

黄土 - 古土壤中蜗牛化石总数古气候意义探讨

董吉宝, 安芷生, 卢凤艳, 强小科

(中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要: 本文通过研究黄土高原西北—东南断面上三个剖面(渭南、洛川、九州台)末次间冰期以来的蜗牛化石记录,探讨了黄土-古土壤序列中蜗牛化石个体总数可能保存的古气候信息。研究表明,黄土-古土壤中蜗牛化石总数主要受控于研究区域保存条件(温度、降水及相联系的成壤强度)和生存条件(气候环境条件是否适宜蜗牛的生存)。保存条件为黄土高原南部蜗牛化石总数的主要影响因素,而黄土高原北部主要受生存条件控制,黄土高原中部则同时受两个因素的影响。基于洛川蜗牛化石总数的变化特征指出,~400 ka 前后冰期气候状况存在明显差异,400 ka 前的冰期更加适宜蜗牛的生存,此后洛川地区冰期蜗牛生存的气候环境条件不断恶化。本研究为利用蜗牛化石探讨黄土高原古气候、古环境变化提供了重要参考。

关键词: 蜗牛; 古气候; 蜗牛化石总数; 黄土-古土壤; 黄土高原

中图分类号: P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2015)05-0291-08

Discussion on the paleoclimatic implications of total fossil snail counts in loess-paleosol sequences

DONG Ji-bao, AN Zhi-sheng, LU Feng-yan, QIANG Xiao-ke

(State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: Here we attempt to discuss the possible climatic information of TFC by studying the fossil snail records since last interglacial in three sections (Weinan, Luochuan, Jiuzhoutai) on the northwest—southeast transect of CLP. Our results indicate that both the conditions for preservation (temperature, precipitation and related degree of pedogenesis) and survival (whether the climate and environmental conditions are suitable for the survival of snails) are controlling factors of TFC in the loess-paleosol sequence. Our study implies that on the southern CLP, preservation condition is dominant factor, while on the northern CLP, conditions for survival regulate the value of TFC, and both factors will influence TFC in the middle part of CLP. According to the characteristics of TFC in Luochuan section, we argue that the glacial climate is remarkable different prior to and after ~400 ka and it is more suitable for the survival of snails before 400 ka, and the climatic and environmental condition deteriorated sharply thereafter. This study will provide important information for future fossil snail researches concerning the paleoclimatic and paleoenvironmental changes on the CLP.

Key words: land snail; paleoclimate; total fossil counts (TFC) of snails; loess-paleosol; Chinese Loess Plateau (CLP)

蜗牛是黄土中常见的无脊椎动物,蜗牛化石被视为黄土地层中古环境古气候变化的“指示性动物”(刘东生, 1985)。蜗牛化石在地层中保存较为完好,数量丰富,同时很少受到后期搬运

收稿日期: 2015-09-18

基金项目: 青年科学基金项目(41302152); 西部博士基金

通讯作者: 董吉宝, E-mail: djb@ieecas.cn

和再沉积作用的影响等,能提供较准确的古环境信息。同时,蜗牛的种属组合对气候环境变化的响应迅速而敏感,是良好的气候变化替代指标(吴乃琴和李峰江,2008)。总的来说,相对其他物理、化学指标,蜗牛化石在反映气候、环境方面更加敏感和直接,因此,蜗牛化石在黄土古环境研究中有着独特的优势,具有巨大的应用前景和潜力。

自20世纪80年代我国已开始蜗牛种属组合的研究,如卢演传和安芷生(1979)讨论了蜗牛化石种属与黄土高原的古气候环境的关系;陈德牛等(1982)根据现生蜗牛的地理分布、生活习性和栖息环境,以及洛川黄土剖面蜗牛化石的分布,初步将中、晚更新世黄土地层蜗牛化石划分为两个组合,即反映较温湿生物气候环境的间齿螺(*Metodontia*)组合和反映干冷生物气候环境的华蜗牛(*Cathaica*)组合;刘东生(1985)在《黄土与环境》一书中建立了240万年以来较完整的蜗牛化石组合和特征,并绘制了典型蜗牛属种的现生种和化石的地理分布。近二十年来,吴乃琴等在黄土高原开展了大量蜗牛化石的研究工作,深入探讨了蜗牛化石种属组合记录的晚新生代以来黄土高原生态环境演替及古环境变化(吴乃琴等,1995,1996,1998,2000,2001,2002; Rousseau and Wu 1997, 1999; 李峰江等,2006; Wu et al, 2006, 2007; 陈晓云,2008; 陈晓云和吴乃琴,2008; 伍斌和吴乃琴,2008; Li et al, 2008; Rousseau et al, 2008; Li and Wu, 2010; 伍斌,2011; Wu and Wu, 2011)。

