



临汾盆地晚冰期至中全新世黄土-古土壤序列的风化特征及指示的气候意义

石天宇, 张样洋, 翟秋敏, 李洪彬, 刘畅, 周学文, 陈鹏, 陈亮

Characteristics of weathering of the loess-paleosol sequences in the Late Glacial Period to Middle Holocene in Linfen Basin and implication for climatic significance

SHI Tianyu, ZHANG Yangyang, ZHAI Qiumin, LI Hongbin, LIU Chang, ZHOU Xuwen, CHEN Peng, and CHEN Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

石天宇, 张样洋, 翟秋敏, 等. 临汾盆地晚冰期至中全新世黄土-古土壤序列的风化特征及指示的气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 181-191.

SHI Tianyu, ZHANG Yangyang, ZHAI Qiumin, et al. Characteristics of weathering of the loess-paleosol sequences in the Late Glacial Period to Middle Holocene in Linfen Basin and implication for climatic significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 181-191.

临汾盆地晚冰期至中全新世黄土-古土壤序列的风化特征及指示的气候意义

石天宇^{1,2}, 张样洋^{1,2}, 翟秋敏^{1,2}, 李洪彬^{1,2}, 刘畅^{1,2}, 周学文^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 陈亮^{1,2}

1. 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

2. 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 开封 475004

摘要: 了解中国北方晚冰期和全新世时期的气候环境变化及其驱动机制, 有助于预测未来气候变化的可能情景。基于黄土高原东南缘临汾盆地的黄土-古土壤剖面, 在 3 个 AMS¹⁴C 年代的支持下, 通过粒度、磁化率、土壤有机碳以及地球化学元素等指标, 重建了临汾盆地晚冰期至中全新世晚期的气候变化历史。结果表明: 宋村沟剖面的黄土和古土壤分别处于初等和中等化学风化阶段, 而不同地区风成堆积物的化学风化强度存在明显差异, 主要受控于东亚夏季风的区域变化。多指标综合分析表明, 晚冰期以来临汾盆地的气候演变经历了 4 个阶段: 晚冰期东亚冬季风较强, 气候干冷; 早全新世东亚夏季风强化, 气候向暖湿转变; 早中全新世东亚夏季风达到峰值, 为最暖湿的适宜期; 中全新世晚期东亚夏季风减弱, 气候再次转向干冷; 临汾盆地的气候变化主要受控于北半球太阳辐射强度和冰量的变化。

关键词: 黄土; 晚冰期; 全新世; 东亚季风; 气候变化

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070501

Characteristics of weathering of the loess-paleosol sequences in the Late Glacial Period to Middle Holocene in Linfen Basin and implication for climatic significance

SHI Tianyu^{1,2}, ZHANG Yangyang^{1,2}, ZHAI Qiumin^{1,2}, LI Hongbin^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, ZHOU Xuewen^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}

1. College of Geography and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China

2. The Key Laboratory of Earth System Observation and Simulation of Henan Province, Kaifeng 475004, China

Abstract: Exploring the climate and environmental changes and the driving mechanisms during the Late Glacial and Holocene in the northern China is vital to predicting the possible scenarios of future climate change. Based on the loess-paleosol profile of Linfen Basin in the southeastern margin of the Loess Plateau, we analyzed three AMS¹⁴C dates, grain size, magnetic susceptibility, soil organic carbon, and geochemical elements, and reconstructed the climate change history of Linfen Basin from the Late Glacial Period to the middle and late Holocene. Results show that the loess and paleosol of the Songcungou section are in the early and middle chemical weathering stages, respectively. The chemical weathering intensity of aeolian deposits in different areas was obviously different, which is mainly controlled by regional variation of the East Asian Summer Monsoon (EASM) intensity. Comprehensive analysis of multiple indicators shows that climate evolution of the Linfen Basin has experienced four stages since the Late Glacial Period. (I) In the Late Glacial Period, the East Asian Winter Monsoon (EAWM) was strong, and the climate was dry and cold. (II) In the early Holocene, EASM was intensified and the climate became warm and humid. (III) In the early Middle Holocene, EASM reached its peak, and the climate was warmest and wettest. (IV) In the late Middle Holocene, EASM weakened and the climate turned dry and cold again. The climate change in the Linfen Basin was mainly controlled by the changes of solar radiation intensity and ice volume in the Northern Hemisphere.

Key words: loess; Late Glacial Period; Holocene; East Asian monsoon; climate change

资助项目: 国家重点研发项目“中华文明探源研究”子课题“中华文明起源进程中的古环境和人地关系研究”(2020YFC1521605); 国家自然科学基金“近 2 万年来豫西黄土堆积揭示的植被演替、气候变化与古人类活动”(41701231)

作者简介: 石天宇(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事气候与环境变化研究, E-mail: 18736087514@163.com

通讯作者: 翟秋敏(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事自然地理学与第四纪环境学研究, E-mail: 13683781169@163.com

收稿日期: 2022-07-05; 改回日期: 2022-08-18. 文凤英编辑

黄土高原沉积的“黄土-古土壤序列”，因其沉积厚、连续性强、分布范围广等特点成为记录第四纪环境演变的主要档案，特别是黄土-古土壤序列已被证明能指示晚渐新世以来的东亚季风强度^[1-4]。临汾盆地处于黄土高原东南缘，沉积了良好的第四纪黄土-古土壤剖面，是研究中国大陆第四纪环境演化的理想场所。

