

甘肃合水地区全新世以来土壤剖面黑碳记录及其气候变化

廖冰, 谭志海, 孙斌, 龙艳侠, 范江晨, 刘钊

西安工程大学 环境与化学工程学院, 西安 710048

摘要: 针对甘肃合水马家村 (MJC) 全新世黄土剖面进行野外采样, 分析磁化率和黑碳 (焦炭和烟炱) 等古气候指标, 试图探讨黄土高原北部全新世以来生物质燃烧特征以及自然生态环境演变过程, 结果表明: 末次冰期和全新世早期 (11500—8500 a BP) 气候寒冷而干旱, 区域野火事件时而发生, 植被生物量是此阶段野火发生与蔓延的限制因素; 距今 8000 年以来, 黑碳和炭屑浓度整体呈现下降趋势。由于季节性降水增多从而抑制大范围火灾发生几率。然而, 8000—7000 a BP 和 3500—2500 a BP 野火频率明显上升, 这可能与仰韶时期老官台文化和寺洼文化时期的古人类放火烧荒和开垦农田等活动有关; 全新世晚期 (3100 a BP 至今) 气候进一步干旱, 生物质燃烧增强与人口增加和人类土地利用水平密切相关, 其中 1500—1000 a BP 出现一次较为明显的峰值, 这可能与隋唐以来该区农耕活动加强有关。可见, 近 2000 年以来黄土高原北部地区生物质燃烧特征受到气候和人类活动复合驱动所控制。

关键词: 野火; 气候变化; 全新世; 黑碳; 炭屑

Black carbon record of Loess-paleosol profile and climate change at Heshui site during Holocene

LIAO Bing, TAN Zhihai, SNU Bin, LONG Yanxia, FAN Huichen, LIU Zhao

College of Environmental Sciences and Chemistry Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

Abstract: *Background, aim, and scope* The study site is located in the climate-sensitive regions of the semi-arid and subhumid Asian monsoon belt, which is in the southwestern part of the ecotone between Chinese traditional dry farming and nomadic pastoral practice. The region has also experienced a long and complex regional land-use history, in which slash-and-burn cultivation by means of ignited fire and deforestation for dry farming has been traced back to at least 8000 year. Meanwhile, many of the Neolithic cultures that practiced dry farming by means of ignited fire arose on the loess plateau since the Holocene, such as the Laoguantai Culture (8000—7000 a BP) and the Siwa Culture (^{14}C cal 3350—2650 a BP). In this research, the Holocene loess-paleosol

收稿日期: 2016-08-05; 录用日期: 2016-10-24

Received Date: 2016-08-05; **Accepted Date:** 2016-10-24

基金项目: 中科院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG1202); 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室开放基金

Foundation Item: Open Fund of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences (SKLLQG1202); Open Fund of Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Chinese Academy of Sciences

通信作者: 谭志海, E-mail: tonishtan@163.com

Corresponding Author: TAN Zhihai, E-mail: tonishtan@163.com

引用格式: 廖冰, 谭志海, 孙斌, 等. 2017. 甘肃合水地区全新世以来土壤剖面黑碳记录及其气候变化 [J]. 地球环境学报, 8(1): 15—24.

Citation: Liao B, Tan Z H, Sun B, et al. 2017. Black carbon record of Holocene loess sequences and climate change in Heshui Gansu Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(1): 15—24.

profiles were selected for its proximity to archaeological sites in the region. An interdisciplinary approach has been adopted to study wildfire history and its interactions with changes in monsoonal climate and human activities on the loess tableland during the Holocene. **Materials and methods** A high-resolution sedimentary charcoal and black carbon (char and soot) records from the loess soil profile in the middle of loess plateau, combined with Magnetic susceptibility, Total organic carbon (TOC) analyses, pollen counts and other paleoclimatic-proxies reveal past wildfire history and the evolution of natural ecological landscape. **Results** Black carbon (BC) preserved in accretionary loess soil profiles recorded changes in fire, which may be due to climatic variations, changes in vegetation, and human activities. EC-soot contents showed a stable rising trend since 12000 years, although a marked decline occurred in the past 100 years. EC-char contents ranges from $0.031 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $0.179 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; EC-soot contents ranges from $0.072 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $0.149 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ since 12000 years BP. More specifically, EC-char values increased gradually from the early Holocene to relatively high during 8000—7000 a BP and 3500—2500 a BP and then gradually decrease. In the MJC profile, higher values of the micro-charcoal content occur at 8000—7000 a BP and 3500—2500 a BP, and lower values occur during at 7000—4000 a BP, indicating that regional fire activity was high in the early and late Holocene, whereas fire was less frequent and pervasive in the middle Holocene. Peaks in the macro-charcoal content occur during 8000—7000 a BP and 3500—2500 a BP, suggesting that local fires were frequent during those periods. **Discussion** The results suggest that charcoal and BC influxes with peak fluctuations consistently attest to important changes in seasonal precipitation variability and mirror with the gradual climate aridity trend of the entire region during the Holocene which are be strongly controlled by global and regional climate dynamics. Meanwhile, the detail analysis of the BC and charcoal signals inconsistently were attributed to the differences in transportation mechanisms and biomass burning process at regional and local scale. Drier and colder than present the late glacial and the early Holocene climates, local and regional wildfire infrequently occurred with *Artemisia* and Gramineae-dominated desert steppe landscape at the north of loess plateau registered by lower value of EC and micro-charcoal content. Wetter and warmer than present during the mid-Holocene (8500—3100 a BP), Fire episodes largely reduced with the mixed forest and forest-steppe growth and woodland cover, However, localized wildfires in connection with human activities frequently occurred during 8000—7000 a BP. Fire seemed to be applied to vegetation clearance for land reclamation for millet cultivation in the early Neolithic Age. and the subsequent increase in fire-episode frequency during 3500—2500 a BP is consistent with cooler and drier conditions in the late Holocene and the Neolithic anthropogenic burning practices such as deforestation, land reclamation, and crop cultivation during Siwa Culture (cal 3350—2650 a BP). Therefore, land-use was shifted from arable farming to nomadic in the upper and middle reaches of the Jinghe River drainage. After 1500 a BP the amount of charcoal and black carbon sharply decreased and fire occurrence disappeared gradually because of the development to mixed agriculture of cultivation and semi animal husbandry. **Conclusions** Combining results from macro-charcoal, micro-charcoal and BC records can provide information about fire history at local, regional and broader scales. In eastern Asia, where there is a long history of relatively intensive human land-use, all types of paleofire data may be expected to reflect the importance not only of fire, but of changes in the seasonal monsoon and associated aridification during the Holocene, as well as shifts in cultivation and other human activities. **Recommendations and perspectives** We also must further explore paleofire records to disentangle the respective roles of climate, vegetation and humans in shaping fire activity the north of loess plateau, especially, the role of anthropogenic activities in present and past fire histories by charcoal and black carbon records. A broad and rigorous use of palaeoenvironmental mult-proxies will allow a better understanding of the mechanic link between fires activity, vegetation dynamics and monsoon climatic variability at hundred-millennial scales.