吴乃琴和李峰江(2008)对前人在黄土高原地区开展的大量蜗牛化石研究工作做了全面、系统的总结,并指出,“总体上来说,黄土地层中蜗牛化石保存很好,很少发生有蜗牛钙质壳体溶失的现象,但在古土壤地层中,蜗牛壳体或多或少地都会发生溶失,特别是在强烈发育的土壤层段,如 S_1 , S_4 和 S_5 的下部地层中保存下来的蜗牛化石个体都较少,为古环境的解释带来很大的困难”。在已报道的蜗牛化石序列中,如黄土高原中部的洛川、西峰、长武(吴乃琴等,2001; 陈晓云,2008; Rousseau et al, 2008; 吴斌,2011),蜗牛壳体总数最大值通常位于黄土层中或黄土与古土壤过渡层位(董吉宝,2012),这很可能是由于蜗牛壳体遭受淋溶的缘故,也增加了蜗牛化石古环境解释的不确定性。因此,上述现象值得深入

研究和探讨。

如果蜗牛化石在成壤过程遭受淋溶而不能保存下来,那么,黄土层中的蜗牛化石是否也被溶失而不能全部保存;黄土高原是否能够保存末次间冰期的蜗牛化石记录,即末次间冰期的成壤作用未溶失蜗牛化石;成壤作用更强的黄土高原南部是否适合开展蜗牛化石研究;为何黄土高原中部蜗牛化石个体总数序列与磁化率指标间存在较大差异,蜗牛化石总数具有何种古气候意义。这些科学问题都应该引起重视并加以研究。为研究上述问题,本文尝试利用黄土高原西北—东南断面上的三个剖面(渭南、洛川、九州台)的蜗牛化石总数,探讨末次间冰期以来黄土高原不同区域、不同时代地层蜗牛化石总数可能蕴含的古气候意义及其影响因素。

1 材料与方法

渭南、洛川、兰州九州台剖面分别位于黄土高原的南缘、中部和北缘,三个地区均受东亚季风的影响。渭南现代年均温为 $12.0\sim 13.6^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $570\sim 620\text{ mm}$;洛川年均温为 9.1°C ,年均降水量约 620 mm ;兰州年平均气温 10.3°C ,年平均降水量 360 mm ,位于现代季风影响的边缘区域。三剖面以往已有过蜗牛化石研究,本研究中九州台剖面蜗牛化石总数和磁化率采用Keen(1995)的研究结果,渭南和洛川剖面末次间冰期以来蜗牛化石总数为本研究结果。两个剖面均以 10 cm 间距采样,分别采集70个和116个样品,每个样品采集 $\sim 15\text{ kg}$,用 0.5 mm 的标准筛网冲洗,实验室内显微镜下鉴定种属,统计化石总数,蜗牛碎片未做统计,分别获得5867个、1893个蜗牛化石。同时,分别以 5 cm 和 10 cm 间距测量了两个剖面的磁化率,以便进行地层对比和古气候环境分析。

2 结果与分析

渭南、洛川、兰州九州台剖面的黄土沉积已有很多研究(Derbyshire et al, 1995; An et al, 2000; Sun et al, 2010),本研究对比分析了三个剖面末次间冰期以来的蜗牛化石总数、地层、磁化率数据(图1)。由图1(E、F)可知,渭南剖面在 11 m 以下未发现蜗牛化石,对应于 S_1 古土壤层(深海氧同位素阶段5, MIS5),磁化率为高值,成壤作用强。蜗牛化石总数从 11 m 向上逐渐增多,在 $4\sim 4.6\text{ m}$ 处蜗牛化石总数为一次级峰,对应于

MIS3 晚期的弱古土壤层, 磁化率相对较低, 成壤作用相对弱。在 2.2~2.4 m 处蜗牛化石达到最多, 为 757 个, 对应于末次冰盛期 (LGM) 黄土层, 磁化率为末次间冰期以来最小值。此后蜗牛化石总数逐渐减少, 在 0.8~1 m 深度 (S_0 古土壤层的底部, 对应于 MIS1 开始) 化石总数迅速减少到不足 20 个, 磁化率则突然升高, 指示了成壤作用增强。本研究中蜗牛化石总数的变化特征与吴乃琴等 (2002) 的研究结果类似。

洛川剖面与渭南剖面结果明显不同 (图 1 C、D), 洛川剖面蜗牛化石最多的层位对应于 MIS4 黄土层, 分别在 8.9 m 和 7.3 m 处形成两个高峰, 化石数量分别为 175 个、67 个, 磁化率处于较低值; 虽然磁化率值与洛川 LGM 时期相近, 但显著低于渭南 LGM 时期的磁化率值。在 0.9~1.1 m 和 9.7~10 m 为两个次级的峰, 分别对应于 S_0 古土壤形成之前和 S_1 古

土壤顶部 (MIS5 晚期)。10.5 m 以下 (S_1 古土壤中下部) 基本未发现完整蜗牛化石, 磁化率则为高值。与渭南剖面类似, 0.9 m 以上地层 (S_0 古土壤层的底部, 对应于 MIS1 开始) 蜗牛化石突然减少, 磁化率值则为突然增大。总体上来说, 洛川剖面蜗牛化石结果与 Rousseau and Wu (1997) 的结果具有类似特征, 均在 MIS4 时期蜗牛化石数量最多。