国内对临汾盆地最早的研究起始于 20 世纪 90 年代，学者基于地貌学和沉积学证据，在冰期-间冰期尺度上重建了更新世以来的古地理环境变迁^[5]，认为临汾盆地的每个干湿期均可与深海沉积物所揭示的古气候旋回对比。21 世纪以来，随着测年技术的提高和代用指标的丰富，人们开展了一系列高分辨率沉积记录研究，在重建气候环境演变方面，主要集中在不同时间尺度上的干湿分期。短时间尺度上，将临汾盆地全新世气候划分为回暖-暖湿-转凉-干凉^[6]。轨道时间尺度上，田庆春等^[7]的研究显示末次间冰期以来临汾盆地的气候演化阶段可与 MIS3—MIS5(深海氧同位素阶段 3—5) 对应，胡小猛等^[8]发现临汾盆地末次冰期存在可与北大西洋地区的 H1—H6 事件 (Heinrich 事件) 和 D-O 旋回 (即 Dansgaard-Oeschger) 旋回对应的气候冷暖变化事件。

尽管前人在临汾盆地及其周边地区开展了大量工作，但受研究材料和技术手段限制，早期研究缺乏年代控制，且样品分辨率低，因此该区域晚冰期以来的气候变化及其驱动机制的研究仍然有限。鉴于此，本文通过对临汾地区晚冰期以来的黄土-古土壤序列——宋村沟剖面进行加密取样，结合 AMS¹⁴C 年代和粒度、磁化率、土壤有机碳含量以及地球化学元素资料，分析宋村沟剖面黄土-古土壤序列的化学风化强度，探索临汾盆地晚冰期以来的气候演变及其可能的驱动机制。

1 区域概况

临汾盆地处于黄土高原东南缘，盆地宽 20~25 km，长 200 km。地貌类型以平原、山地为主。临

汾盆地处于半湿润地带，属温带大陆性季风气候，年均气温为 12~14℃，年均降水量 500~650 mm，逐年降水不均，变率较大。

宋村沟剖面 (35°53'N、111°29'E，海拔 539 m) 位于山西省临汾市襄汾县 (图 1)，出露于陶寺遗址西城墙外宋村沟的沟坡上。由于地表至剖面 150 cm 处受到农业耕作和植被根系的影响，因此从剖面 150 cm 处开始采集样品。整个剖面序列以 1 cm 间距连续采集 355 个样品，并采集了 3 个全样有机质 AMS¹⁴C 测年样品。根据野外考察、土壤分类和沉积特点将宋村沟剖面自上而下分为 4 层 (图 2)：Ⅰ层，150~250 cm，为疏松多孔的浅黄色粉砂，有少量砾石，其中 237~250 cm 为略呈叠瓦状的砾石层 (砾石直径为 0.5~2.5 cm)；Ⅱ层，251~350 cm，为红棕色黏土质粉砂；Ⅲ层，351~384 cm，为黄色粉砂；Ⅳ层，385~505 cm，为疏松的棕黄色粉砂，其中 443~447 cm 为叠瓦状砾石层 (砾石直径约 5 cm)。根据野外实地考察和李拓宇等^[6]的研究，宋村沟剖面存在的砾石层是由极端气候事件引发的洪水在冲积作用下形成的，洪水事件还造成剖面 237~250 cm 处出现了短时期断层。

2 样品与方法

在美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测年，并使用 BetaCal 3.21 程序和 IntCal13 校准曲线进行年龄校正^[9-10] (表 1)。为了确保年代序列的可靠性，在 Bacon 程序中进行年代-深度建模^[11] (图 2)，红色标志表示年代概率密度，灰色阴影表示年龄深度建模估计的 95% 置信区间。Bacon 年龄-深度模型不受异常值影响，是一种稳定和准确的年代计算方法。

常量地球化学元素实验在河南大学地理与环境学院环境变化与水土污染防治实验室完成，实验过程包括：将样品烘干研磨，取 5 g 样品和适量硼酸混合压片，然后利用 Bruker 公司生产的波长色散 X 射线荧光光谱仪测定常量地球化学元素含量；实验中加入标样 (GSS-8) 校正，测量精度大于 95%。

沉积物粒度实验：用 10% 浓度的 H₂O₂ 去除有

表 1 宋村沟剖面年代记录
Table 1 Age dating records of the Songcungou section

序号	实验室编号	深度/cm	材料	¹⁴ C 年龄/ aBP	校正年龄中值/cal.aBP
1	Beta-625760	260	有机沉积物	5 960±30	6 785
2	Beta-625761	350	有机沉积物	9 350±30	10 550
3	Beta-625762	490	有机沉积物	12 500±40	14 503