Key words: wildfire; climate change; Holocene; black carbon; charcoal

野火是干旱-半干旱生态系统演替过程中重要干扰因素 (Johnson, 1992)。野火发生不仅受到东亚季风所控制的季节性降雨变化的影响，而且受到生物质积累量和燃料特征的控制 (Haberle et al, 2001)。同时，全新世时期人类活动成为诱发野火活动的一个重要因素。因此研究全新世时期野火历史对人们理解人类活动、气候变化以及环境演变之间的关系具有十分重要的意义。在过去的几十年里，越来越多的研究者利用古环境替代指标来重建过去的野火事件，其中炭屑利于原地保存，能真实、客观地反映当时的气候和植被状况，在时间上可以提供几千年甚至几万年间野火活动的连续资料，在空间上可以指示本地或较小区域野火事件的发生 (Patterson et al, 1987)。与炭屑相比，环境中的黑碳 (black carbon, BC) 是生物质和化石燃料不完全燃烧形成的含碳物质连续统一体，包括焦炭 (char) 和烟炱 (soot) (Goldberg, 1985; Masiello, 2004)。黑碳可以在沉积物中存在几百万年，且在空间上可以传播数百千米，因此保存在黄土-古土壤剖面中，记录区域野火历史及其气

候变化和人类活动 (Wang et al, 2005)。目前，许多学者利用多种手段对黄土高原地区的黑碳进行深入研究并取得了一定成果 (杨英等, 2001; Wang et al, 2005; Zhou et al, 2007; Han et al, 2012)。由于样品分析方法和选取区域尺度空间差异，不同地区反演区域野火历史存在较大的差异 (Tan et al, 2015)。故对黑碳和炭屑进行高分辨率分析，并结合多项气候指标及历史文献记录，可以有效恢复区域生物质燃烧特征以及生态环境演变过程。试图系统深入地理解黄土高原全新世以来野火活动、气候演变以及人类活动之间的相互作用关系。

1 研究区域概况与剖面选取

本研究点 (图 1) 位于甘肃省合水县马家村，地处黄土高原区的北部，泾河上游的马莲河流域的黄土丘陵残塬，当地海拔高度 1400 m，年平均气温 7—10℃，年降水量约为 450—550 mm，目前为农田生态景观。采样点选在马家塬塬边陡坎，采样时将陡坎面外表厚约 10 cm 的表层除去，并按从上至下 5 cm 间距连续采样，共采集样品 50 个。

