

进展

中国全新世气候和农业活动研究新进展

李小强*

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044

* E-mail: lixiaoqiang@ivpp.ac.cn

收稿日期: 2013-07-15; 接受日期: 2013-10-21; 网络版发表日期: 2013-11-25

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA01020304)、国家自然科学基金项目(批准号: 41172161)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB950204)资助

摘要 全球气候变化及其可能引发的生态环境后果已成为关注的热点问题. 全新世涵盖了未来气候变化的类似特征, 农业活动贯穿始终, 提供了未来气候变化和人类影响与适应研究的理想“相似型”. 基于石笋、冰芯、海洋和湖泊等最新成果, 综述了中国全新世气候的变率、变幅、不稳定性特征、突变事件以及驱动机制等研究新进展, 介绍了早期农业活动研究的植物指标记录和方法, 阐明旱作和稻作农业的起源、扩散与传播, 查明早期农业活动的方式与强度, 揭示农业活动对环境的影响与适应. 通过解读正在开展的大型研究项目, 强调提高年代精度和代用指标有效性的重要性, 提出未来应加强不同典型区域生态系统和环境要素对增温过程的响应研究, 理解人类活动对气候快速变化的适应, 为评估未来气候变化效应和人类适应提供科学依据.

关键词
中国
全新世
气候变化
农业活动
新进展

以“全球变暖”为核心的全球气候变化及其可能引发的生态环境后果已成为科学界和社会公众关注的热点(IPCC, 2007; Mann 等, 2008; 丁仲礼等, 2009). 如何准确评估未来气候变化的环境效应, 了解人类活动与全球变化之间的关系, 一直被视为重点和难点课题. 解决上述问题的一个理想途径就是, 选择涵盖未来气候变化类似特征的地质时段, 重建气候环境变化和生态环境格局, 恢复人类活动特征、方式及其与气候和生态环境变化的关系, 为评估未来气候变化的效应以及人类的影响与适应提供科学依据.

现代环境状况既是对不同时间尺度气候环境变化的反映, 也是对人类活动深刻影响的某种响应. 全新世是与现代接轨的最新地质时段, 气候经历了早期升温变暖、中期温暖湿润、后期降温变凉三个主要阶段(Wang 等, 2005). 全新世气候环境变化的重要特

征是千年-百年尺度的快速波动以及一些突变气候事件(Bond 等, 2001; Kleiven 等, 2008). Marcott 等(2013)分析了 73 个具全球意义的气候环境记录, 揭示 10~5 ka BP 期间的温度比其后高约 0.7°C. 全新世中期存在一个显著的大暖期, 距今 6 ka 左右的鼎盛阶段与全球平均温度增加 1~2°C 的场景相似(施雅风等, 1992; IPCC, 2007).

全新世气候转型改变了世界大多数地区人类活动特征和生存状态, 人类社会经历了从狩猎采集到农业起源的革命性变革(Bellwood, 2005), 农业成为人类适应和改造环境的最主要经济活动(Cavalli-Sforza 等, 1993). 全新世农业活动不仅奠定了文明诞生和现代社会形成的物质基础, 也促使了人口增长, 人类活动强度增大, 对环境的影响持续而深刻(Ruddiman 等, 2008; Li 等, 2012). 因此, 全新世气候

中文引用格式: 李小强. 中国全新世气候和农业活动研究新进展. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1919-1928

英文引用格式: Li X Q. New progress in the Holocene climate and agriculture research in China. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 2027-2036, doi: 10.1007/s11430-013-4758-3

环境和农业活动的研究,不仅是区分自然和人为因素影响的重要途径,也为评估未来气候变化和人类适应提供了理想的“相似型”。

目前,基于石笋、冰芯、海洋和湖泊等高分辨率记录,我国在全新世气候的变率和变幅、突变事件和驱动机制等方面取得了一系列重要成果。通过农业活动的替代指标记录研究,在农业起源、传播及其影响等方面也有所突破。本文重点介绍全新世气候环境最新研究进展,综述我国农业起源、扩散与发展研究,解读早期农业活动的方式与强度,揭示农业活动对环境的影响与适应。

1 全新世气候环境研究新进展

全新世气候环境受控于地球轨道参数的变化,而非轨道因素对气候不稳定性及突变事件有重要影响。全新世气候研究的重点就是在高分辨地质-生物记录基础上,追踪不同时间尺度气候的变率,揭示快速降温/升温事件的特征及原因,查明可预测性的早期信号,提供可参考的历史相似型。中国受东亚季风、西南季风和西风带等多种气候系统的影响,是全球环境系统的重要组成部分,成为全新世气候环境变化研究的重要且重点地区。

近年来,中国科学家利用洞穴石笋沉积连续、分辨率高、年代精准等优点,再次证实了东亚季风气候的不稳定性特征及其与极地高纬的联系(图 1)(Yuan 等, 2004; Tan 等, 2006; Wang 等, 2008);发现全新世季风气候在十年到百年尺度上与太阳活动密切相关,亚洲季风减弱事件大部分与北大西洋降温事件具有同时性(图 1)(Stuiver 等, 1995; Wang 等, 2005);提出全新世暖期气候与北大西洋地区气候存在远程联系(Liu 等, 2013)。

冰盖和冰帽是全球气候变化研究的重要材料(姚檀栋等, 2009),敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录指示全新世大暖期出现在 6~8 ka,与古里雅冰芯 6~7 ka 的记录基本一致(郭光剑等, 2004)。 $\delta^{18}\text{O}$ 值在约 5 ka 急剧下降,标志着气候的转型(Thompson 等, 1995)。普若岗日冰芯氧同位素记录显示 7.5 ka 以来青藏高原气候极不稳定,有多次较大的气候波动和冷事件,并同青藏高原冰川前进相对应(图 1)(Thompson 等, 2006)。古里雅冰芯 2 ka 以来记录了 8 个暖期和 7 个冷期(图 1)(姚檀栋等, 2001)。

