土地层. 第四纪研究, 9: 24–35

方小敏, 吕连清, 杨胜利, 李吉均, 安芷生, 蒋平安, 陈秀玲. 2001. 昆仑山黄土与中国西部沙漠发育和高原隆升. 中国科学 D辑: 地球科学, 31: 177–184

葛淑兰, 石学法, 朱日祥, 刘焱光, 印萍, 刘乐军. 2005. 南黄海EY02-2孔磁性地层及古环境意义. 科学通报, 50: 2531–2540

郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来. 中国科学: 地球科学, 47: 421–437

侯连海. 1985. 周口店第一地点鸟类化石. 见: 吴汝康, 等. 北京猿人遗址综合研究. 北京: 科学出版社. 113–118

胡长康. 1985. 周口店第一地点哺乳动物化石研究的历史及进展. 见: 吴汝康, 等. 北京猿人遗址综合研究. 北京: 科学出版社. 107–113

蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 赵志中, 王苏民, 薛滨. 1997. 九江地区网纹红土的时代. 地质力学学报, 3: 27–32

金昌柱, 秦大公, 潘文石, 唐治路, 刘金毅, 王元, 邓成龙, 王頠, 张颖奇, 董为, 同号文. 2009. 广西崇左三合大洞新发现的巨猿动物群及其性质. 科学通报, 54: 765–773

金昌柱, 郑家坚, 王元, 徐钦琦. 2008. 中国南方早更新世主要哺乳动物群层序对比和动物地理. 人类学学报, 27: 304–317

孔丽娟, 沈冠军, 王頠, 李大伟, 赵建新. 2012. 狮子洞铀系测年与百色盆地第Ⅲ级阶地的年代. 地球与环境, 40: 349–353

李保生, 靳鹤龄, 祝一志, 董光荣, 温小浩. 2004. 萨拉乌苏河流域第四系岩石地层及其时间界限. 沉积学报, 22: 676–682

李传夔, 吴文裕, 邱铸鼎. 1984. 中国陆相新第三系的初步划分与对比. 古脊椎动物学报, 22: 163–178

李普, 钱方, 马醒华, 浦庆余, 邢历生, 鞠石强. 1976. 用古地磁方法对元谋人化石年代的初步研究. 中国科学, 6: 579–591

李霞, 赵泉鸿, 黄宝琦, 苏新. 2004. 中更新世撞击事件年龄的高分辨率估算. 海洋地质与第四纪地质, 24: 73–77

李徐生, 韩志勇, 鹿化煜, 陈英勇, 李洋, 苑晓康, 周玉文, 蒋梦瑶, 吕存娟. 2018. 下蜀黄土底界的年代及其对区域气候变干的指示. 中国科学: 地球科学, 48: 210–223

梁细荣, 韦刚健, 邵磊, 李献华, 王汝成. 2001. Toba火山喷发在南海沉积物中的记录——ODP1143站钻孔火山玻璃的证据. 中国科学 D辑: 地球科学, 31: 861–866

刘椿, 朱湘元, 叶素娟. 1977. “北京人”化石产地洞穴堆积物的古地磁学研究. 地质科学, 12: 26–33

刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社. 251

刘东生, 施雅风, 王汝建, 赵泉鸿, 翦知湣, 成鑫荣, 汪品先, 王苏民, 袁宝印, 吴新智, 邱占祥, 徐钦琦, 黄万波, 黄慰文, 安芷生, 鹿化煜. 2000. 以气候变化为标志的中国第四纪地层对比表. 第四纪研究, 20: 108–128

刘东生, 张宗祜. 1962. 中国的黄土. 地质学报, 42: 1–14

刘建兴, 刘青松, 石学法, 王春娟, 陈皎洁. 2015. 黄海第四纪年代学研究进展. 海洋地质前沿, 31: 17–25

刘立军, 徐海振, 崔秋苹, 王娟. 2010. 河北平原第四纪地层划分研究. 地理与地理信息科学, 26: 54–57

鹿化煜, 张红艳, 王社江, Cosgrove R, 赵存法, Stevens T, 赵军. 2007. 东秦岭南洛河上游黄土地层年代的初步研究及其在旧石器考古中的意义. 第四纪研究, 27: 559–567