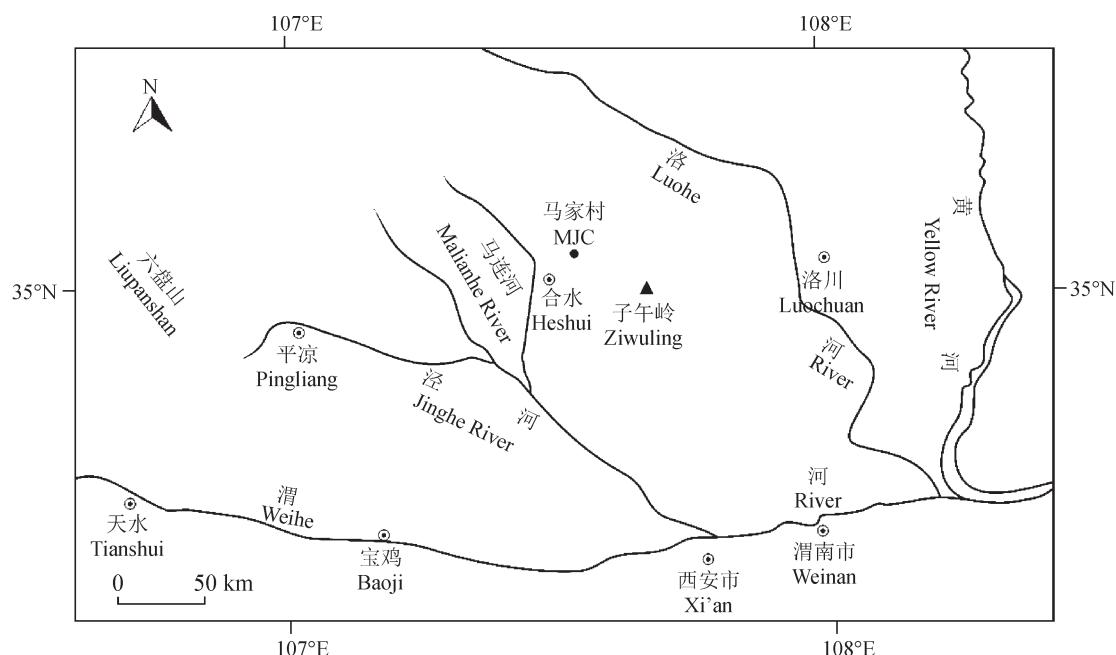


图 1 甘肃省合水县马家村 MJC 剖面采样点位置图

Fig.1 Map showing the study region in the northern part of the Loess Plateau in Heshui County, Gansu Province (The study sites are marked as MJC: Majiacun site.)

该剖面 (MJC) 通过野外观察记录并进行室内观察描述和分析，其剖面自上而下划分为：0—

40 cm 为现代表土层 (TS)；40—75 cm 为现代黄土层 (L_0)；75—175 cm 为黑垆土古土壤层 (S_0)；

175—210 cm 为黄土过渡层 (L_t) ; 210 cm 以下为典型马兰黄土 (L_1) 。其剖面特征见表 1。为避

免该剖面受当时人类活动的过多影响, 本剖面采样位置选取九站遗址区外围地区。

表 1 甘肃合水 MJY-A 和 MJC 全新世黄土 - 土壤剖面地层学和土壤学特征描述 (谭志海等, 2008)
Tab.1 Description of the paleosoil profiles at Majiayuan site (MJY-A) and Majiacun site (MJC) on the Longdong Basin loess tableland in the northern part of the Loess Plateau (Tan et al., 2008)

MJY-A 剖面 MJY-A site			MJC 剖面 MJC site		
深度 Depth /cm	地层划分 Stratigraphic division	土壤学特征描述 Pedological description	深度 Depth /cm	地层划分 Stratigraphic division	土壤学特征描述 Pedological description
0—45	表土层 Topsoil (TS)	浊橙色, 团粒结构, 含大量植物根系 Pale orange, granular structure, containing a large number of plant roots	0—40	表土层 Topsoil (TS)	浊橙色, 团粒结构, 含大量植物根系 Pale orange, granular structure, containing a large number of plant roots
45—88	全新世黄土 Holocene loess (L_0)	浊黄橙色, 粉砂质地 Pale yellow-orange, silt	40—75	全新世黄土 Holocene loess (L_0)	浊黄橙色, 粉砂质地 Pale yellow-orange silt
88—180	古土壤层 Paleosol (S_0)	浊棕色, 黑垆土, 团粒结构丰富, 有大孔隙 Pale brown, Chernozem, abundant granular structure, macroporous	75—170	古土壤层 Paleosol (S_0)	浊棕色, 黑垆土, 团粒结构丰富, 有大孔隙 Pale brown, Chernozem, abundant granular structure, macroporous
180—210	过渡层 Transition (L_t)	浊橙色, 粉砂质地, 含大量碳酸钙假菌丝体及细小的钙结核 Pale orange, silt, contains a lot of pseudomycelium with calcium carbonate	175—210	过渡层 Transition (L_t)	浊橙色, 粉砂质地, 含大量碳酸钙假菌丝体及细小的钙结核 Pale orange, silt, contains a lot of pseudomycelium with calcium carbonate
210—	马兰黄土层 Malan loess (L_1)	浊黄橙色, 粉砂质地, 含有部分钙结核 Pale yellow-orange, silt, calcium nodules-containing	210—	马兰黄土层 Malan loess (L_1)	浊黄橙色, 粉砂质地, 含有部分钙结核 Pale yellow-orange, silt, calcium nodules-containing

2 实验方法

将自然风干的样品分别进行磁化率和黑碳等项目的测定。磁化率测定实验步骤为: 称取风干样品 10 g, 用研钵研至粒径小于 2 mm 后用 Bartington-MS-B2 型磁化率仪测量其磁化率; 黑碳测定实验步骤为: 称取风干土样 5 g, 研磨至 200 目以下, 取其 0.5—0.6 g 加入 20 mL 2 M 盐酸充分反应, 静置 24 h 后离心取沉积物, 再加入 20 mL (6 M HCl/48% HF) 溶液, 静置 24 h 后离心取沉积物, 之后再加入 20 mL 2 M 盐酸, 静置 24 h 离心取其沉积物过滤制片, 采用热光反射法, 利

用 DRI Model 2001 Thermal/Optical Carbon Analyzer 碳分析仪进行碳组分的分析, 采用 IMPROVE 协议。由于黑碳不具有挥发性, 在通入纯 He 时的不同温度下, 生成 4 个有机碳组分 (OC1, OC2, OC3, OC4), 在通入 2% O₂/98% He 时不同温度下生成三个元素碳组分 (EC1, EC2, EC3), 其中定义 EC1 的前面一部分热解碳为 POC, 焦炭为 EC-char=EC1-POC, 烟炱 EC-soot=EC2+EC3 (Han et al., 2007)。