湖泊沉积是过去全球变化研究的理想档案库(沈吉等, 2004)。东北二龙湾玛珥湖记录显示全新世气候整体呈增温趋势,但出现多次气候快速变冷事件(游海涛等, 2012)。广东湖光岩玛珥湖高分辨孢粉记录表明低纬地区全新世适宜期发生在 9.5~8 ka(王淑云等, 2007),硅藻-冬季风代用指标发现全新世冬季风变化由强变弱,在轨道尺度上与夏季风同相变化(万智巍等, 2012),这一结果在中国南海东西-南北向海表温度变率(Huang 等, 1997)以及南中国海的泥质记录(胡帮琦等, 2012)中也被检出。青海湖高分辨沉积记录显示全新世气候变化主要受控于亚洲季风,并与轨道驱动、北大西洋快速事件和太阳活动变化相联系(图 1)(Ji 等, 2005; An 等, 2012)。

东海冲绳海槽钻孔的孢粉、有孔虫和长链烯酮分别建立的 4 万年来陆地和海洋气候变化序列显示,末次冰消期东亚地区海洋变暖超前陆地气候变暖约 3~4 ka,热带海洋和北半球高纬度气候驱动海-陆气候转暖存在不同步现象(Xu 等, 2013)。长江中游地区全新世干旱事件与格陵兰冰芯的降温事件具有同时性,亚洲季风系统在全新世暖期与北大西洋地区气候存在快速有效的大气远程联系(Liu 等, 2013)。

近年来,亚洲中部干旱区(西风控制区)全新世气候环境研究取得重要进展,Chen 等(2008)基于 11 个湖泊记录的集成研究,认为亚洲中部干旱区全新世湿度主要受控于西风环流,较为湿润的气候出现在中-晚全新世,与季风区存在错相位关系。1 ka 来高分辨湿度变化记录显示中世纪暖期干旱而小冰期湿润,与季风区存在反相位关系(Chen 等, 2010)。伊犁谷地高分辨花粉记录揭示 15 ka 以来气候环境以暖湿、冷干组合为主,主要受控于西风环流和北大西洋海表温度,湿度变化趋势与季风区相似(图 1)(Li 等, 2011)。

青藏高原中东部的树轮研究发现 350~1000 AD 包含了 4 个极暖期和 2 个极冷期,1970~2000 AD 可能是最近 1 ka 来最温暖的时期(刘禹等, 2009)。历史文献研究也解读了最近 2 ka 我国存在 4 个暖期和 3 个冷期,其中,宋元暖期与中世纪暖期(900~1300 AD)基本对应,明清冷期与小冰期(1550~1850 AD)相当(葛全胜等, 2012),最新研究表明小冰期(1550~1850 AD)可能是整个全新世最冷的阶段,北大西洋地区温度下降约 2°C(Marcott 等, 2013)。高分辨气候变化研究显示中国历史时期多次王朝崩溃可能与冷干的气候事件密切相关(Yancheva 等, 2007; Zhang 等, 2008)。