兰州九州台剖面蜗牛化石结果来自 Keen (1995) 的研究结果 (图 1 A、B)。蜗牛化石总体特征与渭南、洛川均不同, 蜗牛化石数量较多的层位均为古土壤或弱古土壤层。其中, S_1 古土壤层三个磁化率峰值均对应于三个蜗牛化石数量高值层位。 L_1 中的弱古土壤层蜗牛化石数量则为剖面中最多, 磁化率则未能指示出弱古土壤。

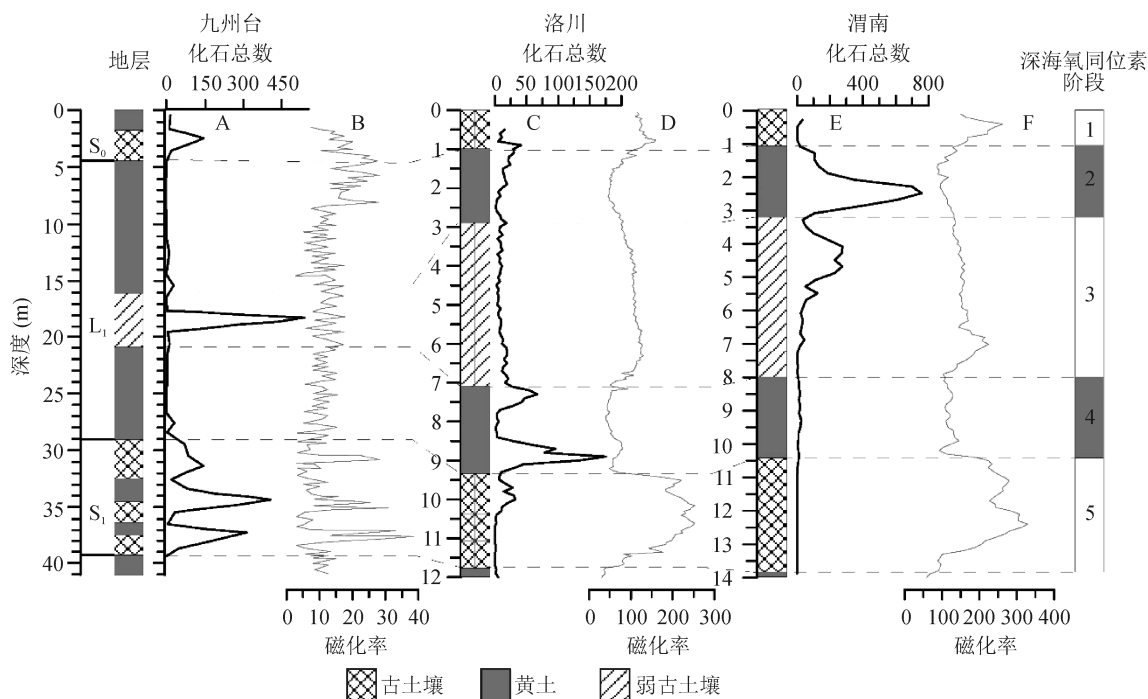


图 1 九州台、洛川、渭南剖面地层、蜗牛化石总数、磁化率与深海氧同位素阶段 (MIS) 对比
MIS1、MIS5 分别对应于全新世古土壤和末次间冰期古土壤, 成壤作用强, 磁化率高; MIS2、MIS4 对应于两层黄土沉积, 成壤作用弱, 磁化率低; MIS3 对应于弱古土壤层, 磁化率介于古土壤和黄土之间, 成壤作用相对较强。

Fig.1 Comparison of marine isotope stages (MIS) and stratigraphy, total fossil counts (TFC), magnetic susceptibility (MS) in Jiuzhoutai, Luochuan, Weinan sections

MIS1 and MIS5 correspond to the Holocene and the last interglacial paleosols, respectively. The degree of pedogenesis are strong and MS value are high during these intervals. MIS2 and MIS4 correspond to two loess layers with low MS value undergone weak pedogenesis processes. MIS3 correspond to weak paleosol, and the MS value and the degree of pedogenesis is relatively higher compared with loess layers.

3 讨论

总的来说, 蜗牛化石数量的多与少主要取决

于两个因素, 即蜗牛的数量和后期蜗牛壳体化石的保存。研究显示, 蜗牛适宜在暖湿环境下生存 (徐

文华等, 2002)。黄土高原季风气候以雨热同期为特征, 同时黄土母质中含有大量碳酸盐, 为蜗牛生长提供不可缺少的钙质成分, 因此, 在温湿度适宜条件下, 黄土高原地区适宜于蜗牛生长。蜗牛壳体主要由文石组成, 通常壳体较薄, 易于被溶失。所以, 保存条件是影响蜗牛化石数量的重要因素之一。

3.1 末次间冰期以来九州台、洛川、渭南剖面蜗牛化石总数的古气候意义

兰州九州台、洛川、渭南剖面位于黄土高原西北—东南断面上, 三个剖面所处的现代气候环境存在显著差异。渭南剖面在黄土高原南缘, 年平均温度高, 降水量大, 成壤作用相对最强; 兰州九州台位于黄土高原北缘, 年平均温度低, 降水量少, 成壤强度相对最弱; 洛川地区的各气候环境参数则基本介于两者之间。从现代气候环境角度来说, 渭南地区可能不利于蜗牛化石的保存, 而九州台地区则可能不利于蜗牛的生存。