3 研究剖面年代框架的建立

根据黄土地层学原理以及剖面文化遗物与地

层之间的层位关系, 以甘肃合水马家塬 (MJY-A) 剖面的 OSL 年代控制点为参照 (Huang et al., 2004), 建立 MJC 深度与年代关系图 (见图 2)。MJY-A 和 MJC 剖面同属马家塬边缘陡坎的同个地层, 二者相距不到 500 m, 其剖面特征、质地和成壤环境相同, 而且其地层之间对应关系清晰, 均在全新世暖期阶段发育典型黑垆土层 (表 1)。根据格陵兰冰芯氧同位素记录, 目前全新世起点 (即 Younger-Dryas 终点), 日历年代为 11500 a BP (Mayewski et al., 2004)。由图 2 可知: 210 cm 为 MJY-A 和 MJC 剖面的晚更新世马兰黄土 (L_1) 与全新世早期黄土过渡层 (L_t) 的分界 (Roberts, 1992); MJY-A 和 MJC 剖面分别在 180—88 cm 和 175—75 cm 发育了典型的黑垆土全新世中期古土壤 (S_0), 其中 MJY-A 剖面层位 170—165 cm 发现新石器早期的前仰韶老官台文化遗物, 为桔红色、褐色的陶片 (8000—7000 a BP) (Hung et al., 2004), 在 MJY-A 剖面中深度 168—170 cm 的 OSL 的年代为 7470 ± 260 a BP, 故确定 170 cm 为 MJC 剖面全新世大暖期的起点, 年代为 8500 a BP; 而 MJY-A 剖面深度 88—86 cm 处发现了寺洼文化遗物 (校正的 ^{14}C 年代为 3350—2650 a BP (甘肃省博物馆, 1960; 谢瑞琚, 2002)), 此时古土壤 S_0 成壤终止, 在 MJY-A 剖面 98—100 cm 的 OSL 的年代为 3250 ± 220 a BP, 故确定 MJC 剖面 75 cm 为 3100 a BP; 在 MJY-A 剖面中深度 50—52 cm 的 OSL 的年代为 2000 ± 100 a BP, 故确定 MJC 剖面 40 cm 深度为过去 1500 年来形成的表土层 (图 2、图 3)。

4 结果与分析

黑碳对于区域火事件具有指示作用 (Wang et al., 2005)。由图 4 可知, MJC 剖面的黑碳中焦炭与烟炱浓度变化范围分别为 $0.031\text{--}0.179\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.072\text{--}0.149\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中, 焦炭浓度从末次冰期到全新世早期期间低值 ($0.052\text{--}0.11\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 逐渐增加, 分别在 8000—7000 a BP 和 1500—1000 a BP 阶段焦炭浓度达到峰值 ($0.179\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 后逐渐减少; 而烟炱浓度在末次冰期和全新世早期时低值 ($0.073\text{--}0.11\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 逐渐增加, 在 4200—4000 a BP 阶段达到峰值 ($0.149\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 而后减少。这些表明该区全新世以来气候呈现干旱化趋势 (安芷生等, 2015)。

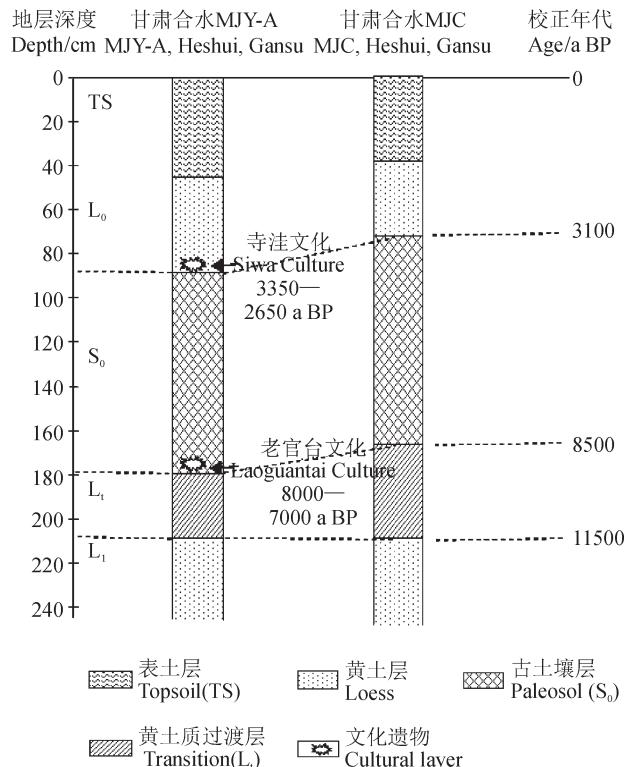


图 2 甘肃省合水县马家塬 MJY-A (谭志海等, 2008) 和 MJC 剖面的地层划分对比

Fig.2 Stratigraphic subdivision and chronology in the MJY-A (Tan et al., 2008) and MJC profiles in the Longdong Basin in the northern part of the Loess Plateau