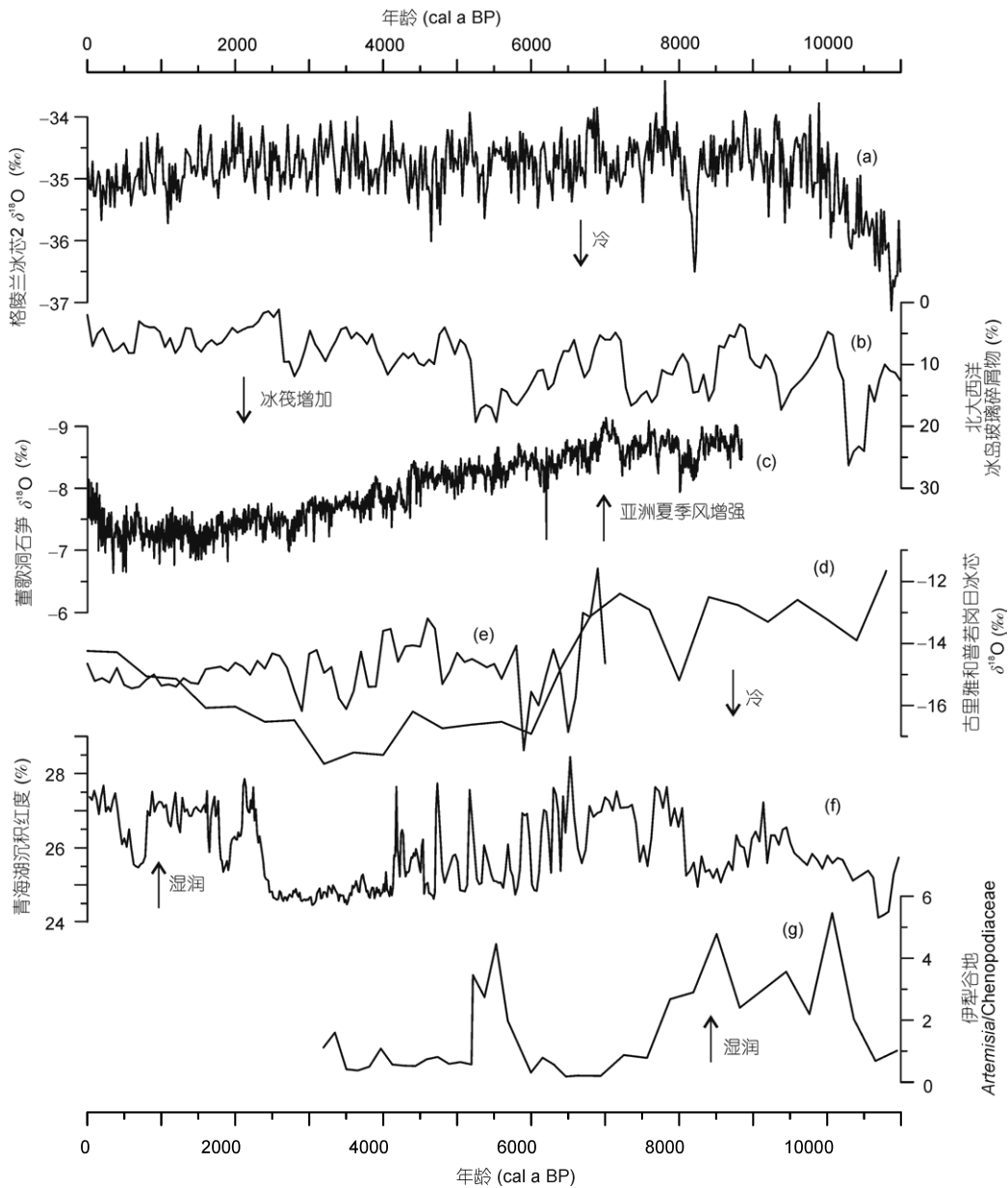


图1 中国全新世高分辨气候记录与格陵兰冰芯和北大西洋对比图

(a) 格林兰冰芯 2(GISP2)氧同位素记录(Stuiver 等, 1995); (b) 北大西洋 MC52-V29191 钻孔冰岛玻璃碎屑物百分比(Bond 等, 2001); (c) 董歌洞 DA 石笋氧同位素记录(Wang 等, 2005); (d) 古里雅冰芯氧同位记录(邬光剑等, 2004); (e) 普若岗日冰芯氧同位素记录(Thompson 等, 2006); (f) 青海湖沉积物红度(Ji 等, 2005); (g) 伊犁谷地蒿属/藜科(A/C)比值(Li 等, 2011)

刘禹等, 2009)。

尽管全新世高分辨率气候环境记录、事件以及过程研究有了实质性进展, 但不同子系统对全球变化的响应方式及机理仍不清楚, 突变事件在不同气候子系统的表现和诱发因素仍缺少核心证据, 因此, 寻找和获取高精度的气候环境序列和替代指标, 并与

现代气候记录和器测数据接轨, 不仅探索影响气候变化的外部因子, 同时理解气候系统内部驱动机制成为当务之急。另外, 全球温度变化势必对海陆热力差异产生重要影响, 不同区域在不同幅度的变暖背景下会发生哪些变化? 生态环境对全球增温或降温过程有着怎样的响应? 存在怎样有利或不利的一面?

仍然是需要继续追踪和探索的重要课题。

2 早期农业活动的植物指标记录

农业活动的植物指标记录研究主要是利用考古植物遗存(种子、果实、孢粉、炭屑、植硅体、淀粉以及叶、茎、树干、根、表皮和树脂等), 确定植物类型及植被特征, 重建气候和生态环境背景, 恢复人类的食物结构, 了解人类获取和利用自然资源的能力和行爲, 揭示早期人类社会经济形态等。目前, 植物指标的分析 and 鉴定方面发展了许多新手段和新方法(Lu 等, 2009a; 杨晓燕等, 2009; 杨青等, 2011; Sun 和 Li, 2012), 已被广大学者接受。

粟、黍稷壳植硅体形态鉴定的突破, 为解决黍、粟旱作农业起源和传播等问题提供了可靠手段(Lu 等, 2009b)。利用植物大化石(如碳化颗粒、小穗轴)遗存的器官形态(Fuller 等, 2009)、微体化石(植硅体、淀粉)的细胞形态、化石的分子结构以及遗传物质的 DNA 特征(Dickau 等, 2007; Allaby 等, 2008), 在解读栽培作物驯化、亲缘关系以及演化系列等研究中逐步显示出潜力。

木炭化石显微结构研究往往可以将木材鉴定精度达到属和种的水平(Scott, 2010), 可以确定植物种类以及判别植被类型(Shackleton 和 Prins, 1992), 重建陆地生态环境(Newton, 2005; Sun 等, 2013), 探讨早期人类活动对植物的选择性利用(Willcox, 2002; Li 等, 2012)。炭屑作为火活动的直接产物, 在解读“刀耕火种”农业活动方式, 重建早期农业活动强度, 探讨人类火活动对植被和生态环境的影响等方面有着不可比拟的优势(Shen 等, 2006; Li 等, 2009b)。

花粉记录不仅是重建植被与环境的重要指标, 农作物花粉高精度形态分析, 在判别栽培作物类型方面作用明显(Li 等, 2009a; 毛礼米和杨小丽, 2011), 农业活动区禾本科植物(小麦、水稻、黍和粟等)花粉含量变化, 可以指示农作物盖度变化(李小强等, 2007a, 2007b; Zong 等, 2007)。花粉与炭屑记录对比研究对揭示土地利用的强度有特殊意义(Wick 等, 2003)。植物淀粉粒分析在区分农作物特别是块茎植物方面发挥着重要作用, 成为解读早期人类食谱类型、植物利用及农作物结构的有效指标(杨晓燕和蒋乐平, 2010; 万智巍等, 2012)。

农业活动植物指标记录的综合研究不再使早期

农业停留于简单的分析和推测, 可以获得更多的实证进行深入的探索与思考。尤其是高精度 AMS¹⁴C 测年技术的迅猛发展, 在测年材料和年代范围方面与农业大化石遗存形成“绝配”, 不仅可以建立农业活动的年代标尺, ¹⁴C 年代数据在时间和空间上的分布还可以反映不同时代农业活动范围。同时, 在统一年代标尺下, 早期农业活动与气候环境变化可以进行有效且可靠的对比, 促进农业起源、发展及其驱动机制研究。

3 中国早期农业活动研究进展

农业主要起源于西亚、东亚和中美洲三个中心(Bellwood, 2005)。中国是旱作农业(Zhao, 1998; Lu 等, 2009b)和稻作农业(Crawford, 2006; 严文明, 1997)起源和发展中心, 贯穿始终的农业活动对植被和生态环境的影响持续而深刻, 早期农业已成为全新世人类活动及其与环境变化关系研究的重点和突破口, 并进入到多学科交叉综合研究阶段。近年来, 系统运用早期农业活动的替代指标记录, 研究农业的起源、扩散与传播, 查明早期农业活动的方式与强度, 揭示农业活动对环境的影响与适应等, 成为科学界关注的重要课题。