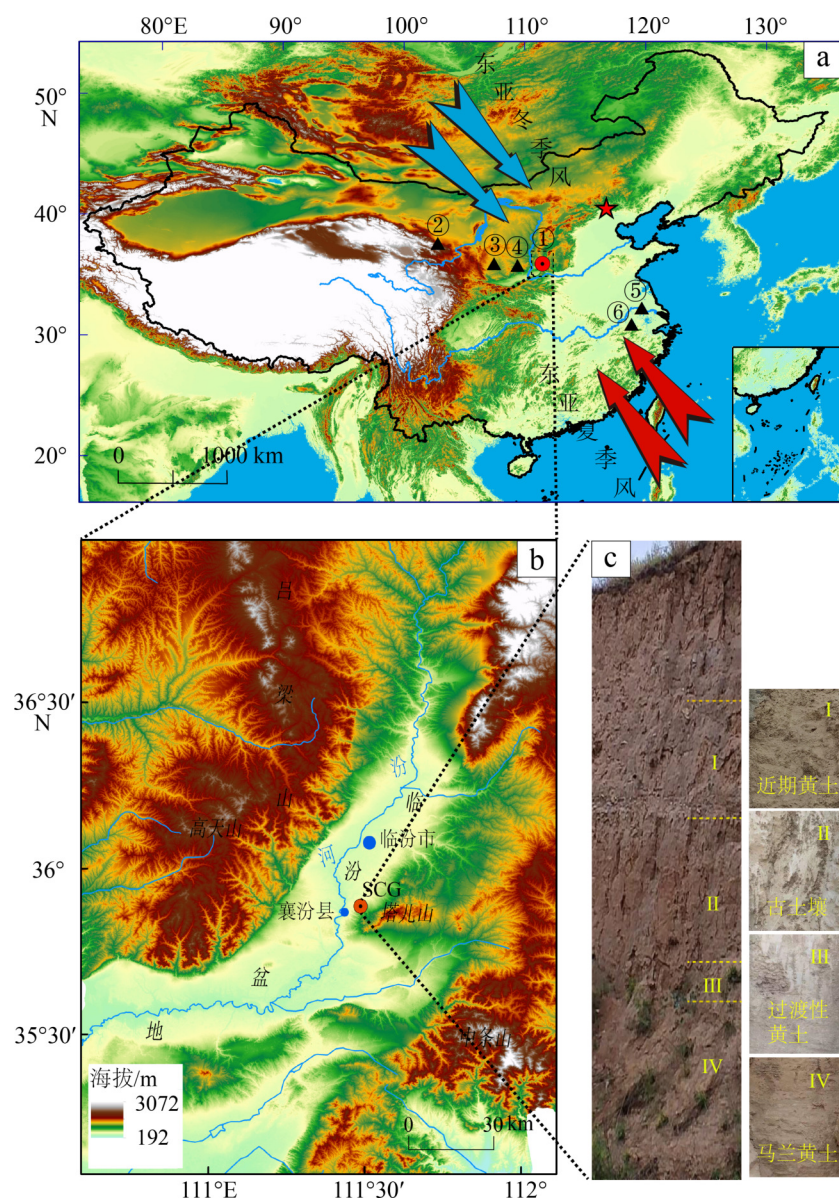


图 1 研究区概况图

a. ①宋村沟剖面(即 SCG), ②武威剖面, ③西峰剖面, ④洛川剖面, ⑤下蜀剖面, ⑥宣城剖面; b. 临汾盆地地形图;
c. 野外剖面图(左)、地层单元图(右)。

Fig.1 Overview and field section distribution of the study area

a: ① Songcungou (SCG) section, ② Wuwei section, ③ Xifeng section, ④ Luochuan section, ⑤ Xiashu section, ⑥ Xuancheng section; b: topographic in Linfen Basin; c: a representative field section (left) and the stratigraphic division (right).

机物, 10% 浓度的 HCl 去除碳酸盐, 以浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠溶液为分散剂, 使用 Mastersizer-3000 激光粒度分析仪进行上机测试。土壤有机碳含量 OC% 的测定过程主要包括: 剔除动植物残体, 加入 10% 的 HCl 溶液去除碳酸盐并反复冲洗至中性, 烘干暂存, 使用 MAT 253 气体质谱仪(静态氧化灼烧法)测量制备好的 CO₂ 气体, 并通过穿插标样避免测量误差。磁化率由 Bartington MS2 型磁力仪测定, 其中高频为 4.7 kHz, 低频为 0.47 kHz。以上实验均在河南大学地理与环境学院

气候与环境变化实验室完成。

3 结果与分析

3.1 粒度分布

粒度分布是反映沉积物物源、迁移和古气候变化信息的重要指标^[12]。宋村沟剖面地层单元 IV 和 I 的粒度频率分布曲线的主峰值位置大致在 $5\Phi(\Phi = -\log 2d, d \text{ 为粒度直径, 单位 mm})$ (图 3), 呈左

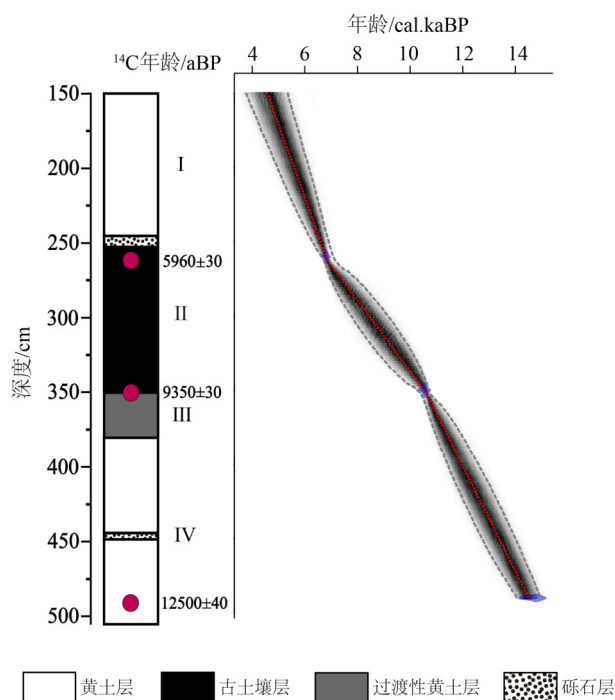


图2 Bacon 年龄-深度模型

Fig.2 The Bacon age-depth model

偏的双峰结构,次峰不明显,判断 I、IV 单元粉尘堆积以粗粉砂为主,地层单元 I 为近期沉积黄土,地层单元 IV 为马兰黄土。地层单元 II 的粒度频率分布曲线峰值位置在 $7\sim 8\Phi$ 之间,呈右偏的双峰结构,该地层黏土含量较高,为黏土质粉砂的古土壤层;地层单元 III 与 I、IV 单元相比,频率分布曲线在 5Φ 左右的峰值较小,在 $7\sim 8\Phi$ 之间次峰值更大,表明该层黏土含量增加,为马兰黄土向古土壤转变的过渡性黄土。刘东生^[1]认为典型风成黄土的基本粒组是粗粉砂级组分,次之为黏粒级组分。宋村沟剖面以粉砂为主,其中黏粒质粉砂和砂质粉砂的含量较少,指示其风成成因特征。粗粉砂与黏土比值(即 Kd)可以反映季风强度和成壤作用的变化^[1,13]。由 Kd 曲线(图 4)可以看出,东亚冬季风在地层单元