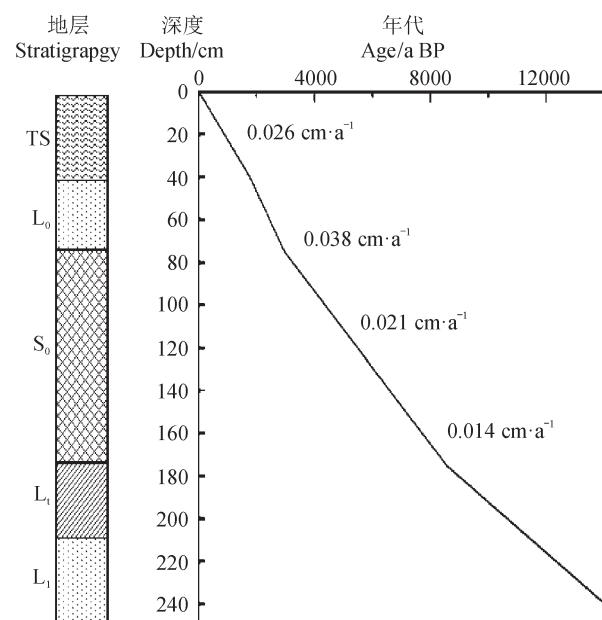
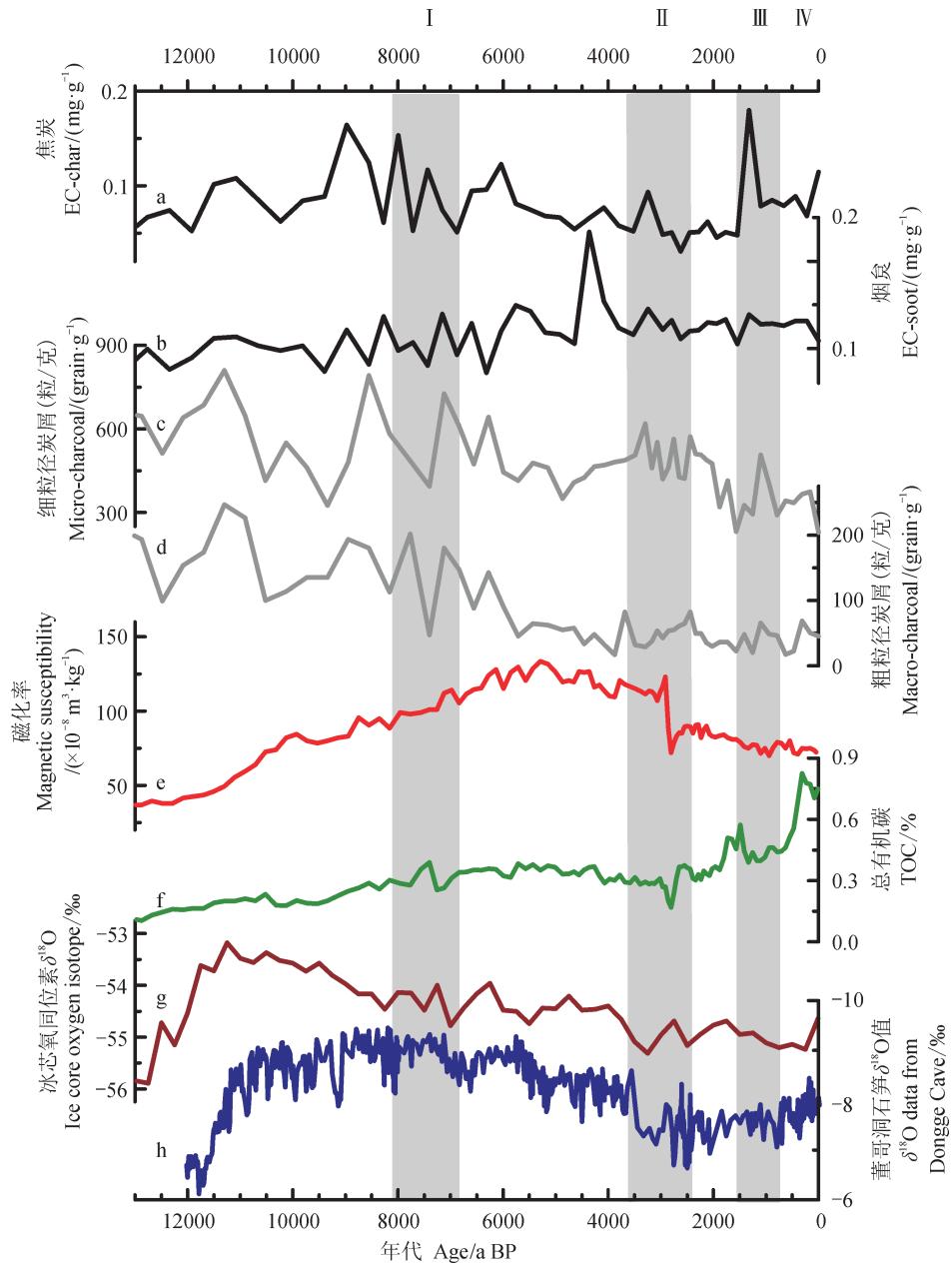


图 3 甘肃省合水县马家塬 MJC 剖面地层深度 / 年代关系
Fig.3 Pedo-stratigraphic subdivision and the age/depth curve of the MJC profile



图中罗马数字 I、II、III、IV 分别代表老官台文化 (8000—7000 a BP)、寺洼文化 (cal 3350—2650 a BP)、隋唐阶段 (1500—1000 a BP)、明清 (600 a BP—至今) 四个阶段。a: MJC 剖面的焦炭浓度; b: MJC 剖面的烟炱浓度; c: MJY-A 剖面的小于 50 μm 炭屑浓度 (Tan et al., 2008); d: MJY-A 剖面的大于 50 μm 炭屑浓度 (Tan et al., 2008); e: MJY-A 剖面的磁化率低频值 (Tan et al., 2008); f: MJY-A 剖面的总有机碳浓度 (Tan et al., 2008); g: Fuji 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 浓度 (Kawamura et al., 2007); h: 董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 浓度 (Dykoski et al., 2005)。

The Roman numerals (I, II, III and IV) indicate respectively the Laoguantai Culture (8000—7000 a BP), the Siwa Culture (cal 3350—2650 a BP), the period of Sui & Tang Dynasties (1500—1000 a BP) and the period of Ming & Qing Dynasties (600 a BP—present). a: EC-char influx values at the MJC site; b: EC-soot influx values at the MJC site; c: Micro-charcoal influx ($<50 \mu\text{m}$) at the MJY-A site (Tan et al., 2008); d: Macro-charcoal influx ($>50 \mu\text{m}$) at the MJY-A site (Tan et al., 2008); e: Low-frequency of magnetic susceptibility data at the MJY-A site (Tan et al., 2008); f: Value of total organic carbon(TOC) data at the MJY-A site (Tan et al., 2008); g: $\delta^{18}\text{O}$ data from the Dome Fuji Ice core (Kawamura et al., 2007) indicating the change of temperature in the northern hemisphere; h: $\delta^{18}\text{O}$ data from Dongge Cave (Dykoski et al, 2005) indicating regional moisture variations.