农业从中心区向外扩散和迁徙, 导致了农业的广泛传播和交流(Belfer-Cohen 等, 2011), 也促使农业技术的成熟、农业结构的复杂以及农业多样化的出现。西亚的小麦、大麦及多种豆类植物的驯化孕育了两河文明(Bellwood, 2005), 起源于黄河中游的旱作农业(Lu, 2009b)和长江中、下游的稻作农业(Jiang 和 Liu, 2006; Fuller 等, 2009)孕育了东方文明。欧亚大陆作为世界文化和文明发展的“中心地带”(图 2), 东亚和西亚两个重要农业起源区之间如何交流? 农作物传播和扩散的时间和路径怎样? 一直是富有挑战并需重点关注的重要课题。

小麦农业在南亚、中亚、北非以及欧洲的扩散与传播研究比较深入, 获得较充足的证据支持(严文明, 1997; Jared 和 Bellwood, 2003)。中国早期小麦遗存主要出现在新疆塔里木盆地(Zhao 等, 2013)、甘肃河西走廊(Flad 等, 2010; Dodson 等, 2013)和天水盆地(Li 等, 2007)、山东良城镇以及河南二里头等(Thornton 和 Schurr, 2004), 年代大致在 4 ka 前后。目前, 西亚小麦农业向东亚传播的时间和路径等仍存在较大

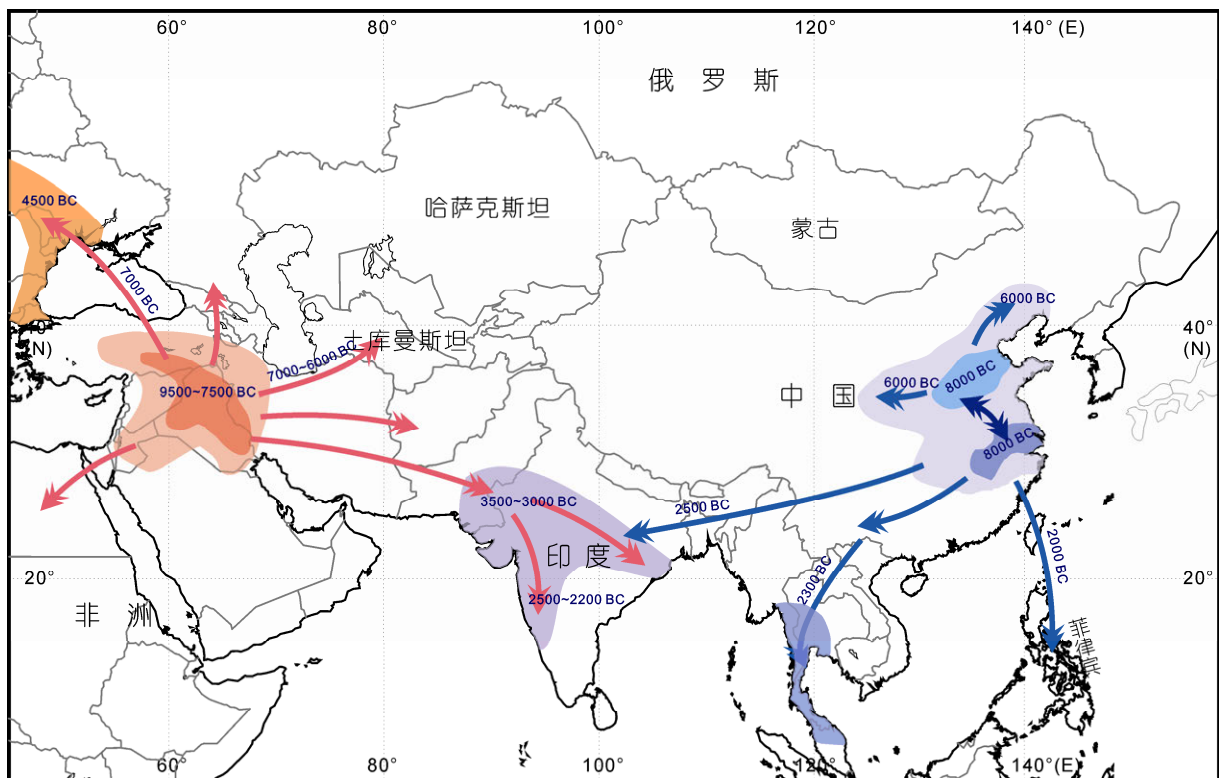


图2 早期小麦农业和稻作农业的扩散与传播

争议, 主要缺少足够的、有精确定年的小麦农业证据支持. 最近, Dodson 等(2013)基于中国 37 个有直接 AMS¹⁴C 测年的小麦遗存, 发现早期小麦农业主要由西亚通过俄罗斯干草原, 再经河西走廊传播到中国的路径(图 2).

目前, 稻作农业扩散与传播较一致的看法是以长江中、下游地区为中心(Zhao, 1998), 在 8 ka 左右向北传入华北和山东(靳桂云等, 2007), 后经辽东半岛传入朝鲜半岛, 大致 2 ka 以后传播到日本(游修龄, 1995; Crawford, 2006), 在 5 ka 左右向南经广东、云南等地传播到东南亚和印度次大陆(严文明, 1997), 仰韶文化时期向西进入黄土高原南部关中盆地(Zhang 等, 2010), 黄土高原西部天水盆地约 5 ka 已有水稻栽培(李小强等, 2007a)(图 2).