闵隆瑞, 朱关祥, 关友义. 2009. 内蒙古萨拉乌苏河流域第四系更新统上部萨拉乌苏阶基本特征剖析. 中国地质, 36: 1208–1217

年小美, 周力平, 袁宝印. 2013. 泥河湾陆相沉积物光释光年代学研

究及其对古湖泊演化的指示意义. 第四纪研究, 33: 403–414
裴文中. 1957. 中国第四纪哺乳动物群的地理分布. 古脊椎动物与古人类, 1: 9–24
裴文中. 1961. 云南元谋更新世初期的哺乳动物化石(附广西柳城“巨猿洞”马化石的研究). 古脊椎动物与古人类, 5: 16–30
裴文中, 黄万波. 1959. 对三门系的一些意见. 见: 中国第四纪研究委员会, 编. 三门峡第四纪地质会议文集. 北京: 科学出版社. 3–20
裴文中, 周明镇, 郑家坚. 1963. 中国的新生界. 北京: 科学出版社. 31
浦庆余, 钱方. 1977. 对元谋人化石地层—元谋组的研究. 地质学报, 51: 89–100
钱方. 1999. 青藏高原晚新生代磁性地层研究. 地质力学学报, 5: 22–34
钱方, 张景鑫, 殷伟德. 1985. 周口店第一地点西壁及探井堆积物磁性地层研究. 见: 吴汝康, 等. 北京猿人遗址综合研究. 北京: 科学出版社. 251–255
钱方, 周国兴. 1991. 元谋第四纪地质与古人类. 北京: 科学出版社. 222
强小科, 徐新文, 陈艇, 赵辉, 郑浩田. 2016. 黄土高原黄土序列松山-布容地磁极性倒转界线空间分布特征与影响因素探讨. 第四纪研究, 36: 1125–1138
乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 吴文祥, 姜文英, 袁宝印, 张仲石, 魏建晶, 赵华. 2003. 皖南风尘堆积-土壤序列的磁性地层学研究及其古环境意义. 科学通报, 48: 1465–1469
乔彦松, 刘冬雁, 李朝柱, 李名则, 王燕, 赵志中. 2007. 川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究. 地质力学学报, 13: 289–296
邱占祥. 2000. 泥河湾哺乳动物群与中国第四系下限. 第四纪研究, 20: 142–154
邱占祥, 黄为龙, 郭志慧. 1987. 中国的三趾马化石. 中国古生物志, 新丙种, 25: 1–250
全国地层委员会. 2017. 中国地层指南及中国地层指南说明书(2016年版). 北京: 地质出版社. 61
邵磊, 朱伟林, 邓成龙, 张迎朝, 翟世奎. 2016. 南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学: 年代地层与古海洋环境. 武汉: 中国地质大学出版社. 128
孙东怀, 刘东生, 陈明扬, 安芷生. 1997. 中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与气候变化. 中国科学 D辑: 地球科学, 27: 265–270
童国榜, 石英, 郑宏瑞, 张静, 林防, 何庆林, 宋祥华, 刘振西, 乔光东, 张纪祥, 羊向东, 张文卿. 1998. 银川盆地第四纪地层学研究. 地层学杂志, 22: 42–51
同号文, 李虹, 谢骏义. 2008. 萨拉乌苏动物群有关属种的修订与讨论. 第四纪研究, 28: 1106–1113
汪洪. 1988. 陕西大荔一早更新世哺乳动物群. 古脊椎动物学报, 26: 59–72
汪品先, 赵泉鸿, 翦知湣, 成鑫荣, 黄维, 田军, 王吉良, 李前裕, 李保华, 苏新. 2003. 南海三千万年的深海记录. 科学通报, 48: 2206–2215
王世锋, 张伟林, 方小敏, 戴霜, Kempf O. 2008. 藏西南札达盆地磁性地层学特征及其构造意义. 科学通报, 53: 676–683
王苏民, 吴锡浩, 张振克, 蒋复初, 薛滨, 童国榜, 田国强. 2001. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究. 中国科学 D辑: 地球科学, 31: 760–768
王元, 金昌柱, 邓成龙, 魏光飚, 严亚玲. 2013. 第四纪中华乳齿象属(*Sinomastodon*, Gomphotheriidae)头骨化石在中国的首次发现. 科学通报, 58: 931–939
王振峰, 张道军, 刘新宇, 尤丽, 罗威, 易亮, 谭亮成, 祝幼华, 秦华峰, 程海, 李忠权, 谢强, 车志伟, 邓成龙, 朱日祥. 2017. 基于古地磁与^{230}Th定年的西沙西科1井乐东组生物礁沉积年代的初步研究. 地球物理学报, 60: 1027–1038
武春林, 朱诚, 鹿化煜, 马春梅, 朱光耀, 郑朝贵, 许信旺. 2006. 南京地区下蜀黄土磁性地层年代与古环境变化. 地层学杂志, 30: 116–123
吴汝康, 任美锷, 朱显谟, 杨子赓, 胡长康, 孔昭宸, 谢又予, 赵树森. 1985. 北京猿人遗址综合研究. 北京: 科学出版社. 267
薛祥煦. 1981. 陕西渭南一早更新世哺乳动物群及其层位. 古脊椎动物与古人类, 19: 35–44
姚玉鹏, 刘羽. 2010. 第四纪作为地质年代和地层单位的国际争议与最终确立. 地球科学进展, 25: 775–781
易亮, 姜兴钰, 田立柱, 于洪军, 徐兴永, 石学法, 秦华锋, 邓成龙. 2016. 渤海盆地演化的年代学研究. 第四纪研究, 36: 1075–1087
尹秋珍, 郭正堂. 2006. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期. 科学通报, 51: 186–193
袁宝印, 朱日祥, 田文来, 崔久旭, 李容全, 王强, 严富华. 1996. 泥河湾组的时代、地层划分和对比问题. 中国科学 D辑: 地球科学, 26: 67–73
袁宝印, 夏正楷, 李保生, 乔彦松, 顾兆炎, 张家富, 许冰, 黄慰文, 曾荣树. 2008. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题. 第四纪研究, 28: 1–13
袁复礼, 杜恒俭. 1984. 中国新生代生物地层学. 北京: 地质出版社. 233–249
袁桂邦, 胥勤勉, 王艳, 杨吉龙, 秦雅飞, 杜东. 2014. 渤海湾北岸Bg10孔磁性地层研究及其构造意义. 地质学报, 88: 285–298
岳乐平, 王焰, 郑洪波. 1994. “阳郭动物群”的磁性地层年龄及时代. 地层学杂志, 18: 203–206
岳乐平, 薛祥煦. 1996. 中国黄土磁性地层与生物地层对比. 第四纪研究, 16: 239–244
曾琳, 鹿化煜, 弋双文, 徐志伟, 邱志敏, 杨振宇, 李永祥. 2011. 我国东北地区黄土堆积的磁性地层年代与古气候变化. 科学通报, 56: 2267–2275
张宗祜, 刘平贵, 钱方, 闵隆瑞, 王强, 宗冠福. 1994. 元谋盆地晚新生代地质研究的新进展. 海洋地质与第四纪地质, 14: 1–18
赵泉鸿, 翦知湣, 李保华, 成鑫荣, 汪品先. 1999. 南沙深海沉积中的中更新世微玻陨石. 中国科学 D辑: 地球科学, 29: 45–49