磁化率是良好的东亚夏季风代用指标 (An et al, 1990), 与成壤强度相关 (Zhou et al, 1990), 磁化率值高, 指示了增强的夏季风和成壤作用, 反之, 磁化率低指示了夏季风和成壤作用减弱。磁化率在宏观上指示不同时期东亚夏季风强度, 以及与夏季风密切相关的成壤强度, 良好地反映了上述三个地点末次间冰期以来的气候环境差异。例如, 渭南剖面磁化率值最大, 即使 LGM 时期的磁化率值也高于兰州九州台末次间冰期的磁化率值, 洛川剖面磁化率值则介于两地之间。与现代气候参数类似, 磁化率值也暗示了末次间冰期以来, 黄土高原南部可能不利于蜗牛化石的保存, 黄土高原北缘则可能不利于蜗牛的生存。三个地点蜗牛化石总数的变化特征显著不同 (图 1), 很可能是末次间冰期以来三个地区气候环境条件差异的反映和良好记录。

吴乃琴等 (2002) 研究表明, 即使在寒冷的 LGM 时期, 渭南地区的气候环境仍适合蜗牛的生长和发育。因此, 可以说末次间冰期以来不同时期渭南地区均能适合蜗牛生长。由于渭南位于黄土高原南缘, 受夏季风影响显著, 成壤作用强, 所以气候环境条件不利于蜗牛化石的保存。本研究也显示 (图 1 E、F), 全新世渭南地区随着磁化率升高, 成壤强度增大, 蜗牛化石数量显著减少; 在 MIS5 磁化率更高时期, 甚至是 MIS4 时期,

也未发现蜗牛化石, 很可能是成壤过程中遭受溶失而未能保存下来。仅在 LGM 和 MIS3 晚期成壤作用显著减弱时保存了大量化石。这些现象表明, 末次间冰期以来渭南地区蜗牛化石总数很可能主要受控于保存条件, 即温度、降水及相联系的成壤强度等气候环境条件是否适合蜗牛化石的保存。

与渭南相比, 洛川末次间冰期以来不同时期的成壤强度相对弱, 但在暖湿的古土壤和弱古土壤中, 仍未发现蜗牛化石, 估计已被溶失 (图 1 C、D)。例如, 全新世早期蜗牛化石数量表现为增长趋势, 进入全新世, 磁化率显著升高, 而蜗牛化石数量的增长趋势则被打断, 化石数量突然减少; 在 S_1 古土壤中下部也未发现蜗牛化石, 这些都暗示了全新世和末次间冰期的成壤作用溶失了大量蜗牛化石。LGM 时期洛川剖面蜗牛化石数量则比渭南显著减少。成壤作用更强的渭南地区在这一时期尚可保存大量蜗牛化石, 表明 LGM 时期洛川蜗牛化石数量的减少并非保存条件所致, 应归因于生存条件, 即洛川这一时期的气候环境条件已不适合蜗牛的生长和发育。吴乃琴等的研究也表明 LGM 时期洛川地区夏季风明显减弱 (Wu et al, 2002), 暗示了这一时期洛川地区的气候环境条件很可能已不适宜蜗牛的大量繁衍生息。而在 MIS4 黄土堆积时期, 成壤作用相对要弱; 与 LGM 时期相比, 这一时段黄土高原温度也相对较高 (Gao et al, 2011), 很可能是保存条件和生存条件均适宜, 所以蜗牛化石数量上表现为峰值。因此, 我们认为, 洛川地区末次间冰期以来蜗牛化石的数量受到了生存和保存条件的共同影响。

兰州九州台位于黄土高原北缘的干旱—半干旱地区, 受东亚夏季风影响, 季节性明显。有大量现生蜗牛分布, 表明现代暖期这一地区适宜蜗牛生长。九州台蜗牛化石记录也显示, 末次间冰期以来的蜗牛化石数量峰值均对应于磁化率高值、成壤作用相对增强的古土壤层和弱古土壤层, 即夏季风增强的暖湿期 (图 1 A、B); 而在 L_1 黄土堆积时期, 蜗牛化石数量则明显减少 (Keen, 1995)。这一时期磁化率低, GDGT 记录的古温度显著降低 (Jia et al, 2013), 指示了成壤程度降低和夏季风减弱的冷干时期。与暖湿阶段相比, 成壤作用减弱的黄土中应更有

利于蜗牛的保存。因此, 我们有理由推断, 九州台地区 L_1 黄土沉积时期气候寒冷干燥, 已不适宜蜗牛的生长, 末次间冰期以来黄土高原北缘区域蜗牛化石数量的多少很可能归因于气候环境状况是否适合蜗牛的生长繁殖和发育, 即受生存条件控制。

综上所述, 我们认为, 末次间冰期以来黄土高原蜗牛化石的总数受研究区域气候环境条件调控的保存条件和生存条件的综合影响, 讨论蜗牛化石总数的古气候意义时应分区区别对待。