旱作农业主要分布在黄河流域(Barton 等, 2009; Lu 等, 2009b; Zhang 等, 2010), 东北地区也是重要分布区(赵志军, 2004), 向南可分布到淮河流域, 与稻作农业形成混合农业区(方修琦等, 1998). 约 5 ka, 旱作农业出现在河西走廊及青藏高原东南部干旱地带, 并在 4 ka 左右深入到新疆等亚洲内陆干旱地区(谢端

据, 2002; 王鹏辉, 2005). 尽管从黑海西岸到东欧、中欧均发现了 7 ka 以前的黍作农业(Hunt 等, 2008), 也有学者估计与中国北方存在可能联系(Jones 和 Liu, 2009), 但仍缺少更多植物考古证据和高精度年代数据的支持.

早期农业发展一个重要形态就是不断调整农业种植结构以提高适应环境变化的能力. 地中海东岸先民通过小麦和大麦种植结构的调整, 以应对气候波动和土地盐碱化(Cullen 等, 2008). 安第斯山沙漠地区先民经常变更农作物种类应对干旱气候(Dillehay 和 Kolata, 2004). 黄土高原西部地区早期旱作农业种植比例也与全新世气候变化有着密切联系, 仰韶文化早、中期黍作比例较高, 而后粟作比例大幅升高(刘长江等, 2008; 周新郢等, 2011).

技术的不断进步和革新是农业发展的重要标志, 中国北方在前仰韶时代已出现石制或骨制农业生产工具(陈文华, 2005). 长江中、下游地区 7 ka 左右就开始运用火进行田间管理(Zong, 2007), 马家浜文化和屈家岭文化已发展了水田灌溉系统(丁金龙, 2004). 黄土高原天水盆地新石器时代晚期原始农业多样化

的形成,是农业栽培、耕作和田间管理等技术相互交流和融合的结果,农业规模和土地载能提高,增强了农业适应能力(李小强等, 2007b)。

目前,基于全球气候变化对人类生存可能造成严重影响的忧虑,如何应对全球变化并制定相应的对策成为至关重要的问题,全球变化中人类适应研究已提高到一个新的高度。通过考古材料和人类遗存深入分析并辅以高精度气候环境记录研究,可以恢复不同区域在不同幅度的变暖背景下人类适应特征,揭示人类演化、农业起源、古文化、古文明与气候变化的关系,为理解和评估未来气候变化下的人类适应提供科学依据。

4 全新世农业活动的环境效应

人类活动已成为认识地球系统变化过程中必须考虑的重要地质营力(Crutzen, 2002)。研究人类活动特征及其对地球系统干涉和驱动的过程和机理,探讨人与自然相互作用的规律,重建人类自身有序的行为,保护和改善可持续的人类生活所依赖的环境,已成为“过去全球变化”研究的重点问题。如何综合运用各类手段和方法提取人类活动的环境效应信息,分辨自然和人为因素对植被和生态环境的影响,揭示区域生态环境变化对全球气候变化的响应等,成为核心研究课题。

一些学者认为人类对环境的强烈影响主要发生在工业革命以后(Crutzen, 2002),也有学者认为早期农业活动可能早在 8 ka 前已开始影响着全球环境。农业活动的逐步加强,又通过水循环、光合作用和土地利用等途径,深刻影响全球和区域生态环境(Cavalli-Sforza 等, 1993; Ruddiman 等, 2008; Li 等, 2009b), Ruddiman 等(2008)基于 8 ka 以来 CO₂ 浓度和 5.2 ka 左右 CH₄ 浓度异常,提出有关全新世气候变化“人类活动影响假说”,受到学术界高度关注。

早期农业“刀耕火种”和土地利用的粗放方式,以及聚落建设和祭祀活动等,对生态景观的改造是强烈而深远的(Kirch, 2005)。西亚 Levant 地区早全新世农业活动改造了遗址周边约 3 km 内的植被(Rollefson 和 Kohler-Rollefson, 1992)。5 ka 以来,两河流域和中东大部地区大规模农田开垦使森林分布大幅度缩减(Miller, 1997)。约 4 ka 以来,我国黄土高原及周边地区云杉林分布显著减少,2 ka 以来云杉林的

消失主要是人类活动增强的结果(Zhou 和 Li, 2011)。

关中盆地全新世研究显示 4.7 ka 以来农业活动快速增强,对植被产生重要影响(Li 等, 2009b)。天水盆地西山坪地区农业活动对林地的利用模式及影响过程研究表明,4.6 ka 以后先民增强了对云杉等乔木的选择性砍伐和利用,对生长周期长的针阔叶混交林产生重大影响,导致短生长周期的竹亚科植物侵入形成次生林(Zhou 和 Li, 2011; Li 等, 2013)。5 ka 以来农业扩散和人口增长,增强和扩展了人类影响的强度和范围,具有广泛的区域影响特征(Ruddiman 等, 2008)。河西走廊干旱区农业活动研究显示,青铜时代末期(约 3.5 ka)土地利用对土壤和植被产生了重要影响,农业的衰退是人类活动和气候变化共同作用的结果(Zhou 等, 2012)。

Yu 等(2012)选择早期农业的核心区域——伊洛河流域,在遗址分布及气候和地质地理参数分析的基础上,运用土地利用规模模型(Paleo-Land Use Model)模拟 8~4 ka 每千年土地利用面积及时空特征,发现土地利用的空间分布模式在 5 ka 前后已与现代基本相似。He 等(2006)利用退耦理论及指标体系分别建立了全新世和最近 2.5 ka 水土流失与人类活动关系;周杰和李小强(2013)提出人口及耕地的大幅增加可能是关中盆地的卤阳湖在近代消失的主要原因。

如果将早期人类活动聚焦于区域尺度,持续的农业活动势必会对植被和生态产生影响。因此,全新世人类的环境效应研究需要以农业活动过程和强度为突破口,在关键区域重建农业活动(特别是土地利用过程)对生态环境的影响,进而分析和探讨人类活动对大气要素以及碳循环的可能影响,并将早期人类影响与全球变化研究紧密联系。