赵松龄, 杨光复, 苍松溪, 张宏才, 黄庆福, 夏东兴, 王永吉, 刘福寿, 刘成福. 1978. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题. 海洋与湖沼, 9: 15–25

赵志中, 乔彦松, 王燕, 傅建利, 王书兵, 李朝柱, 姚海涛, 蒋复初. 2007. 成都平原红土堆积的磁性地层学及古环境记录. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 370–377

中国地质学编辑委员会和中国科学院地质研究所. 1956. 中国区域地层表(草案). 北京: 科学出版社. 693

周明镇. 1957. 华南第三纪和第四纪初期哺乳动物群的性质和对比. 科学通报, 8: 394–400

周明镇. 1961. 元谋水獭化石的发现和滇东含晚第三纪哺乳类化石层的对比. 古脊椎动物与古人类, 5: 164–167

周慕林, 闵隆瑞, 王淑芳. 2000. 中国地层典·第四系. 北京: 地质出版社. 122

周墨清, 葛宗诗. 1990. 南黄海及相邻陆区松散沉积层磁性地层的研究. 海洋地质与第四纪地质, 10: 21–33

周廷儒, 李华章, 刘清泗, 李荣全, 孙秀萍. 1991. 泥河湾盆地新生代古地理研究. 北京: 科学出版社. 162

朱伟林, 王振峰, 米立军, 杜学斌, 解习农, 陆永潮, 张道军, 孙志鹏, 刘新宇, 尤丽. 2015. 南海西沙西科1井层序地层格架与礁生长单元特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40: 677–687

朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 2007. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化. 第四纪研究, 27: 922–944

朱日祥, 刘青松, 潘永信, 邓成龙, 张睿, 王先锋. 2006. 马兰黄土剩磁不存在显著Lock-in效应: 来自Laschamp地磁漂移的证据. 中国科学 D辑: 地球科学, 36: 430–437

左天文, 成洪江, 刘平, 谢飞, 邓成龙. 2012. 泥河湾盆地后沟旧石器遗址的磁性地层学定年. 中国科学: 地球科学, 42: 94–102

Aguirre E, Pasini G. 1985. The Pliocene-Pleistocene boundary. Episodes, 8: 116–120

An Z S, Clemens S C, Shen J, Qiang X K, Jin Z D, Sun Y B, Prell W L, Luo J J, Wang S M, Xu H. 2011. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics. Science, 333: 719–723

An Z S, Ho C K. 1989. New magnetostratigraphic dates of Lantian *Homo erectus*. Quat Res, 32: 213–221

Bae C J, Wang W, Zhao J, Huang S, Tian F, Shen G. 2014. Modern human teeth from Late Pleistocene Luna Cave (Guangxi, China). Quat Int, 354: 169–183

Barbour G B. 1924. Preliminary observations in the Kalgan Area. Bull Geol Soc China, 3: 153–168

Bien M N. 1940. Preliminary observation on the Cenozoic geology of Yunnan. Bull Geol Soc China, 20: 179–194

Black D, Teilhard de Chardin P, Young C C, Pei W C. 1933. Fossil Man in China: The Choukoutien Cave Deposits with a synopsis of our present knowledge of the Late Cenozoic in China. Mem Geol Sur China (Ser A), 11: 1–174

Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, Denton G H, Kong X, Wang Y, Zhang R, Wang X. 2009. Ice age terminations. Science, 326: 248–252

Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S, Kelly M, Kathayat G, Wang X, Li X, Kong X, Wang Y, Ning Y, Zhang H. 2016. The Asian monsoon over the past 640000 years and ice age terminations. Nature, 534: 640–646

Cheng H, Edwards R L, Shen C -C, Polyak V J, Asmerom Y, Woodhead J, Hellstrom J, Wang Y J, Kong X G, Spötl C, Wang X F, Alexander E C. 2013. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. Earth Planet Sci Lett, 371–372: 82–91

Chesner C A, Rose W I. 1991. Stratigraphy of the Toba Tuffs and the evolution of the Toba Caldera Complex, Sumatra, Indonesia. Bull Volcanol, 53: 343–356

Ciochon R, Long V T, Larick R, Gonzalez L, Grun R, de Vos J, Yonge C, Taylor L, Yoshida H, Reagan M. 1996. Dated co-occurrence of *Homo erectus* and *Gigantopithecus* from Tham Khuyen Cave, Vietnam.. Proc Natl Acad Sci USA, 93: 3016–3020

Deng C. 2008. Paleomagnetic and mineral magnetic investigation of the Baicaoyuan loess-paleosol sequence of the western Chinese Loess Plateau over the last glacial-interglacial cycle and its geological implications. Geochem Geophys Geosyst, 9: Q04034

Deng C, Liu Q, Wang W, Liu C. 2007. Chemical overprint on the natural remanent magnetization of a subtropical red soil sequence in the Bose Basin, southern China. Geophys Res Lett, 34: L22308

Deng C, Xie F, Liu C, Ao H, Pan Y, Zhu R. 2007. Magnetochronology of the Feiliang Paleolithic site in the Nihewan Basin and implications for early human adaptability to high northern latitudes in East Asia. Geophys Res Lett, 34: L14301

Deng C, Shaw J, Liu Q, Pan Y, Zhu R. 2006a. Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosol sequence in the northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling. Earth Planet Sci Lett, 241: 248–259

Deng C, Wei Q, Zhu R, Wang H, Zhang R, Ao H, Chang L, Pan Y. 2006b. Magnetostratigraphic age of the Xiantai Paleolithic site in the Nihewan Basin and implications for early human colonization of Northeast Asia. Earth Planet Sci Lett, 244: 336–348

Deng C, Zhu R, Zhang R, Ao H, Pan Y. 2008. Timing of the Nihewan formation and faunas. Quat Res, 69: 77–90

Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, Yu Z W, Xiong S F, Liu T S. 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea δ^{18}O record. Paleoceanography, 17: 5-1–5-21

Ding Z L, Sun J M, Liu T S, Zhu R X, Yang S L, Guo B. 1998. Wind-

blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China. Earth Planet Sci Lett, 161: 135–143

Ding Z, Yu Z, Rutter N W, Liu T. 1994. Towards an orbital time scale for chinese loess deposits. Quaternary Sci Rev, 13: 39–70

Edwards R, Chen J H, Wasserburg G J. 1987. ^{238}U-^{234}U-^{230}Th-^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500000 years. Earth Planet Sci Lett, 81: 175–192

Fu C, An Z, Qiang X, Bloemendal J, Song Y, Chang H. 2013. Magnetostratigraphic determination of the age of ancient Lake Qinghai, and record of the East Asian monsoon since 4.63 Ma. Geology, 41: 875–878

Ge J, Guo Z, Zhan T, Yao Z, Deng C, Oldfield F. 2012. Magnetostratigraphy of the Xihe loess-soil sequence and implication for late Neogene deformation of the West Qinling Mountains. Geophys J Int, 189: 1399–1408

Gibbard P L, Head M J, Walker M J C. 2010. Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. J Quat Sci, 25: 96–102

Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. 2004. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge University Press. 589

Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M. 2012. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 1144

Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, Wu H B, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. Nature, 416: 159–163

Guo Z, Biscaye P, Wei L, Chen X, Peng S, Liu T. 2000. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess-soil sequences in China. Geophys Res Lett, 27: 1751–1754

Han F, Bahain J J, Deng C, Boëda É, Hou Y, Wei G, Huang W, Garcia T, Shao Q, He C, Falguères C, Voinchet P, Yin G. 2017. The earliest evidence of hominid settlement in China: Combined electron spin resonance and uranium series (ESR/U-series) dating of mammalian fossil teeth from Longgupo cave. Quat Int, 434: 75–83

Hao Q, Guo Z. 2004. Magnetostratigraphy of a late Miocene-Pliocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau in China. Geophys Res Lett, 31: L09209

Hao Q, Guo Z, Qiao Y, Xu B, Oldfield F. 2010. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China. Quat Sci Rev, 29: 3317–3326

Hao Q, Wang L, Oldfield F, Peng S, Qin L, Song Y, Xu B, Qiao Y, Bloemendal J, Guo Z. 2012. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400000-year minima in insolation variability. Nature, 490: 393–396