图 4 MJC 剖面距今 12 ka BP 以来黑炭和炭屑浓度与其他气候指标对比

Fig.4 Comparison of various proxies in the northern part of the Loess Plateau with other records during the last 12 ka

炭屑被称为野火活动直接记录,其浓度大小表示地质时期野火活动频率、强度变化(张建平和吕厚远,2006),从MJY-A剖面炭屑浓度分析结果来看(谭志海等,2008)(图4):细粒炭屑($<50\text{ }\mu\text{m}$)浓度在200—800粒/克变化,这指示区域范围内野火发生特征;而粗粒炭屑($>50\text{ }\mu\text{m}$)浓度在4—80粒/克变化,表示本地野火发生特征。从炭屑浓度变化趋势上看,最高值出现全新世早期和晚期,而低值出现在全新世中期。总有机碳(TOC)含量变化可以指示黄土堆积时期生物成壤的强度变化。

5 讨论

5.1 黑碳和炭屑反映区域生物质燃烧的特征

末次冰期和全新世早期期间,孢粉记录表明此阶段花粉浓度很低,以蒿属(*Artemisia*)、禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)等草本植物为主(Jiang and Ding, 2005)。所研究剖面中磁化率低值、总有机碳低值和石笋氧同位素偏负值,这些记录表明该区域气候寒冷而干燥,呈现荒漠草原景观(Jiang and Ding, 2005)。MJC剖面中焦炭和炭屑浓度明显峰值表明此阶段区域野火发生十分有限,而其中在12000—11000 a BP明显的高峰值表明此阶段野火事件发生。此时正好遇到格陵兰GISP 2冰芯深海氧同位素所记录的Younger-Dryas事件(YD, 11700 a BP)(王有清和姚檀栋,2002),导致其燃料干燥易燃,促使火灾事件发生。尽管此阶段该区干旱气候条件为区域野火发生提供动力,而该区荒漠草原有限的生物量却限制区域野火发生和蔓延。由于此阶段植被主要是草本植物,草本植物燃料具有易燃而燃点温度较低的特性,因此该阶段易产生较高浓度的炭屑,而焦炭、烟炱浓度相对较低,这可能是物质传输过程和燃烧排放方式差异的缘故(Tan et al, 2015)。

全新世中期,较高的磁化率和总有机碳值、石笋氧同位素(偏负)等一系列指标记录表明,该区此阶段由于正处于全新世适宜期,生物风化成壤作用强烈,气候特征为温湿(图4)。孢粉记录表明此阶段随着气温逐渐升高,榛属(*Corylus*)、栎属(*Querus*)等木本花粉明显增多,此阶段整个区域是体现气候温暖湿润特征的森林-草原景观(Jiang and Ding, 2005)。随着本区域温度和季

节性降雨增强,木本植被组成逐渐上升,大大抑制野火频率发生和蔓延,从而黑碳与炭屑浓度均呈明显下降趋势。然而6000—5000 a BP,较高浓度的细颗粒炭屑和焦炭峰值表明,此阶段区域野火事件发生与区域快速气候变化所导致的季节性降水减少有关。由于此阶段木本植物燃点较高,其燃烧后排放大量焦炭和烟炱颗粒物(Tan et al, 2015)。而8000—7000 a BP和3500—2500 a BP阶段,较高浓度的粗颗粒炭屑峰值变化可能与古人类局地放火烧荒等农耕活动加强有关(谭志海等,2008)。全新世晚期,所研究剖面的磁化率和石笋氧同位素等气候指标表明,此阶段进入全新世以来相对干旱阶段,生物成壤作用迅速减弱(图4)。焦炭和粗颗粒炭屑浓度峰值变化表明,1500—1000 a BP区域生物质燃烧呈增加趋势,此时正与格陵兰深海氧同位素(偏负)和董哥洞石笋氧同位素(偏正)所记录的“中世纪暖期”具有良好一致性(Zhou et al, 2011)。湖泊沉积、石笋以及历史文献记录此阶段我国北方处于气候较为温暖的隋唐时期(589—907 AD)(庆阳县志编纂委员会,1993),而此时,文献记录表明,唐朝初年曾大量移民至庆阳地区垦荒戍边(王守春,1992),因此炭屑和黑碳出现高值可能与当时大量移民利用火进行围垦造田有关。与此相反,黑碳和炭屑浓度变化表明,距今600年以来(明清阶段)该区整体上生物质燃烧呈明显下降趋势。深海氧同位素低值和石笋氧同位素低值表明此阶段正处于气候较为冷干的小冰期阶段(1300—1900 AD)(Chen et al, 2015),历史文献和人类土地利用数据表明此阶段该区灌溉干旱作业已建立(谭志海等,2010),因而不会大规模放火烧荒,从而使得黑碳和炭屑的浓度降低。可见,近2000年黄土高原北部生物质燃烧特征受到气候和人类活动复合驱动力所控制。

5.2 火灾事件与人类土地利用关联

本研究区域地处受东亚季风影响的干旱-半干旱的敏感地带,是全球气候变化最敏感地区之一,它也是中国传统旱作农业区域与游牧畜牧业区域交错带的西南段,其野火景观变化极易受到全球气候变化和历史上人类土地利用活动的干扰。该区域经历一个漫长而复杂的区域土地利用史,其中野火作为新石器人类刀耕火种、围垦造田发展旱作农业的重要工具至少可以追溯到距今