5 研究展望

近年来,中国全新世高分辨地质-生物记录(朱诚等, 2008; 吴艳宏等, 2010; Zhao 等, 2012; Li 等, 2013)、早期农业活动(侯亮亮等, 2008; 李明启等, 2012)以及数值模拟(He 等, 2006; 李蓓蓓等, 2010)等方面研究突飞猛进,丰富了全新世气候不稳定性以及突变事件的内容,完善了气候系统内部过程对轨道变化响应机制的认识,加深了早期人类活动特征及其对轨道气候变率可能影响的理解,推动了过去全球变化研究的进程。同时,也提出了一系列深层次科学问题。

目前,国家重点基础研究发展计划项目有关“我国气候环境变化及干旱-半干旱区人类的影响与适应”研究,主攻全球温度渐变、快速增温/降温如何影响我国季风和西风区气候,揭示气候系统内部变化过程及其对突变事件的诱发机制,分辨全新世温度快速变化和人类活动对干旱-半干旱区生态环境的影响。中国科学院战略性先导项目有关“中国全新世大暖期环境格局”研究,主要基于地质-生物记录重建全新世大暖期中国的气候和生态格局,确定陆地生态系统碳密度和碳储量分布,判定增温过程中的生物多样性变化。“气候变化背景下人类适应研究”则聚焦于现代人类起源和农业起源两个重要科学问题,了解早期人类活动特别是全新世农业活动的特征、方

式、强度以及与气候环境变化的关系,揭示人类适应气候变化的方式与机理。

气候和生态环境变化存在很大的时间和空间差异(符淙斌和马柱国, 2008), IPCC 第五次工作报告集中在区域评估上,需要考虑在不同区域和幅度的变暖背景下将发生怎样有利或不利的变化。全新世气候和人类适应研究仍需在精确定年技术的基础上,提高气候代用指标的精度以及人类活动指标的有效性,了解不同典型区域过去生态系统和环境要素对增温过程的响应,理解人类活动对气候快速变化的适应,把地质-生物记录研究与数值模拟结合,为评估未来气候变化的环境效应以及人类影响与适应提供科学依据。

致谢 感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的周新郢博士、赵克良博士、杨青博士和孙楠博士的大力帮助。

参考文献

- 陈文华. 2005. 中国原始农业的起源与发展. 农业考古, (1): 8-15
- 丁金龙. 2004. 长江下游新石器时代水稻田与稻作农业的起源. 东南文化, (2): 19-23
- 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2009. 国际温室气体减排方案评估及中国长期排放权讨论. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 1659-1671
- 方修琦, 章文波, 张兰生. 1998. 全新世暖期我国土地利用的格局及其意义. 自然资源学报, 13: 16-22
- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化. 大气科学, 32: 752-760
- 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 2012. 过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征. 中国科学: 地球科学, 42: 934-942
- 侯亮亮, 王宁, 吕鹏, 等. 2012. 申明铺遗址战国至两汉先民食物结构和农业经济的转变. 中国科学: 地球科学, 42: 1018-1025
- 胡邦琦, 杨作升, 赵美训, 等. 2012. 南黄海中部泥质区 7200 年以来东亚季风区变化的沉积记录. 中国科学: 地球科学, 42: 1568-1581
- 靳桂云, 燕生东, 宇田津彻郎, 等. 2007. 山东胶州赵家庄遗址 4000 年前稻田的植硅体证据. 科学通报, 52: 2161-2168
- 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 2010. 全球土地利用数据集精度的区域评估——以中国东北地区为例. 中国科学: 地球科学, 40: 1048-1059
- 李明启, 杨晓燕, 王辉, 等. 2010. 甘肃临潭陈旗磨沟遗址人牙结石中淀粉粒反映的古人类植物性食物. 中国科学: 地球科学, 40: 486-492
- 李小强, 周新郢, 张宏宾, 等. 2007a. 考古生物指标记录的中国西北地区 5000 a BP 水稻遗存. 科学通报, 52: 673-678
- 李小强, 周新郢, 周杰, 等. 2007b. 甘肃西山坪遗址生物指标记录的中国最早的农业多样化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37: 934-940
- 刘长江, 靳桂云, 孔昭宸. 2008. 植物考古——种子和果实研究. 北京: 科学出版社
- 刘禹, 安芷生, Linderholm H W, 等. 2009. 青藏高原中东部过去 2485 年以来温度变化的树轮记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 166-176
- 毛礼米, 杨小丽. 2011. 禾本科针茅族(*Stipeae*)7 种花粉形态比较研究. 微体古生物学报, 28: 169-180
- 沈吉, 杨丽原, 羊向东, 等. 2004. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34: 130-138
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学 B 辑, 12: 1300-1308
- 万智巍, 杨晓燕, 葛全胜, 等. 2012. 淀粉粒分析揭示的赣江中游地区新石器晚期人类对植物的利用情况. 中国科学: 地球科学, 42: 1582-1589
- 王鹏辉. 2005. 史前时期新疆的环境与考古学研究. 西域研究, (1): 44-50
- 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒, 等. 2007. 湖光岩玛珥湖高分辨率孢粉记录揭示的早全新世适宜期环境特征. 科学通报, 52: 1285-1291
- 郭光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 2004. 末次间冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比. 科学通报, 49: 475-479
- 吴艳宏, 刘恩峰, 祁海健, 等. 2010. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列. 中国科学: 地球科学, 40: 751-757
- 谢端琚. 2002. 甘青地区史前考古. 北京: 文物出版社
- 严文明. 1997. 我国稻作起源研究的新进展. 考古, 9: 71-76
- 杨青, 李小强, 周新郢, 等. 2011. 炭化过程中粟、黍种子亚显微结构特征及其在植物考古中的应用. 科学通报, 56: 700-707