Heller F, Tung-sheng L. 1982. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. Nature, 300: 431–433

Heller F, Tungsheng L. 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. Geophys J Int, 77: 125–141

Heller F, Tung-sheng L. 1986. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China. Geophys Res Lett, 13: 1169–1172

Heslop D, Langereis C G, Dekkers M J. 2000. A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China. Earth Planet Sci Lett, 184: 125–139

Hilgen F J, Lourens L J, Van Dam J A. 2012. The Neogene Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds.The Geologic Time Scale 2012, Vol. 2. Amsterdam: Elsevier. 923–978

Hou Y M, Potts R, Yuan B, Guo Z T, Deino A, Wang W, Clark J, Xie G, Huang W W. 2000. Mid-Pleistocene Acheulean-like stone technology of the Bose Basin, South China. Science, 287: 1622–1626

Hovan S A, Rea D K, Pisias N G, Shackleton N J. 1989. A direct link between the China loess and marine δ^{18}O records: aeolian flux to the north Pacific. Nature, 340: 296–298

Huang L. 1997. Calcareous nannofossil biostratigraphy in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea, and Neogene reticulofenestrid coccoliths size distribution pattern. Mar Micropaleont, 32: 31–57

Jin C, Wang Y, Deng C, Harrison T, Qin D, Pan W, Zhang Y, Zhu M, Yan Y. 2014. Chronological sequence of the early Pleistocene *Gigantopithecus* faunas from cave sites in the Chongzuo, Zuojiang River area, South China. Quat Int, 354: 4–14

Kong P, Jia J, Zheng Y. 2013. Cosmogenic ^{26}Al/^{10}Be burial dating of the Paleolithic at Xihoudu, North China. J Human Evol, 64: 466–470

Kukla G, Heller F, Ming L X, Chun X T, Sheng L T, Sheng A Z. 1988. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. Geology, 16: 811–814

Li S, Deng C, Yao H, Huang S, Liu C, He H, Pan Y, Zhu R. 2013. Magnetostratigraphy of the Dali Basin in Yunnan and implications for late Neogene rotation of the southeast margin of the Tibetan Plateau. J Geophys Res Solid Earth, 118: 791–807

Li X Q, Li C S, Lu H Y, Dodson J R, Wang Y F. 2004. Paleovegetation and paleoclimate in middle-late Pliocene, Shanxi, central China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 210: 57–66

Liu C C, Deng C L, Liu Q S, Zheng L T, Wang W, Xu X M, Huang S, Yuan B Y. 2010. Mineral magnetism to probe into the nature of palaeomagnetic signals of subtropical red soil sequences in southern China. Geophys J Int, 181: 1395–1410

Liu C, Xu X, Yuan B, Deng C. 2008. Magnetostratigraphy of the Qiliting section (SE China) and its implication for geochronology of the red soil sequences in southern China. Geophys J Int, 174: 107–117

Liu J, Liu Q, Zhang X, Liu J, Wu Z, Mei X, Shi X, Zhao Q. 2016a.

Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea. Quat Sci Rev, 144: 1–15

Liu J, Shi X, Liu Q, Ge S, Liu Y, Yao Z, Zhao Q, Jin C, Jiang Z, Liu S, Qiao S, Li X, Li C, Wang C. 2014. Magnetostratigraphy of a greigite-bearing core from the South Yellow Sea: Implications for remagnetization and sedimentation. J Geophys Res Solid Earth, 119: 7425–7441

Liu P, Deng C, Li S, Cai S, Cheng H, Baoyin Y, Wei Q, Zhu R. 2012. Magnetostratigraphic dating of the Xiashagou Fauna and implication for sequencing the mammalian faunas in the Nihewan Basin, North China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 315-316: 75–85

Liu P, Wu Z, Deng C, Tong H, Qin H, Li S, Yuan B, Zhu R. 2016b. Magnetostratigraphic dating of the Shanshenmiaozui mammalian fauna in the Nihewan Basin, North China. Quat Int, 400: 202–211

Liu X, Shen G, Tu H, Lu C, Granger D E. 2015. Initial $^{26}Al/^{10}Be$ burial dating of the hominin site Bailong Cave in Hubei Province, central China. Quat Int, 389: 235–240

Lu H, Liu X, Zhang F, An Z, Dodson J. 1999. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess Plateau. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 154: 237–246

Lu H, Zhang H, Wang S, Cosgrove R, Sun X, Zhao J, Sun D, Zhao C, Shen C, Wei M. 2011. Multiphase timing of hominin occupations and the paleoenvironment in Luonan Basin, Central China. Quat Res, 76: 142–147

Luo X, Rehkämper M, Lee D C, Halliday A N. 1997. High precision $^{230}Th/^{232}Th$ and $^{234}U/^{238}U$ measurements using energyfiltered ICP magnetic sector multiple collector mass spectrometry. Int J Mass Spect Ion Proc, 171: 105–117