8000年。全新世气候适宜期。此阶段气候温暖而湿润，生物成壤作用强烈，在森林-草原环境下发育典型黑垆土（Jiang and Ding, 2005）。高浓度粗颗粒炭屑和焦炭峰值表明本地野火事件频繁发生。在 MJY-A 剖面层位 170—165 cm 发现大小为 1—2 cm 桔红色、褐色的老官台文化时期陶片若干（8000—7000 a BP）（谭志海等, 2008）。考古记录表明此时期以老官台文化为代表的早期仰韶文化在渭河流域发展迅速。该区肥沃黑垆土和东南海洋性季风带来大量降水是新石器旱作农业发展的必要条件（Huang et al, 2009），从而该区以种植粟类作物为主，旱作农业初具规模。因此该阶段高浓度的粗颗粒炭屑和焦炭峰值很可能是人类大范围刀耕火种和开垦土地等农耕活动的结果（甘肃省博物馆, 1960；庆阳县志编纂委员会, 1993）。可见，该区域野火景观变化长期受到季节性气候变化与人类活动时空分布变化共同作用。

在 3500—2500 a BP 阶段，MJC 剖面炭屑出现较高浓度，表明此时地方火事件明显增加。此时在 MJY-A 剖面，现代黄土层 L₀ 的底部 86—88 cm 处发现了寺洼文化陶片若干（校正的 ¹⁴C 年代为 3350—2650 a BP）。自青铜器时代（距今 3100 年）以来，由于东亚季风减弱造成气候向干旱化转变，黄土高原台塬地区严重干旱，加之人类焚林开荒等活动加剧，使得土地资源严重退化，致使该区以种植粟类的原始农业解体，被游牧类型的寺洼文化所取代（谭志海等, 2008）。

在 1500—1000 a BP 阶段，焦炭和炭屑值均出现较高浓度峰值，此时正处于气候特征较为温暖的“中世纪暖期”（Zhou et al, 2011），历史文献表明，由于气候温暖适宜，随着隋唐时期数次移民迁入此地，农耕区再次得到大规模开发和扩大，使得耕作北界进一步向北推移到宁县、庆阳一带以北地区（何凡能等, 2010）。由于此阶段人类放火毁林和开垦土地、发展谷物种植业等活动的加强，加之全新世晚期气候进一步干旱，使得本地土地侵蚀-堆积过程中区域所带来的外来物质增加，从而造成磁化率出现较低值；而此阶段 TOC 值明显增加，则是耕作过程中燃烧残留的植物根系及枯枝落叶被分解的结果。相比之下，黄土高原南部地区剖面炭屑的浓度大幅度减少（谭志海等, 2010）。黄土高原北部与南部地

区黑碳与炭屑浓度变化的时空差异，说明了野火发生频率以及生态环境变化与人类土地利用时空分布密切相关（许清海等, 2002）。而距今 600 年以来（明清阶段），炭屑和黑碳有所减少，野火发生频率大大降低。这可能由于黄土高原北部台塬地区耕地面积已经开垦殆尽，其梯田耕作方式为特征的旱作农业景观已建立，因而不会大规模放火烧荒。但近百年来黑碳含量的增长可能和人类大规模生物质燃烧有关。黑碳和炭屑浓度的变化不仅记录研究所在区域的全新世以来野火历史演变过程，同时也反映了人类土地利用和社会文化及其对季风气候变化的响应（Tan et al, 2015）。

6 结论

本研究选取黄土高原陇东地区北部典型的全新世黄土-土壤剖面，对黄土-古土壤高分辨率炭屑及黑碳进行研究，结果表明：（1）末次冰期和全新世早期（11500—8500 a BP）气候寒冷而干旱，局地野火事件偶尔发生，植被生物量是此阶段野火发生与蔓延的限制因素；（2）8000—7000 a BP 和 3500—2500 a BP 阶段，野火频率明显上升，这可能与仰韶时期老官台文化和寺洼文化时期的古人类放火烧荒和开垦农田等活动有关，因此在全新世中期，人类活动开始成为影响火灾发生的重要因子；（3）全新世晚期（3100 a BP 至今）气候进一步干旱，黑碳和炭屑浓度呈现波动增加趋势，其中距今 1500—1000 年出现一次较为明显的峰值，这是隋唐以来黄土高原北部地区农耕大发展所致。近 2000 年来的该区生物质燃烧特征受到气候和人类活动复合驱动所控制。

参考文献

- 安芷生, 吴国雄, 李建平, 等. 2015. 全球季风动力学与气候变化 [J]. 地球环境学报, 6(6): 341—381. [An Z S, Wu G X, Li J P, et al. 2015. Global monsoon dynamics and climate change [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(6): 341—381.]
- 甘肃省博物馆. 1960. 甘肃古文化遗存 [J]. 考古学报, 2: 11—51. [Gansu Museum. 1960. The ancient culture remains of Gansu [J]. *Journal of Archaeology*, 2: 11—51.]
- 何凡能, 李科, 刘浩龙. 2010. 历史时期气候变化对中国古代农业影响的研究若干进展 [J]. 地理研究, 29(12): 2189—2197. [He F N, Li K, Liu H L. 2010. The influence