I、IV 堆积时期较强,风化和成壤作用较弱,冬季风在地层单元 III 逐渐减弱,并在地层单元 II 时期衰减至最小,风化和成壤作用达到最强阶段。

3.2 磁化率和土壤有机碳含量

磁化率记录了黄土沉积物中铁磁性矿物的含量^[14],可以直接反映风化和成土强度,也可以作为半湿润地区气候变化的替代指标^[15-16]。土壤有机碳含量取决于沉积成壤过程中的生物量和生物活动强度,能够指示成壤期的古气候条件^[17]。SCG 剖面第四层马兰黄土磁化率值和有机碳含量最低(图 4),其中高频磁化率(χ_{hf})和低频磁化率(χ_{lf})的均值分别为 64.85×10^{-8} 、 $69.83\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,有机碳含量均值为 0.12%。III 层过渡性黄土的磁化率值和有机碳含量均有所增加,表明气候转好。磁化率值和有机碳含量在 II 层古土壤达到最高值, χ_{hf} 和 χ_{lf} 的均值分别为 163.58×10^{-8} 、 $180.89\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,有机碳含量均值为 0.19%,表明气候适宜期铁磁性矿物富集程度高,生物活动强烈。I 层黄土的 χ_{hf} 和 χ_{lf} 的均值分别为 78.85×10^{-8} 、 $85.74\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,有机碳含量均值为 0.19%,气候处于相对干燥凉爽、风化和成壤作用较弱的时期。

3.3 元素地球化学分布特征

宋村沟剖面黄土-古土壤序列剖面沉积物中,主要成分是石英(SiO_2),平均含量为 61.92%(变化范围为 53.52%~66.58%),其次为 Al_2O_3 ,平均含量为 12.51%(变化范围为 10.18%~15.19%), CaO 占 6.52%(1.03%~14.08%),三者的平均含量之和为 80.95%。此外, Fe_2O_3 占 4.55%(3.9%~5.73%), K_2O 占 2.48%(2.13%~3.06%), MgO 占 1.99%(1.67%~2.27%), Na_2O 占 1.36%(1.18%~1.61%),剖面元素平均含量由高到低为: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O}$,与 GSS-8(土壤成分分析标准物质-黄

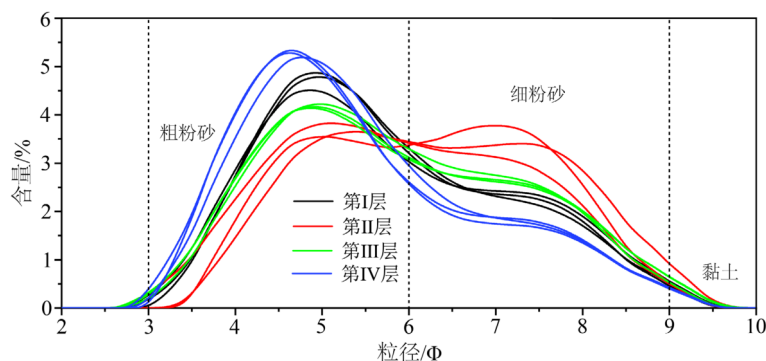


图3 宋村沟剖面粒度频率分布曲线

Fig.3 Grain-size frequency distribution curves of the Songcungou section

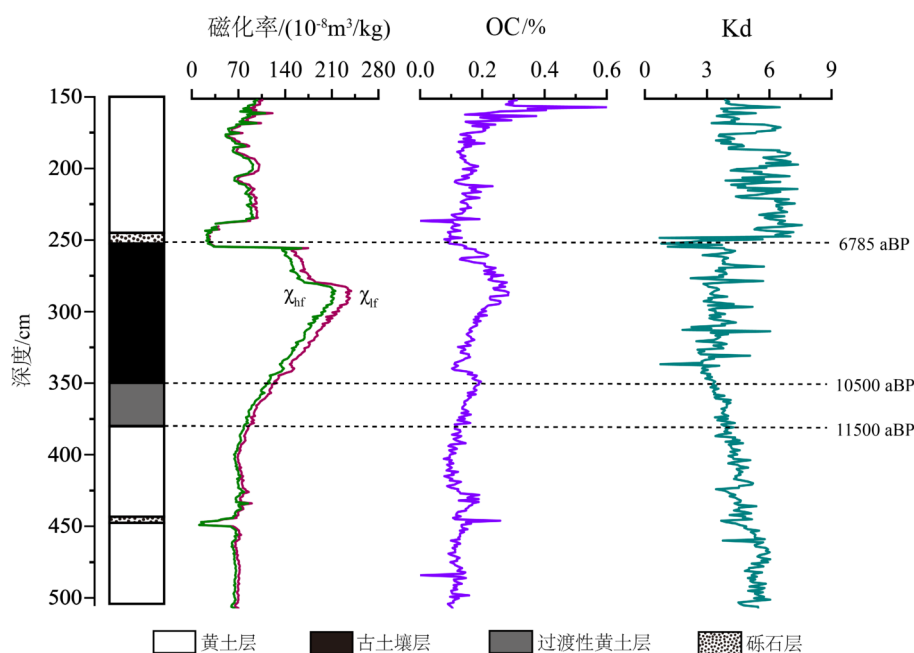


图 4 宋村沟剖面磁化率、OC (土壤有机碳含量) 及 Kd (粗粉砂与黏土比值) 曲线

Fig.4 Profiles of magnetic susceptibility, OC (soil organic carbon content), and Kd (coarse silt/clay) of the Songcungou section