Mark D F, Renne P R, Dymock R C, Smith V C, Simon J I, Morgan L E, Staff R A, Ellis B S, Pearce N J G. 2017. High-precision $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of pleistocene tuffs and temporal anchoring of the Matuyama-Brunhes boundary. Quat Geochron, 39: 1–23

Mei X, Li R, Zhang X, Liu Q, Liu J, Wang Z, Lan X, Liu J, Sun R. 2016. Evolution of the Yellow Sea warm current and the Yellow Sea cold water mass since the Middle Pleistocene. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 442: 48–60

Pan Y X, Zhu R X, Liu Q S, Guo B, Yue L P, Wu H N. 2002. Geomagnetic episodes of the last 1.2 Myr recorded in Chinese loess. Geophys Res Lett, 29: 123-1–123-4

Pillans B, Gibbard P. 2012. The Quaternary Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, Vol. 2. Amsterdam: Elsevier. 979–1010

Qiao Y S, Wang Y, Yao H T, Qi L, He Z X, Cheng Y, Peng S S, Ge J Y. 2015. Magnetostratigraphy of a loess-paleosol sequence from higher terrace of the Daduhe River in the eastern margin of the Tibetan Plateau and its geological significance. Acta Geol Sin, 89: 316–317

Qiu Z, Qiu Z. 1995. Chronological sequence and subdivision of Chinese Neogene mammalian faunas. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 116: 41–70

Rink W J, Wei W, Bekken D, Jones H L. 2008. Geochronology of *Ailuropoda-Stegodon* fauna and *Gigantopithecus* in Guangxi, southern China. Quat Res, 69: 377–387

Rio D, Sprovieri R, Castradori D, Di Stefano E. 1998. The Gelasian Stage (Upper Pliocene): A new unit of the global chronostratigraphic scale. Episodes, 21: 82–87

Saylor J E, Quade J, Dettman D L, DeCelles P G, Kapp P A, Ding L. 2009. The late Miocene through present paleoelevation history of southwestern Tibet. Am J Sci, 309: 1–42

Shao Q, Wang W, Deng C, Voinchet P, Lin M, Zazzo A, Douville E, Dolo J M, Falguères C, Bahain J J. 2014. ESR, U-series and paleomagnetic dating of Gigantopithecus fauna from Chuifeng Cave, Guangxi, southern China. Quat Res, 82: 270–280

Shao Q, Wang Y, Voinchet P, Zhu M, Lin M, Rink W J, Jin C, Bahain J J. 2017. U-series and ESR/U-series dating of the *Stegodon-Ailuropoda* fauna at Black Cave, Guangxi, southern China with implications for the timing of the extinction of *Gigantopithecus blacki*. Quat Int, 434: 65–74

Shen C C, Lawrence Edwards R, Cheng H, Dorale J A, Thomas R B, Bradley Moran S, Weinstein S E, Edmonds H N. 2002. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. Chem Geol, 185: 165–178

Shen G, Gao X, Gao B, Granger D E. 2009. Age of Zhoukoudian Homo erectus determined with $^{26}Al/^{10}Be$ burial dating. Nature, 458: 198–200

Shi N, Cao J X, Konigsson L K. 1993. Late Cenozoic vegetational history and the Pliocene-Pleistocene boundary in the Yushe Basin, S.E. Shanxi, China. Grana, 32: 260–271

Singer B S. 2014. A Quaternary geomagnetic instability time scale. Quat Geochron, 21: 29–52

Singer B S, Guillou H, Jicha B R, Zanella E, Camps P. 2014. Refining the Quaternary Geomagnetic Instability Time Scale (GITS): Lava flow recordings of the Blake and Post-Blake excursions. Quat Geochron, 21: 16–28

Stevens T, Armitage S J, Lu H, Thomas D S G. 2006. Sedimentation and diagenesis of Chinese loess: Implications for the preservation of continuous, high-resolution climate records. Geology, 34: 849–852

Sun L, Deng C, Wang W, Liu C, Kong Y, Wu B, Liu S, Ge J, Qin H, Zhu R. 2017a. Magnetostratigraphy of Plio-Pleistocene fossiliferous cave sediments in the Bubing Basin, southern China. Quat Geochron, 37: 68–81

Sun L, Wang Y, Liu C, Zuo T, Ge J, Zhu M, Jin C, Deng C, Zhu R. 2014. Magnetochronological sequence of the Early Pleistocene *Gigantopithecus* faunas in Chongzuo, Guangxi, southern China. Quat Int, 354: 15–23

Sun X, Lu H, Wang S, Yi L, Li Y, Bahain J J, Voinchet P, Hu X, Zeng L, Zhang W, Zhuo H. 2017b. Early human settlements in the southern Qinling Mountains, central China. Quat Sci Rev, 164: 168–186

Sun Y, Clemens S C, An Z, Yu Z. 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. Quat Sci Rev, 25: 33–48

Tedford R H, Flynn L J, Zhanxiang Q, Opdyke N D, Downs W R. 1991. Yushe Basin, China: Paleomagnetically calibrated mammalian biostratigraphic standard from the late Neogene of eastern Asia. J Vert Paleont, 11: 519–526