- of historical climate change on agriculture in ancient China [J]. *Geographical Research*, 29(12): 2189–2197.]
- 庆阳县志编纂委员会. 1993. 庆阳县志 [M]. 兰州: 甘肃人民出版社. [Qingyang County Compilation Committee. 1993. *Qingyang County* [M]. Lanzhou: Gansu People's Publishing House.]
- 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 2008. 陇东黄土高原北部全新世野火历史的木炭屑记录 [J]. *第四纪研究*, 33(4): 733–739. [Tan Z H, Huang C C, Pang J L, et al. 2008. Charcoal recorded Holocene fire history in the northern part of the Longdong Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 33(4): 733–739.]
- 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 2010. 渭河流域全新世土壤剖面木炭屑记录及其古环境意义 [J]. *中国生态农业学报*, 18(1): 25–30. [Tan Z H, Huang C C, Pang J L, et al. 2010. Charcoal records of Holocene loess-soil sequences and its palaeoenvironmental significance in Weihe River Drainage [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18(1): 25–30.]
- 王守春. 1992. 河西走廊及其邻近地区历史时期人文变化和环境变化序列 [M]// 尹泽生, 杨逸畴, 王守春. 西北干旱地区全新世环境变迁与人类文明兴衰. 北京: 地质出版社: 64–82. [Wang S C. 1992. Humanities sequence changes and environmental changes in the Hexi Corridor and adjacent areas [M]// Yin Z S, Yang Y C, Wang S C. Holocene environmental change and the rise and fall of human civilization in arid area of Northwest China. Beijing: Geological Publishing House: 64–82.]
- 王有清, 姚檀栋. 2002. 冰芯记录中末次间冰期冰期旋回气候突变事件的研究进展 [J]. *冰川冻土*, 24(5): 550–559. [Wang Y Q, Yao T D. 2002. Progresses in the studies of abrupt climatic change events recorded in ice cores during the Last Glacial-Interglacial Cycle [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(5): 550–559.]
- 谢瑞琨. 2002. 青海省和甘肃省的原始社会考古 [M]. 北京: 文化遗物出版社: 11–258. [Xie R J. 2002. Pre-historical archaeology in Gansu and Qinghai provinces [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House: 11–258.]
- 许清海, 孔昭宸, 陈旭东, 等. 2002. 鄂尔多斯东部4000余年来的环境与人地关系的初步探讨 [J]. *第四纪研究*, 22(2): 105–112. [Xu Q H, Kong Z C, Chen X D, et al. 2002. Discussion on the environment changes and the effects of human impacts in the east Ordos Plateau since 4000 a BP [J]. *Quaternary Sciences*, 22(2): 105–112.]
- 杨英, 沈承德, 易惟熙, 等. 2001. 21 ka以来渭南黄土剖面的元素碳的记录 [J]. *科学通报*, 46(8): 688–698. [Yang Y, Shen C D, Yi W X, et al. 2001. Elemental carbon record of loess plateau in Weinan since 21 ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(8): 688–698.]
- 张健平, 吕厚远. 2006. 现代植物炭屑形态的初步分析及其古环境意义 [J]. *第四纪研究*, 26(5): 857–863. [Zhang J P, Lü H Y. 2006. Preliminary study of Charcoal morphology and its Environmental significance [J]. *Quaternary Science*, 26(5): 857–863.]
- Chen J H, Chen F H, Feng S, et al. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms [J]. *Quaternary Science Reviews*, 107: 98–111.
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 233: 71–86.
- Goldberg E D. 1985. Black carbon in the environment [M]. New York: John Wiley and Sons.
- Haberle S G, Hope G S, Kaars S V. 2001. Biomass burning in Indonesia and Papua New Guinea: Natural and human induced fire events in the fossil record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 171(3): 259–268.
- Han Y M, Cao J J, Chow J C, et al. 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between EC-char and EC-soot [J]. *Chemosphere*, 69: 569–574.
- Han Y M, Manrlon J R, Cao J J, et al. 2012. Holocene linkages between char, soot, biomass burning and climate from Lake Daihai, China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB4017. DOI:10.1029/2011GB004197.
- Huang C C, Pang J L, Su H X, et al. 2009. The Ustic Isohumisol(Chernozem) distributed over the Chinese Loess Plateau: Modern soil or palaeosol [J]. *Geoderma*, 150(3/4): 344–358.
- Huang C C, Pang J L, Zhou Q Y, et al. 2004. Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese loess plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(23/24): 2525–2535.

- Jiang H C, Ding Z L. 2005. Temporal and spatial changes of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau through the last glacial cycle: Evidence from spore-pollen records [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 133(1/2): 23–37.
- Johnson E A. 1992. Fire and vegetation dynamics: Studies from the North American boreal forest [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 5–41.
- Kawamura K, Parrenin F, Lisiecki L, et al. 2007. Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years [J]. *Nature*, 448: 912–916.
- Masiello C A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry [J]. *Marine Chemistry*, 92(1/2/3/4): 201–213.
- Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, et al. 2004. Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 62(3): 243–255.
- Patterson W A, Edwards K J, Maguire D J. 1987. Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire [J]. *Quaternary Science Reviews*, 6: 3–23.
- Roberts N. 1992. The Holocene: An environmental history(Paperback) [M]. Oxford: Black-well: 1–315.
- Tan Z H, Han Y M, Cao J J, et al. 2015. Holocene wildfire history and human activity from high-resolution charcoal and elemental black carbon records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 109: 76–87.
- Wang X, Peng P A, Ding Z L. 2005. Black carbon records in Chinese Loess Plateau over the last two glacial cycles and implications for paleofires [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 223(1/2): 9–19.
- Zhou B, Shen C D, Sun W D, et al. 2007. Elemental carbon record of paleofire history on the Chinese Loess Plateau during the last 420 ka and its response to environmental and climate changes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252: 617–625.
- Zhou X J, Zhao P, Liu G, et al. 2011. Characteristics of decadal-centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the present day [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56: 4651–4653.