土) 常量元素含量排序一致, 表明宋村沟黄土为风成堆积物 (图 5)。此外, 变异系数 (CV) 可以反映各地层时期化学元素因风化淋溶而呈现的离散程度 (表 2), 除 CaO 以外, 整个剖面各元素变异系数均较小 (0.02%~0.08%), 表明该黄土-古土壤序列的元素成分相似、组成特征均一, 具有风成沉积物的典型特征。

SiO₂ 和 CaO 呈十分显著的负相关, 这与同区域的中梁铁厂剖面反映的情况一致^[6]。一般来讲, 古土壤层中 SiO₂ 含量较高, CaO 含量较低, 黄土层则

相反^[18]。Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O₃ 含量变化基本一致, 且均在古土壤时期含量最高, 这是风化淋溶较强及次生黏土矿物堆积的结果; Na、Ca 元素相对活跃, 在暖湿条件下容易发生淋溶迁移, 相对稳定的 Al、Fe 等元素含量相对增加; 相比之下 MgO 曲线保持稳定, 仅有轻微波动, Mg 元素的淋溶和迁移在半湿润区明显弱于 Ca。研究结果表明, 可溶性元素和碳酸盐矿物在全新世气候适宜期被较强地溶解, 而其他时期风化作用较弱。

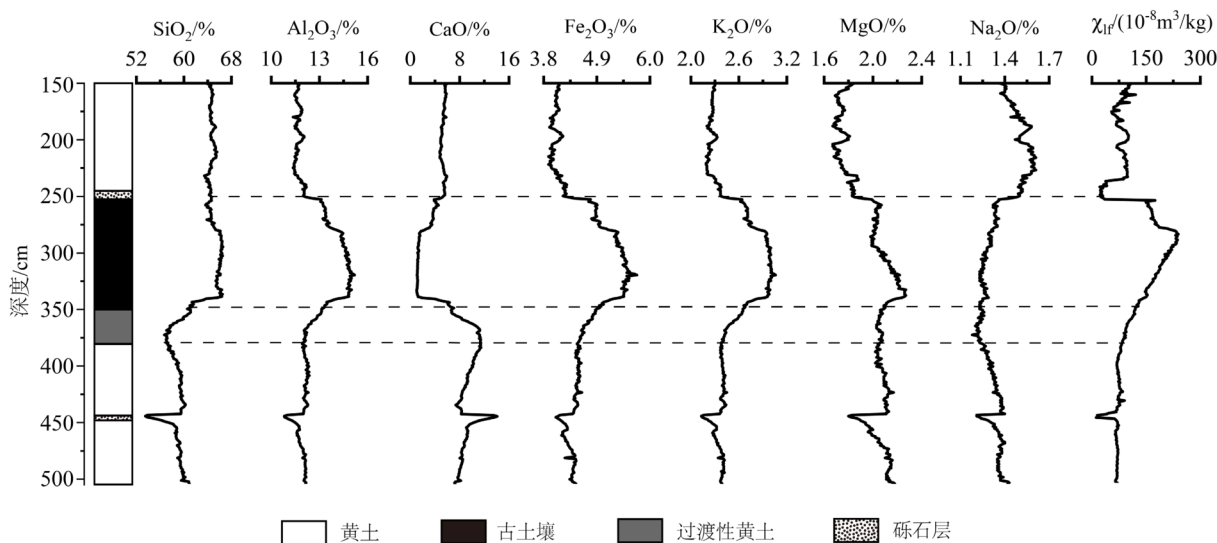


图 5 宋村沟剖面常量元素含量和磁化率曲线

Fig.5 Profiles of constant element content and magnetic susceptibility of the Songcungou section

表 2 宋村沟剖面及其他风成沉积物常量化学元素平均含量
Table 2 Average content of major chemical elements of the Songcungou section and other aeolian deposits

土壤剖面	参数	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MgO/%	CaO/%	Na ₂ O/%	K ₂ O/%	TiO ₂ /%	CIA
宋村沟黄土(n=257)	平均值	61.16	11.93	4.30	1.94	7.71	1.39	2.34	0.41	62.66
	变异系数	0.05	0.03	0.06	0.08	0.29	0.08	0.04	0.02	
宋村沟古土壤(n=98)	平均值	65.20	14.23	5.25	2.10	2.41	1.28	2.88	0.48	65.91
	变异系数	0.02	0.04	0.05	0.04	0.62	0.03	0.04	0.02	
西峰红黏土 ^[19] (n=5)	平均值	63.75	15.05	5.28	2.89	0.90	1.16	3.00	0.76	70.01
武威黄土 ^[20] (n=18)	平均值	58.77	11.37	2.70	2.86	7.91	1.77	2.16	0.70	58.21
下蜀黄土 ^[21] (n=20)	平均值	68.07	13.32	5.30	1.61	1.00	0.92	2.35	0.81	71.04
洛川黄土 ^[22] (n=13)	平均值	67.10	13.99	4.39	2.22	0.96	1.73	2.99	0.72	64.80
洛川古土壤 ^[22] (n=12)	平均值	64.85	14.93	5.16	2.21	0.82	1.39	3.18	0.76	68.18
宣城红土 ^[23] (n=21)	平均值	66.46	13.44	6.16	0.52	0.11	0.14	1.34	1.06	88.32
上陆壳 ^[24] (UCC)	平均值	66.00	15.20	5.00	2.20	4.20	3.90	3.40	0.50	47.92
陆源页岩 ^[24] (PASS)	平均值	62.80	18.90	7.22	2.20	1.30	1.20	3.70	0.16	70.36