3.2 洛川剖面 500 ka 以来蜗牛化石总数的气候指示意义

下面我们以洛川剖面为例, 讨论 500 ka 以来蜗牛化石总数可能的古气候指示意义, 蜗牛化石数据来自 Rousseau et al (2008)。图 2 显示, 洛川 500 ka 以来蜗牛化石总数的峰值主要对应于低磁化率值的黄土地层, 即沉积速率增加、粒径增大、夏季风减弱、冬季风加强时期, 但 LGM 时期的黄土层除外。这表明 500 ka 以来洛川地区黄土堆积的冰期时段既能适宜蜗牛的生存, 也适合于蜗牛化石的保存, 为研究不同冰期气候环境差异提供了重要的生物记录。但随着第四纪以来全球温度不断降低, 到 LGM 时期洛川地区的气候环境条件已不能满足蜗牛的生存需求, 蜗牛化石数量显著减少, 从 L_5 黄土层中超过 2000 个化石到 L_1 黄土中 LGM 时期不足 20 个(图 2 蓝色条带)。冰期蜗牛化石总数的变化表明, 最近 500 ka 以来洛川地区冰期蜗牛生长季长度明显缩短, 蜗牛生存的气候环境条件不断恶化。值得注意的是, 400 ka 前后的冰期气候状况存在显著差异, 400 ka 之前冰期的蜗牛化石数量明显偏高; 位于黄土高原中部的西峰剖面也记录了类似的现象(陈晓云, 2008)。这可能暗示了 400 ka 前黄土高原冰期的气候相对温和, 较适宜于蜗牛的生存, 而此后的气候环境状况不断恶化, 蜗牛化石数量骤减。

为了深入分析蜗牛化石总数蕴含的古气候信息, 我们分析了洛川剖面 500 ka 以来蜗牛化石总数与磁化率间的关系(图 3)。图 3 显示磁化率值为 25~50 时, 蜗牛化石数量最多, 超过 2000 个; 随着磁化率升高或降低, 蜗牛化石数量均明显减少。这进一步表明洛川地区蜗牛化石数量同时受到了生存和保存条件的影响。随着磁化率升高, 夏季风增强, 成壤作用加强, 将不利于蜗牛化石

保存; 在磁化率低值期, 夏季风减弱, 气候环境恶化, 则不利于蜗牛的生存。这一研究结果暗示了在黄土高原南部冰期黄土中的蜗牛化石可能已遭受部分溶失, 为未来选择合适的研究地点提供了重要的参考标准。

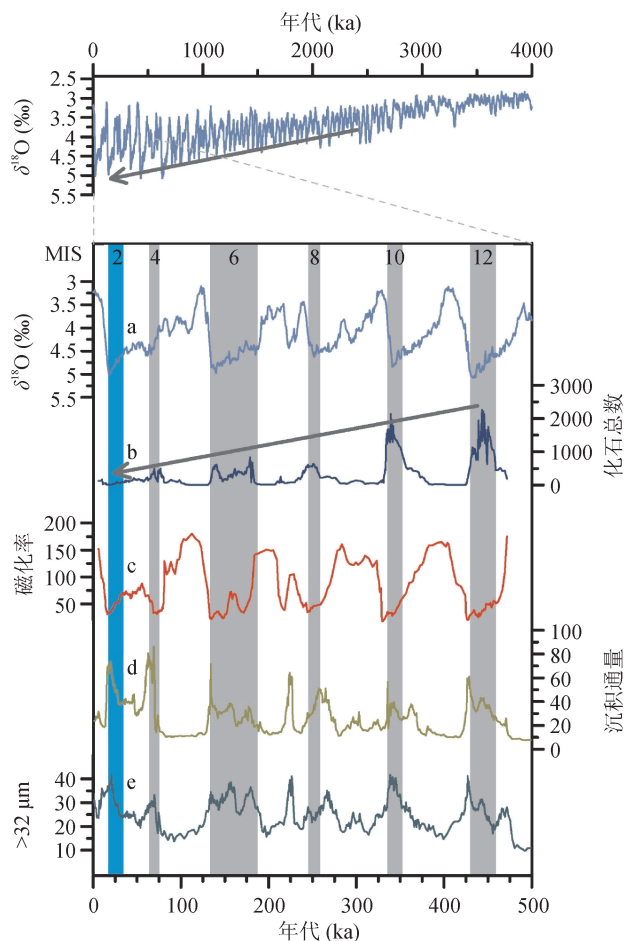


图 2 洛川剖面蜗牛化石总数、磁化率与粒度、沉积通量及底栖有孔虫氧同位素对比

a. 底栖有孔虫氧同位素 (Lisiecki and Raymo 2005); b. 洛川剖面蜗牛总数及 c. 磁化率来自文献 (Rousseau et al, 2008); d. >32 μm 含量及 e. 沉积通量数据来自文献 (Guo et al, 2009); MIS 表示深海氧同位素阶段。灰色条带指示蜗牛总数的峰值, 绿色条带指示 LGM 时期蜗牛化石总数显著减少。黑色箭头指示第四纪以来全球温度不断降低和冰期蜗牛总数显著减少。

Fig.2 Comparison of total fossil snail counts (TFC), magnetic susceptibility, grain size larger than 32 μm, dust flux and benthic foraminifer's oxygen isotope

a. benthic foraminifera oxygen isotope (Lisiecki and Raymo, 2005). b. TFC and c. magnetic susceptibility in Luochuan section (Rousseau et al, 2008). d. grain size larger than 32 μm, and e. dust flux in Xifeng section (Guo et al, 2009). MIS stands for marine isotope stage. Gray bars show the TFC peaks. Green bar indicates that TFC decrease sharply during LGM. Black arrows show the decreases of mean global temperature and TFC.