- 杨晓燕, 郁金城, 吕厚远, 等. 2009. 北京平谷上宅遗址磨盘磨棒功能分析: 来自植物淀粉粒的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 1266-1273
- 杨晓燕, 蒋乐平. 2010. 淀粉粒分析揭示浙江跨湖桥遗址人类的食物构成. 科学通报, 55: 527-533
- 姚檀栋, 周行, 杨晓新. 2009. 印度季风水汽对青藏高原降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程递减率的影响. 科学通报, 54: 2124-2130
- 姚檀栋, 杨海学, 康兴成. 2001. 从古里雅冰芯与祁连山树轮记录看过去 2000 年气候变化. 第四纪研究, 21: 514-519
- 游海涛, 刘嘉麒. 2012. 14 ka BP 以来二龙湾玛珥湖沉积物记录的高分辨率气候演变. 科学通报, 57: 2322-2329
- 游修龄. 1995. 中国稻作史. 北京: 中国农业出版社
- 赵志军. 2004. 从兴隆沟遗址浮选结果谈中国北方旱作农业起源问题. 见: 南京师范大学文博系, 主编. 东亚古物 A 卷. 北京: 文物出版社. 188-199
- 周杰, 李小强. 2013. 关中-天水经济区环境与可持续发展. 北京: 科学出版社. 39-50
- 周新郢, 李小强, 赵克良, 等. 2011. 陇东地区新石器时代的早期农业及环境效应. 科学通报, 56: 318-326
- 朱诚, 陈星, 马春梅, 等. 2008. 神农架大九湖孢粉气候因子转换函数与古气候重建. 科学通报, 53(增刊 I): 38-44
- Allaby R G, Fuller D Q, Brown T A. 2008. The genetic expectations of a protracted model for the origins of domesticated crops. Proc Natl Acad Sci USA, 105: 13982-13986
- An Z S, Colman S, Zhou W J, et al. 2012. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. Sci Rep, 2: 1-7
- Barton L, Newsome S D, Chen F H, et al. 2009. Agricultural origins and the isotopic identity of domestication in northern China. Proc Natl Acad Sci USA, 106: 5523-5528
- Belfer-Cohen A, Goring-Morris A N. 2011. Becoming farmers: The inside story. Curr Anthropol, 52(Suppl 4): 209-220
- Bellwood. 2005. First Farmers: The Origin of Agricultural Societies. London: Blackwell Publishing. 360
- Bond G C, Kromer B, Beer J, et al. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science, 294: 2130-2136
- Cavalli-Sforza L, Menozzi P, Piazza A, 1993. Demic expansions and human evolution. Science, 259: 639-646
- Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. 2008. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. Quat Sci Rev, 27: 351-364
- Chen F H, Chen J H, Holmes J A, et al. 2010. Moisture changes over the last millennium in the Arid Central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. Quat Sci Rev, 29: 1055-1068
- Crawford G W. 2006. East Asian plant domestication. In: Stark M T, ed. Archaeology of Asia. Malden: Blackwell Publishing. 77-95
- Crutzen P J. 2002. Geology of mankind. Nature, 415: 23
- Cullen B R, Eckard R J, Callow M N, et al. 2008. Simulating pasture growth rates in Australian and New Zealand grazing systems. Aust J Agric Res, 59: 761-768
- Dickau R, Ranere A J, Cooke R G. 2007. Starch grain evidence for the preceramic dispersals of maize and root crops into tropical dry and humid forests of Panama. Proc Natl Acad Sci USA, 104: 3651-3656
- Dillehay T D, Kolata A L. 2004. Long-term human response to uncertain environmental conditions in the Andes. Proc Natl Acad Sci USA, 101: 4325-4330
- Dodson J, Li X Q, Zhou X Y, et al. 2013. Origin and spread of wheat in China. Quat Sci Rev, 72: 108-111
- Flad R, Li S, Wu X, et al. 2010. Early wheat in China: Results from new studies at Donghuishan in the Hexi Corridor. Holocene, 20: 955-965
- Fuller D Q, Qin L, Zheng Y F, et al. 2009. The domestication process and domestication rate in rice: Spikelet bases from the Lower Yangtze. Science, 323: 1607-1610
- He X B, Zhou J, Zhang X B, et al. 2006. Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. Reg Environ Change, 6: 62-70
- Huang C Y, Wu S F, Zhao M, et al. 1997. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation. Mar Micropaleontol, 32: 71-94
- Hunt H V, Vander Linden M, Liu X, et al. 2008. Millets across Eurasia: Chronology and context of early records of the genera Panicum and Setaria from archaeological sites in the Old World. Veg Hist Archaeobot, 17(Suppl): 5-18
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: The Physical Sciences Basis. New York: Cambridge University Press. 996
- Jared D J, Bellwood P. 2003. Farmers and their languages: The first expansions. Science, 300: 597-603
- Ji J F, Shen J, Balsam W, et al. 2005. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. Earth Planet Sci Lett, 233: 61-70
- Jiang L, Liu L. 2006. New evidence for the origins of sedentism and rice domestication in the Lower Yangtze River, China. Antiquity, 80: 355-361