4 讨论

4.1 风化强度

化学蚀变系数(CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+Na₂O+CaO*+K₂O)]×100)可以有效地反映沉积物中长石风化和分解成黏土矿物的程度^[25-26]。Na/K 值和化学风化程度成反比,即较大的 Na/K 值表示较冷且干燥的气候,较小的 Na/K 值表示较温暖且潮湿的气候。前人研究发现,CIA 值为 50~65,代表处于初等风化阶段的冷干气候条件;65~80 之间代表处于中等风化阶段的较暖湿气候条件;大于 80 则代表处于强烈风化阶段的炎热潮湿气候条件^[27]。

宋村沟剖面黄土地层单元(I、Ⅲ、Ⅳ)CIA 值为 59.75~65.35,平均值为 62.66,反映出在寒冷干燥的气候条件下,黄土处于初等弱风化阶段。而在全新世适宜期,气候温暖湿润,古土壤(CIA=65.91)处于中等风化阶段(图 6)。典型风成堆积物、上陆壳(UCC)和陆源页岩的化学风化强度,从高到低排序为:上陆壳<武威黄土<宋村沟黄土<洛川黄土<宋村沟古土壤<洛川古土壤<西峰红黏土<陆源页岩<下蜀黄土<宣城红土。

A-CN-K(Al₂O₃-CaO*+Na₂O-K₂O)三角模型图能够准确地指示剖面地层化学风化趋势^[26]。从陆相上地壳到陆相页岩的方向是典型的陆相风化趋势,宋村沟剖面和其他典型风成堆积剖面的所有样品点均在这条趋势线上,表明其整体组成与上陆壳

相似(图 7)。此外,宋村沟剖面的风化趋势与 CN-A 连线平行,说明斜长石风化较早,Na⁺和 Ca²⁺离子迅速释放,生成含 Al 的次生黏土矿物,而钾长石则相对稳定。与洛川黄土、古土壤和西峰红黏土以及下蜀黄土相比,宋村沟剖面的样品点更远离 A-K 线,Na⁺和 Ca²⁺损失相对较少,表明风化作用较弱。各剖面的数据点呈现从武威黄土→宋村沟黄土→洛川黄土→宋村沟古土壤→洛川古土壤→西峰红黏土→下蜀黄土→宣城红土逐渐向右上方移动的趋势,揭示了不同区域的化学风化强度沿该方向逐渐增强,与 CIA 指数排序一致。

一般情况下,沉积物风化强度主要受母岩成分、地形条件和气候条件等因素的影响。由于宋村沟剖面的土壤与其他风成堆积物均来自广泛的上陆壳,母岩基本一致,并且这些典型堆积物剖面与宋村沟剖面一样地势较高,地形条件也不会造成较大的化学风化差异。与此同时,CIA 指数与指示夏季风强度的磁化率记录有很好的相关性,常量化学元素及相关参数反映的化学风化信息也与东亚季风的强度有较强的一致性。因此气候可能是形成这些风成堆积剖面化学风化差异的主要原因。对比处于同一气候区的宋村沟剖面 and 洛川剖面发现,二者风化程度相似,且风化程度都高于武威而低于西峰、下蜀、宣城。在空间位置上,不同风成堆积物的风化程度变化与中国现代季风从东南向西北方向递减的趋势一致,表明不同区域风成堆积物风化程度的差异主要受东亚季风的影响。

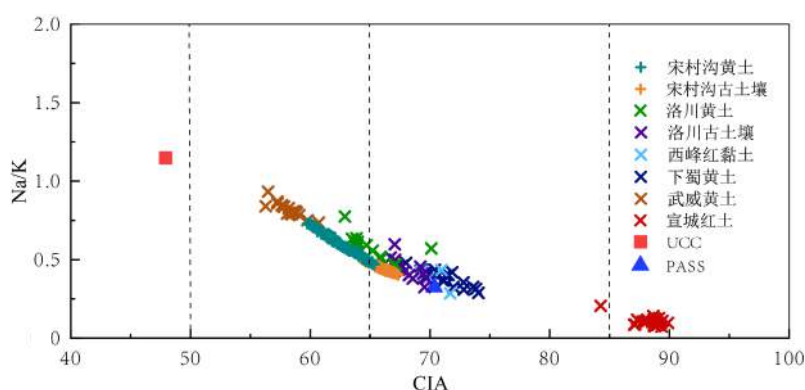


图 6 宋村沟剖面与其他风成沉积物剖面化学风化参数 CIA 与 Na/K 关系散点图

Fig.6 Relationship between chemical weathering parameters CIA and Na/K of the Songcungou section and other aeolian deposits

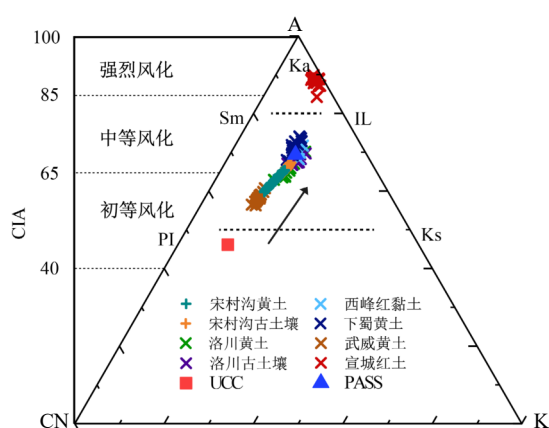


图 7 宋村沟剖面与其他风成沉积物剖面的 A-CN-K 图

A 为 Al_2O_3 , CN 为 $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$, K 为 K_2O , PI 为斜长石, Ks 为钾长石, Sm 为蒙脱石, IL 为伊利石, Ka 为高岭石。

Fig.7 A-CN-K diagram of the Songcungou section and other aeolian deposits

A: Al_2O_3 , CN: $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$, K: K_2O , PI: plagioclase, Ks: potassium feldspar, Sm: smectite, IL: illite, Ka: kaolinite.