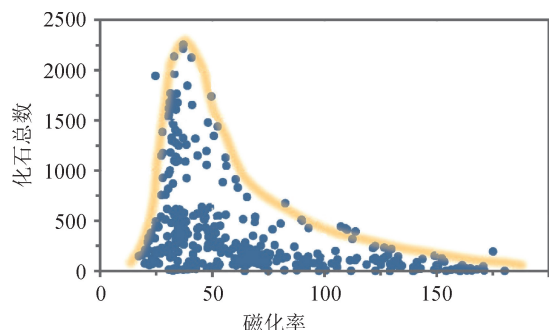


图3 洛川 500 ka 以来蜗牛化石总数与磁化率关系图
数据来自 Rousseau et al (2008)。

Fig.3 The relationship between total fossil snail counts and magnetic susceptibility since 500 ka in Luochuan section
Data are from Rousseau et al (2008).

3.3 黄土高原蜗牛化石总数的受控因素

综合上述分析,我们绘制黄土高原蜗牛化石总数受控因素示意图(图4)。示意图显示,黄土高原南部地区(红色虚线)由于受到东亚夏季风的显著影响,即使在冰期黄土堆积为主时期蜗牛化石也可能被部分溶失,蜗牛化石总数主要受控于保存条件,即气候环境状况是否有利于蜗牛化石的保存。黄土高原北缘地区(绿色虚线)处于季风影响的边缘地带,成壤作用相对弱,尚不足以溶蚀蜗牛化石,因此,蜗牛化石的数量主要取决于气候环境条件是否适宜于蜗牛的生长,即受生存条件控制。介于两区之间的黄土高原中部区域则同时受到了两个因素的共同影响,但似乎保存条件的影响更大,仅在寒冷的 LGM 时期才凸显出生存条件的影响。

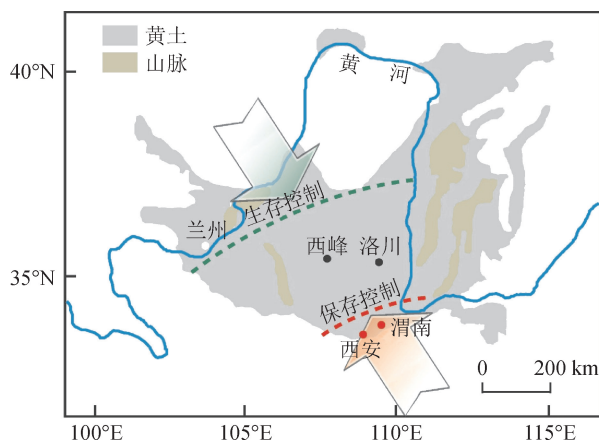


图4 黄土高原蜗牛化石总数控制因素示意图
Fig.4 Diagram of the controlling factor of total fossil counts on the Chinese Loess Plateau

4 结论与展望

通过研究黄土高原西北—东南断面上渭南、

洛川、九州台剖面末次间冰期以来蜗牛化石记录发现,黄土高原蜗牛化石个体总数保存了丰富的古气候信息。蜗牛化石总数受气候环境状况调控的保存条件(温度、降水及相联系的成壤强度)和生存条件(气候环境条件是否适宜蜗牛的生存)的共同影响。保存条件为黄土高原南部蜗牛化石数量的主要影响因素,而黄土高原北部则主要受控于生存条件,黄土高原中部受两个因素的共同影响。洛川剖面蜗牛化石总数的变化特征表明,400 ka 前后冰期气候环境状况存在显著差异,400 ka 前的冰期蜗牛生长季相对较长,更加适宜蜗牛的生存,此后洛川地区冰期蜗牛生存的气候环境条件不断恶化。这一研究结果为未来蜗牛化石研究区域的选择提供了重要参考。例如,若要研究不同间冰期的气候环境差异,应选择黄土高原北部的季风边缘区;若要探讨不同冰期的气候特征,应将黄土高原的中部甚至到黄土高原的南部作为研究区域。

由于不同区域主要保存了不同时段的蜗牛化石,且蜗牛种属并不完全相同,未来如何利用蜗牛化石建立完整的古气候、古环境变化序列,仍需不断摸索。当前,迫切需要建立黄土高原现生蜗牛(种属组合,壳体碳、氧同位素)与其生存环境的气候参数(温度、湿度)间的关系,这是建立一套完整蜗牛化石古气候、古环境记录的必要条件,也是利用蜗牛化石开展古气候参数定量研究的前提和重要基础。