Tedford R H, Qiu Z X, Flynn L J. 2013. Late Cenozoic Yushe Basin, Shanxi Province, China: Geology and Fossil Mammals. Vol. I: History, Geology and Magnetostratigraphy. Dordrecht: Springer. 109

Teilhard de Chardin P, Licent E. 1924. On the geology of the northern, western and southern borders of the Ordos, China. Bull Geol Soc China, 3: 37–44

Teilhard de Chardin P, Piveteau J. 1930. Les mammifères fossiles de Nihowan (Chine). Annales de Paléontologie, 19: 1–134

Tian J, Wang P, Cheng X, Li Q. 2002. Astronomically tuned Plio–Pleistocene benthic δ^{18}O record from South China Sea and Atlantic–Pacific comparison. Earth Planet Sci Lett, 203: 1015–1029

Walker M, Johnsen S, Rasmussen S O, Steffensen J P, Popp T, Gibbard P, Hoek W, Lowe J, Andrews J, Bjorck S, Cwynar L, Hughen K, Kershaw P, Kromer B, Litt T, Lowe D J, Nakagawa T, Newnham R, Schwande J. 2008. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. Episodes, 31: 264–267

Wang H, Deng C, Zhu R, Wei Q, Hou Y, Boëda E. 2005a. Magnetostratigraphic dating of the Donggutuo and Maliang Paleolithic sites in the Nihewan Basin, North China. Quat Res, 64: 1–11

Wang W, Potts R, Baoyin Y, Huang W, Cheng H, Edwards R L, Ditchfield P. 2007a. Sequence of mammalian fossils, including hominoid teeth, from the Bubing Basin caves, South China. J Human Evol, 52: 370–379

Wang X M, Flynn L J, Fortelius M. 2013a. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 732

Wang X, Li Q, Xie G, Saylor J E, Tseng Z J, Takeuchi G T, Deng T, Wang Y, Hou S, Liu J, Zhang C, Wang N, Wu F. 2013b. Mio-Pleistocene Zanda Basin biostratigraphy and geochronology, pre-Ice Age fauna, and mammalian evolution in western Himalaya. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 374: 81–95

Wang X, Qiu Z, Li Q, Wang B, Qiu Z, Downs W R, Xie G, Xie J, Deng T, Takeuchi G T, Tseng Z J, Chang M, Liu J, Wang Y, Biasatti D, Sun Z, Fang X, Meng Q. 2007b. Vertebrate paleontology, biostratigraphy, geochronology, and paleoenvironment of Qaidam Basin in northern Tibetan Plateau. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 254: 363–385

Wang X, Løvlie R, Yang Z, Pei J, Zhao Z, Sun Z. 2005. Remagnetization of Quaternary eolian deposits: A case study from SE Chinese Loess Plateau. Geochem Geophys Geosyst, 6: Q06H18

Wang X, Yang Z, Løvlie R, Min L. 2004. High-resolution magnetic stratigraphy of fluvio-lacustrine succession in the Nihewan Basin, China. Quat Sci Rev, 23: 1187–1198

Wang X, Yang Z, Løvlie R, Sun Z, Pei J. 2006. A magnetostratigraphic reassessment of correlation between Chinese loess and marine oxygen isotope records over the last 1.1 Ma. Phys Earth Planet Inter, 159: 109–117

Wang X, Lu H, Zhang H, Wu J, Hou X, Fu Y, Geng J. 2018. Distribution, provenance, and onset of the Xiashu Loess in Southeast China with paleoclimatic implications. J Asian Earth Sci, 155: 180–187

Wang Y, Jin C Z, Mead J I. 2014. New remains of *Sinomastodon yangziensis* (Proboscidea, Gomphotheriidae) from Sanhe karst Cave, with discussion on the evolution of Pleistocene *Sinomastodon* in South China. Quat Int, 339–340: 90–96

Wang Y, Jin C, Pan W, Qin D, Yan Y, Zhang Y, Liu J, Dong W, Deng C. 2017. The Early Pleistocene *Gigantopithecus-Sinomastodon* fauna from Juyuan karst cave in Boyue Mountain, Guangxi, South China. Quat Int, 434: 4–16

Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. Science, 294: 2345–2348

Wang Y, Cheng H, Edwards R L, Kong X, Shao X, Chen S, Wu J, Jiang X, Wang X, An Z. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224000 years. Nature, 451: 1090–1093

Xu Q M, Yang J L, Hu Y Z, Yuan G B, Deng C L. 2018. Magnetostratigraphy of two deep boreholes in southwestern Bohai Bay: tectonic implications and constraints on the ages of volcanic layers. Quat Geochronol, 43: 1–13

Xu Q, Yuan G, Yang J, Xin H, Yi L, Deng C. 2017. Plio-Pleistocene magnetostratigraphy of northern Bohai Bay and its implications for tectonic events since ca. 2.0 Ma. J Geol Dyn, 111: 1–14