4.2 气候变化及其驱动机制

4.2.1 晚冰期

地层单元 IV 形成于晚冰期 (15 000~11 500 aBP), 主要发育马兰黄土。该阶段磁化率和土壤有机碳含量均处于最低水平, 表明风化和成土作用较弱的条件下生成的磁赤铁矿/磁铁矿物的含量少、粒径偏粗^[28-29], 生物生产率低, 生物活动强度小。该区域马兰黄土以粗粉砂质黄土为主, 粗粉砂与黏土的比值最高, 反映东亚冬季风较强, 成壤作用最弱。弱风化浸出过程表现为不溶性元素含量较低, 可溶性元素含量较高。A-CN-K 图也指示了这一时期为化学风化的早期阶段, 风化和成壤作用较弱, 表明该区域降水较少, 气候偏干冷。

同一时期的干冷气候在黄土高原其他黄土序

列中有广泛的记录 (图 8), 如基于靖远黄土无机碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 推测的湿度记录^[30] 显示晚冰期降水量少, 反映了中国北方较干燥的气候条件; 白草塬黄土的磁化率记录^[31] 反映了较弱的成壤作用; 临汾盆地周边的莲花洞石笋氧同位素值^[32] 反映东亚夏季风较弱且波动强烈, 这些记录与晚冰期的全球气候变化一致。

4.2.2 早全新世

全新世早期 (11 500~10 500 aBP), 剖面发育了黄土向古土壤过渡时形成的地层单元——过渡性黄土。该阶段的磁化率和土壤有机碳明显高于马兰黄土, 表明东亚夏季风增强, 气候逐渐向暖湿转变。黄土中的不稳定矿物分解成较小的颗粒, 表现为低黏粒的细粉砂, 粗粉砂与黏土的比值降低, 表明东亚冬季风逐渐减弱, 成壤作用增强。不溶性元素含量较低, 可溶性元素含量较高, 风化淋溶作用增强。由 A-CN-K 图和 CIA 与 Na/K 关系散点图也可以看出, 早全新世的化学风化和成壤作用比晚冰期明显加强。

靖远黄土和白草塬黄土的研究^[30-31] 证实了晚冰期至全新世时期, 气候逐渐向暖湿转变; 从巴彦淖尔湖总有机碳 (TOC) 含量推断的湿度记录和巴彦查干湖孢粉推测的年降水量记录^[32-33] 揭示了该时期降水呈增加趋势; 山西莲花洞石笋氧同位素^[34] 表明季风降水在 11 500 aBP 迅速增加。所有这些研究都反映了在末次冰期至全新世的过渡时期, 气候由干冷向暖湿转变, 风化成土作用和东亚风作用增加。

4.2.3 早中全新世

古土壤层形成于早中全新世 (10 550~6 785 aBP), 该时期具有最高的磁化率和较高的土壤有机碳含量, 这是由于暖湿条件下土壤生成的磁赤铁矿/磁铁矿物的含量更多、粒径较细^[28-29] 以及生物活动更强烈。古土壤层主要由黏土矿物含量较高的黏质粉

砂组成,表明在风化和成壤过程中产生了大量的不稳定矿物和次生黏土矿物。粗粉砂与黏土的比值最低,反映东亚冬季风较弱,成壤作用最强。此阶段不溶性元素含量最高,可溶性元素含量最低,风化和成土作用显著。由 A-CN-K 图和 CIA 与 Na/K 关系散点图可判断,临汾盆地处于中等风化阶段的较暖湿气候条件,东亚季风显著增强。

早中全新世时期,临汾盆地全新世气候转向暖湿,古土壤明显发育,东亚夏季风持续增强并达到全新世峰值,带来了丰富的降水,进一步加强了风化和成土作用,这与周边中梁铁厂剖面的研究结论^[6]一致。同一时期,黄土高原中的其他区域也有较一致的记录,靖远、白草塬沉积记录^[30-31]显示了最佳的气候条件,发育了类似的古土壤;洛川和巴谢的黄土-古土壤序列显示古土壤形成于全新世早期至约 5000 aBP,全新世最适宜期为约 10~8.0 kaBP^[35-36]。另外,由中国北方湖泊沉积^[32,34]推测的湿度和年降水量信息表明早中全新世降水量丰富,湿度较大;位于中国西北方向的猪野泽湖泊沉积的云杉花粉百分比记录^[37]显示该时期乔木占比较大,气候温暖湿润。邻近地区的莲花洞石笋氧同位素^[34]研究结

果显示全新世适宜期在约 11.5~6.0 kaBP,这与临汾盆地全新世适宜期的起止时间十分契合。

4.2.4 中全新世晚期

地层单元 I 形成于中全新世晚期 (6785~4580 aBP),黄土层发育。该黄土层的磁化率降低,土壤有机碳含量减少(近地表除外),均低于早中全新世古土壤层,表明成土作用减弱。沉积物堆积主要为粗粉砂质黄土。不溶性元素减少,可溶性元素增加,也反映了弱风化作用。在 A-CN-K 三元图中 CIA 值较低,风化和成土强度较弱。