致谢: 感谢吴乃琴研究员、黄林培博士在蜗牛种属鉴定方面给予的指导与帮助。

参考文献

- 陈德牛,卢演铸,安芷生. 1982. 黄土地层中蜗牛化石组合及其意义 [C]// 中国第四纪研究委员会. 第三届全国第四纪学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 7-15. [Chen D N, Lu Y C, An Z S. 1982. Snail assemblages in loess strata and their environmental implication [C]// Chinese Association for Quaternary Research. Proceedings of the 3rd National Quaternary Conference of China. Beijing: Science Press, 7-15.]
- 陈晓云. 2008. 甘肃西峰黄土剖面 500 ka 以来的蜗牛化石记录及其古气候、古环境变化的研究 [D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1-110. [Chen X Y. 2008. Terrestrial mollusk record from the Xifeng loess sequence in the Chinese Loess Plateau during the past 500 ka and

- its implications for paleoenvironmental evolution [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–110.]
- 陈晓云, 吴乃琴. 2008. 黄土高原 MIS 3 时期蜗牛化石记录的温湿气候及其成因机制探讨 [J]. *第四纪研究*, 28(1): 154–161. [Chen X Y, Wu N Q. 2008. Relatively warm-humid climate recorded by mollusk species in the Chinese Loess Plateau during MIS 3 and its possible forcing mechanism [J]. *Quaternary Sciences*, 28(1): 154–161.]
- 董吉宝. 2012. 综述陆生蜗牛化石在黄土古环境研究中的应用 [J]. *地球环境学报*, 3(2): 757–769. [Dong J B. 2012. Review on the fossil land snail studies in loess and paleoenvironmental researches [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(2): 757–769.]
- 李丰江, 吴乃琴, Rousseau D D. 2006. 黄土高原秦安中新世黄土 - 古土壤序列的蜗牛化石初步研究 [J]. *中国科学*, 36(5): 438–444. [Li F J, Wu N Q, Rousseau D D. 2006. Preliminary study of mollusk fossils in the Qin'an Miocene loess-soil sequence in Western Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 49(7): 724–730.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 141–176. [Liu T S. 1985. Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 141–176.]
- 卢演涛, 安芷生. 1979. 约 70 万年以来黄土高原自然环境变化系列探讨 [J]. *科学通报*, 24(5): 221–224. [Lu Y C, An Z S. 1979. Discussion on paleoenvironmental changes in the Loess Plateau since about 700 ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 24(5): 221–224.]
- 伍 斌. 2011. 黄土高原中更新世气候转型期蜗牛化石记录的环境演化历史 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1–96. [Wu B. 2011. Terrestrial mollusk record from the Chinese Loess Plateau during the Middle Pleistocene Transition and its implications for paleoenvironmental evolution [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 1–96.]
- 伍 斌, 吴乃琴. 2008. 黄土高原 S_5 古土壤形成期的气候环境——陆生蜗牛化石的证据 [J]. *第四纪研究*, 28(5): 901–908. [Wu B, Wu N Q. 2008. Paleoenvironmental study of S_5 paleosol formation: based on mollusk evidence [J]. *Quaternary Sciences*, 28(5): 901–908.]
- 吴乃琴, 李丰江. 2008. 陆生蜗牛化石与中国黄土古环境研究 [J]. *第四纪研究*, 28(5): 831–840. [Wu N Q, Li F J. 2008. Terrestrial mollusk fossils from Chinese loess sequences and their paleoenvironmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 28(5): 831–840.]
- 吴乃琴, 刘秀平, 顾兆炎, 等. 2002. 末次盛冰期黄土高原蜗牛化石记录的气候快速变化及其影响机制 [J]. *第四纪研究*, 22(3): 283–291. [Wu N Q, Liu X P, Gu Z Y, et al. 2002. Rapid climate variability recorded by mollusk species on the Loess Plateau during the last glacial maximum [J]. *Quaternary Sciences*, 22(3): 283–291.]
- 吴乃琴, 吕厚远, 陈德牛, 等. 1995. 陕西渭南晚冰期时的环境与气候——蜗牛化石的证据 [J]. *第四纪研究*, 15(2): 139–149. [Wu N Q, Lü H Y, Chen Deniu, et al. 1995. Late glaciation paleoenvironment in Weinan, Shaanxi: Evidence based on snail fossils [J]. *Quaternary Sciences*, 15(2): 139–149.]
- 吴乃琴, 裴云鹏, 吕厚远, 等. 2001. 黄土高原 35 万年来冬、夏季风变化周期的差异——陆生蜗牛化石的证据 [J]. *第四纪研究*, 21(6): 540–550. [Wu N Q, Pei Y P, Lü H Y, et al. 2001. Orbital forcing of East Asian summer and winter monsoon variations in the past 350000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 21(6): 540–550.]
- 吴乃琴, Rousseau D D, 刘东生. 1996. 110 ka 来洛川黄土地层中蜗牛化石记录与环境因子分析 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 26(5): 405–410. [Wu N Q, Rousseau D D, Liu T S. 1996. Land mollusk records from the Luochuan loess sequence and their paleoenvironmental significance [J]. *Science in China (Series D)*, 39(5): 494–502.]
- 吴乃琴, Rousseau D D, 刘东生. 1998. 末次冰期晚期黄土蜗牛化石记录的气候不稳定性 [J]. *科学通报*, 43(15): 1654–1658. [Wu N Q, Rousseau D D, Liu T S. 1999. Climate instability recorded by mollusk assemblages from the late glacial loess deposits in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(13): 1238–1242.]
- 吴乃琴, Rousseau D D, 刘秀平. 2000. 25 万年来黄土蜗牛的生态演替对地球轨道变化的响应 [J]. *科学通报*, 45(7): 765–770. [Wu N Q, Rousseau D D, Liu X P. 2000. Response of mollusk assemblages from the Luochuan loess section to orbital forcing since the last 250 ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(17): 1617–1622.]
- 徐文华, 周加春, 张 蓊, 等. 2002. 温湿度对同型巴蜗牛的影响效应 [J]. *江苏农业学报*, 18(2): 99–102. [Xu W H, Zhou J C, Zhang E, et al. 2002. Effects of temperature and humidity on *Bradybeana similaris* [J]. *Jiangsu Journal of*