Yang S, Ding Z. 2010. Drastic climatic shift at ~2.8 Ma as recorded in

eolian deposits of China and its implications for redefining the Pliocene-Pleistocene boundary. Quat Int, 219: 37–44

Yi L, Deng C, Tian L, Xu X, Jiang X, Qiang X, Qin H, Ge J, Chen G, Su Q, Chen Y, Shi X, Xie Q, Yu H, Zhu R. 2016. Plio-Pleistocene evolution of Bohai Basin (East Asia): Demise of Bohai Paleolake and transition to marine environment. Sci Rep, 6: 29403

Young C C. 1950. The Plio-Pleistocene boundary in China. Report on 18th International Geological Congress, London. 115–125

Yuan D, Cheng H, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang M, Qing J, Lin Y, Wang Y, Wu J, Dorale J A, An Z, Cai Y. 2004. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. Science, 304: 575–578

Zan J, Fang X, Zhang W, Yan M, Zhang T. 2016. Palaeoenvironmental and chronological constraints on the Early Pleistocene mammal fauna from loess deposits in the Linxia Basin, NE Tibetan Plateau. Quat Sci Rev, 148: 234–242

Zeng L, Lu H, Yi S, Li Y, Lv A, Zhang W, Xu Z, Wu H, Feng H, Cui M. 2016. New magnetostratigraphic and pedostratigraphic investigations of loess deposits in north-east China and their implications for regional environmental change during the Mid-Pleistocene climatic transition. J Quat Sci, 31: 20–32

Zhang J F, Huang W W, Hu Y, Yang S X, Zhou L P. 2015. Optical dating of flowstone and silty carbonate-rich sediments from Panxian Dadong Cave, Guizhou, southwestern China. Quat Geochron, 30: 479–486

Zhang W, Yu L, Lu M, Zheng X, Ji J, Zhou L, Wang X. 2009. East Asian summer monsoon intensity inferred from iron oxide mineralogy in the Xiashu Loess in southern China. Quaternary Sci Rev, 28: 345–353

Zhang Y, Jin C, Cai Y, Kono R, Wang W, Wang Y, Zhu M, Yan Y. 2014. New 400–320 ka *Gigantopithecus blacki* remains from Hejiang Cave, Chongzuo City, Guangxi, South China. Quat Int, 354: 35–45

Zhao H, Lu Y, Wang C, Chen J, Liu J, Mao H. 2010. ReOSL dating of aeolian and fluvial sediments from Nihewan Basin, northern China and its environmental application. Quat Geochron, 5: 159–163

Zheng H B, Rolph T, Shaw J, An Z S. 1995. A detailed palaeomagnetic record for the last interglacial period. Earth Planet Sci Lett, 133: 339–351

Zhou L P, Shackleton N J. 1999. Misleading positions of geomagnetic reversal boundaries in Eurasian loess and implications for correlation between continental and marine sedimentary sequences. Earth Planet Sci Lett, 168: 117–130

Zhu R, An Z, Potts R, Hoffman K A. 2003. Magnetostratigraphic dating of early humans in China. Earth-Sci Rev, 61: 341–359

Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, Deng C L, Pan Y X, Guo B, Shi C D, Guo Z T, Yuan B Y, Hou Y M, Huang W W. 2001. Earliest presence of humans in northeast Asia. Nature, 413: 413–417

Zhu R, Pan Y, Liu Q. 1999. Geomagnetic excursions recorded in Chinese Loess in the last 70000 years. Geophys Res Lett, 26: 505–508

Zhu R X, Potts R, Pan Y X, Lü L Q, Yao H T, Deng C L, Qin H F. 2008a. Paleomagnetism of the Yuanmou Basin near the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its constraints on late Neogene sedimentation and tectonic rotation. Earth Planet Sci Lett, 272: 97–104

Zhu R X, Potts R, Pan Y X, Yao H T, Lü L Q, Zhao X, Gao X, Chen L W, Gao F, Deng C L. 2008b. Early evidence of the genus *Homo* in East Asia. J Human Evol, 55: 1075–1085

Zhu R X, Potts R, Xie F, Hoffman K A, Deng C L, Shi C D, Pan Y X, Wang H Q, Shi R P, Wang Y C, Shi G H, Wu N Q. 2004. New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia. Nature, 431: 559–562

Zhu R, Zhang R, Deng C, Pan Y, Liu Q, Sun Y. 2007. Are Chinese loess deposits essentially continuous? Geophys Res Lett, 34: L17306

Zhu R X, Zhou L P, Laj C, Mazaud A, Ding Z L. 1994. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese loess. Geophys Res Lett, 21: 697–700

Zhu Z Y, Dennell R, Huang W W, Wu Y, Rao Z G, Qiu S F, Xie J B, Liu W, Fu S Q, Han J W, Zhou H Y, Ou Yang T P, Li H M. 2015. New dating of the *Homo erectus* cranium from Lantian (Gongwangling), China. J Human Evol, 78: 144–157

(责任编委: 沈树忠)