- Jones M K, Liu X Y. 2009. Origins of agriculture in East Asia. *Science*, 324: 730–731
- Kirch P V. 2005. Archaeology and global change: The Holocene record. *Annu Rev Env Resour*, 30: 409–440
- Kleiven H K, Kissel C, Catherine K, et al. 2008. Reduced North Atlantic deep water coeval with the glacial Lake Agassiz freshwater outburst. *Science*, 319: 60–64
- Li X Q, Dodson J, Zhou X Y, et al. 2007. Early cultivated wheat and broadening of agriculture in Neolithic China. *Holocene*, 17: 555–560
- Li X Q, Zhou J, Dodson J, et al. 2009a. Increase of population and expansion of rice agriculture in Asia, and anthropogenic methane emission from 5000 a BP. *Quat Int*, 202: 41–50
- Li X Q, Shang X, Dodson J, et al. 2009b. Holocene agriculture in the Guanzhong Basin in NW China indicated by pollen and charcoal evidence. *Holocene*, 19: 1213–1220
- Li X Q, Zhao K L, Dodson J, et al. 2011. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: New evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China. *Quat Sci Rev*, 30: 3457–3466
- Li X Q, Sun N, Dodson J, et al. 2012. Human activity and its impact on the landscape at the Xishanping site in the western Loess Plateau during 4800–4300 cal yr BP based on the fossil charcoal record. *J Archaeol Sci*, 39: 3141–3147
- Li X Q, Sun N, Dodson J, et al. 2013. Vegetation Characteristics in the Western Loess Plateau between 5200 and 4900 cal a B.P. based on fossil charcoal records. *Veget Hist Archaeobot*, 22: 61–70
- Liu Y H, Henderson G M, Hu C Y, et al. 2013. Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8,200 year event. *Nat Geosci*, 6: 117–120
- Lu H Y, Zhang J P, Wu N Q, et al. 2009a. Phytoliths analysis for the discrimination of foxtail millet (*Setaria italica*) and common millet (*Panicum miliaceum*). *PLoS One*, 4: 1–15
- Lu H Y, Zhang J P, Liu K B, et al. 2009b. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 7367–7372
- Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, et al. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 13252–13257
- Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339: 1198–1201
- Miller N. 1997. The macrobotanical evidence for vegetation in the Near East, c. 18000/16000 BC to 4000 BC. *Paleorient*, 23: 197–207
- Newton C. 2005. Upper Egypt: Vegetation at the beginning of the third millennium BC inferred from charcoal analysis at Adaïma and Elkab. *J Archaeol Sci*, 32: 355–367
- Rollefson G, Kohler-Rollefson I. 1992. Early Neolithic exploitation patterns in the Levant: Cultural impact on the environment. *Populn Environment*, 13: 243–254
- Ruddiman W F, Guo Z T, Zhou X, et al. 2008. Early rice farming and anomalous methane trends. *Quat Sci Rev*, 27: 1291–1295
- Scott A C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 291: 11–39
- Shackleton C M, Prins F. 1992. Charcoal analysis and the principle of least effort—A conceptual model. *J Archaeol Sci*, 19: 631–637
- Shen J, Jones R T, Yang X D, et al. 2006. The Holocene vegetation history of lake Erhai, Yunnan Province, southwestern China: The role of climate and human forcings. *Holocene*, 16: 265–276
- Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. 1995. The GISP2 ¹⁸O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quat Res*, 44: 341–354
- Sun N, Li X Q, Dodson J, et al. 2013. Plant diversity of the Tianshui Basin in the western Loess Plateau during the mid-Holocene—Charcoal records from archaeological sites. *Quat Int*, 308–309: 27–35
- Sun N, Li X Q. 2012. The quantitative reconstruction of the palaeoclimate between 5200 and 4300 cal yr BP in the Tianshui Basin, NW China. *Clim Past*, 8: 625–636
- Tan M, Baker A, Genty D, et al. 2006. Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions: Comparison with dendrochronology/climatology. *Quat Sci Rev*, 25: 2103–2117
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. 1995. Late Glacial Stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science*, 269: 46–50
- Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. 2006. Holocene climate variability archived in the Puruogangri ice cap on the central Tibetan Plateau. *Ann Glaciol*, 43: 61–69
- Thornton C P, Schurr T G. 2004. Genes, language, and culture: An example from the Tarim Basin. *Oxf J Archaeol*, 23: 83–106
- Wang Y J, Cheng H, Edwards L, et al. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451: 1090–1093

- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2005. The Holocene Asian Monsoon: Links to solar changes and North Atlantic Climate. *Science*, 308: 854–857
- Wick L, Lemcke G, Sturm M. 2003. Evidence of Late glacial and Holocene climate change and human impact in eastern Anatolia: High-resolution pollen, charcoal, isotopic and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *Holocene*, 13: 665–675
- Willcox G. 2002. Evidence for ancient forest cover and deforestation from charcoal analysis of ten archaeological sites on the Euphrates. In: Thiébault S, ed. *Charcoal Analysis: Methodological Approaches, Palaeoecological Results and Wood Uses*. BAR Int Ser, 1063: 141–145
- Xu D K, Lu H Y, Wu N Q, et al. 2013. Asynchronous marine-terrestrial signals of the last deglacial warming in East Asia associated with low- and high-latitude climate changes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 9657–9662
- Yancheva G, Norbert R, Nowaczyk N, et al. 2007. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 455: 74–77
- Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B, et al. 2012. Reconstructing prehistoric land use change from archeological data: Validation and application of a new model in Yiluo valley, northern China. *Agric Ecosyst Environ*, 156: 99–107
- Yuan D, Cheng H, Edwards R L, et al. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 304: 575–578
- Zhang J P, Lu H Y, Wu N Q, et al. 2010. Phytolith evidence for rice cultivation and spread in Mid-Late Neolithic archaeological sites in central North China. *Boreas*, 39: 592–602
- Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322: 940–942
- Zhao K L, Li X Q, Dodson J, et al. 2012. Climatic variations over the last 4000 cal yr BP in the western margin of the Tarim Basin, Xinjiang, reconstructed from pollen data. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Paleoecol*, 321–322: 16–23
- Zhao K L, Li X Q, Zhou X Y, et al. 2013. Impact of agriculture on an oasis landscape during the late Holocene: Palynological evidence from the Xintala site in Xinjiang, NW China. *Quat Intl*, 311: 81–86
- Zhao Z J. 1998. The Middle Yangtze region in China is one place where rice was domesticated: Phytolith evidence from the Diaotonghuan Cave, Northern Jiangxi. *Antiquity*, 72: 885–897
- Zhou X Y, Li X Q, Dodson J, et al. 2012. Land degradation during the Bronze Age in Hexi Corridor (Gansu, China). *Quat Int*, 254: 42–48
- Zhou X Y, Li X Q. 2011. Variations in spruce (*Picea* sp.) distribution in the Chinese Loess Plateau and surrounding areas during the Holocene. *Holocene*, 22: 687–696
- Zong Y, Chen Z, Innes B J, et al. 2007. Fire and flood management of coastal swamp enabled first rice paddy cultivation in east China. *Nature*, 449: 459–463