- Agricultural Sciences*, 18(2): 99–102.]
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(1):171–187.
- An Z S, Liu T S, Lu Y C, et al. 1990. The long-term paleomonsoon variation recorded by the Loess-paleosol sequence in central china [J]. *Quaternary International*, 7–8: 91–95.
- Derbyshire E, Keen D H, Kemp R A, et al. 1995. Loess-paleosol sequences as recorders of palaeoclimatic variation during the last Glacial-Interglacial cycle: some problems of correlation in north-central China [J]. *Quaternary Proceedings*, 4:7–18.
- Gao L, Nie J S, Clemens S, et al. 2012. The importance of solar insolation on the temperature variations for the past 110 kyr on the Chinese Loess Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 317–318(2): 128–133.
- Guo Z T, Berger A, Yin Q Z, et al. 2009. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records [J]. *Climate of the Past*, 5(1): 21–31.
- Keen D H. 1995. Molluscan assemblages from the loess of North Central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 14(7–8): 699–706.
- Jia G D, Rao Z G, Zhang J, et al. 2013. Tetraether biomarker records from a loess-paleosol sequence in the western Chinese Loess Plateau [J]. *Frontiers in Microbiology*, doi:10.3389/fmicb.2013.00199.
- Li F J, Rousseau D D, Wu N Q, et al. 2008. Late Neogene evolution of the East Asian monsoon revealed by terrestrial mollusk record in Western Chinese Loess Plateau: From winter to summer dominated sub-regime [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3): 439–447.
- Li F J, Wu N Q. 2010. Pliocene land snail record from western Chinese Loess Plateau and implications for impacts of the summer insolation gradient between middle and low latitudes on the East Asian summer monsoon [J]. *Global and Planetary Change*, 72(1–2): 73–78.
- Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, doi:10.1029/2004PA001071.
- Rousseau D D. 1987. Paleoclimatology of the Achenheim series (middle and upper pleistocene, Alsace, France) A. malacological analysis [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59: 293–314.
- Rousseau D D, Wu N Q. 1997. A new molluscan record of the monsoon variability over the past 130000 yr in the Luochuan loess sequence, China [J]. *Geology*, 25(3): 275–278.
- Rousseau D D, Wu N Q. 1999. Mollusk record of monsoon variability during the L₂—S₂ Cycle in the Luochuan Loess Sequence, China [J]. *Quaternary Research*, 52(3): 286–292.
- Rousseau D D, Wu N Q, Pei Y P, et al. 2008. Three exceptionally strong East Asian summer monsoon events during glacial times in the past 470 kyr [J]. *Climate of the Past*, 5(2): 157–169.
- Sun Y, He L, Liang L J, et al. 2010. Changing color of Chinese loess: Geochemical constraint and paleoclimatic significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi:10.1016/j.jseas.2010.08.006.
- Wu B, Wu N Q. 2011. Terrestrial mollusc records from Xifeng and Luochuan L₉ loess strata and their implications for paleoclimatic evolution in the Chinese Loess Plateau during marine Oxygen Isotope Stages 24—22 [J]. *Climate of the Past*, 7(2): 349–359.
- Wu N Q, Chen X Y, Rousseau D D, et al. 2007. Climatic conditions recorded by terrestrial mollusc assemblages in the Chinese Loess Plateau during marine Oxygen Isotope Stages 12—10 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(13–14): 1884–1896.
- Wu N Q, Liu T S, Liu X P, et al. 2002. Mollusk record of millennial climate variability in the Loess Plateau during the Last Glacial Maximum [J]. *Boreas*, 31(1): 20–27.
- Wu N Q, Pei Y P, Lu H Y, et al. 2006. Marked ecological shifts during 6.2—2.4 Ma revealed by a terrestrial molluscan record from the Chinese Red Clay Formation and implication for palaeoclimatic evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 233(3–4): 287–299.
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. 1990. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. *Nature*, 346(6286): 737–739.