临汾盆地中全新世晚期以来,东亚夏季风有所减弱,温度和降水的不利条件是风化和成土作用较弱的主要原因。该结果与黄土高原沉积记录、中国北方湖泊沉积记录、石笋沉积记录反映的气候暖湿条件减弱一致。由靖远黄土推断的湿度趋势^[30]和白草塬黄土的磁化率^[31]反映中全新世晚期气候逐渐干燥,成壤作用弱化;巴彦淖尔湖和巴彦查干湖^[32-33]同样揭示了该时期降水量迅速减少,湿度大幅降低;此时,猪野泽湖泊沉积的云杉花粉百分比^[37]大幅下降,莲花洞石笋氧同位素^[34]研究结果显示约 6.0 kaBP 之后气候呈现逐渐干燥的趋势。

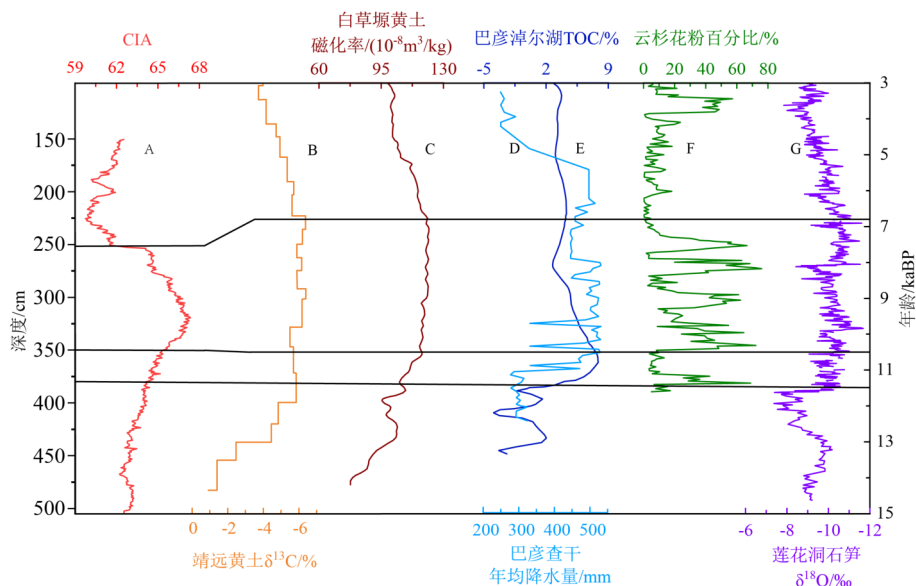
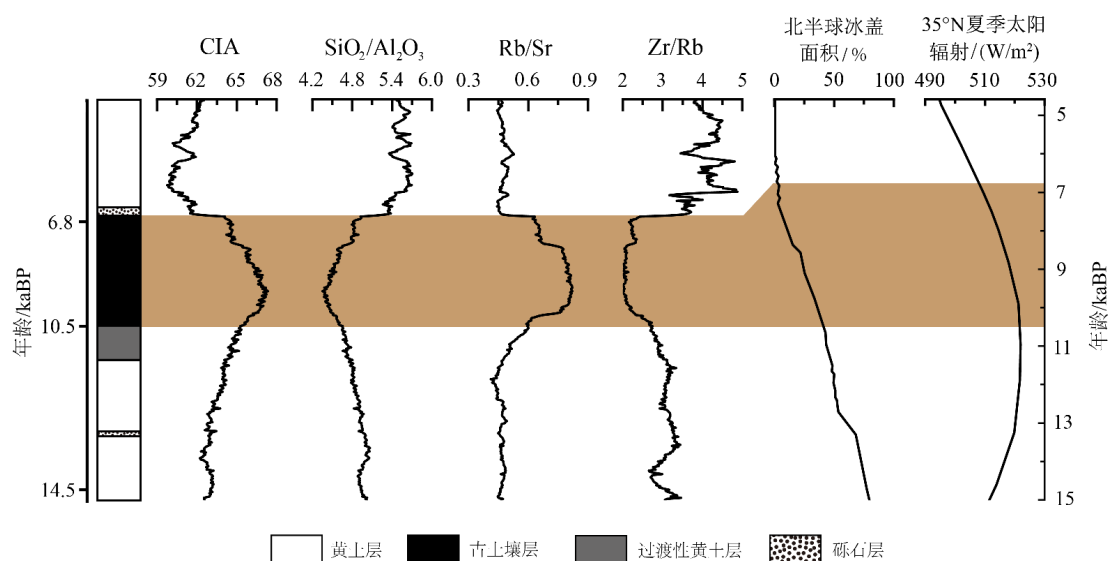


图8 宋村沟剖面的环境指标与其他古气候记录对比

A.宋村沟剖面化学蚀变系数(CIA),B.由靖远黄土无机碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 推断的湿度记录^[30],C.黄土高原白草塬黄土-古土壤磁化率的变化^[31],D.由巴彦查干湖孢粉推测的年降水量记录^[32],E.由巴彦淖尔湖总有机碳(TOC)含量推断的湿度记录^[33],F.根据猪野泽湖云杉属和松花粉含量推断的湿度记录^[37],G.山西莲花洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[32]。

Fig.8 Comparison of environmental indices between the Songcungou section and other paleoclimate records

A: Chemical alteration coefficient (CIA) of the Songcungou section, B: humidity record inferred from $\delta^{13}\text{C}$ of inorganic carbonate in Jingyuan loess^[30], C: magnetic susceptibility variation of the Baicaoyuan loess-paleosol^[31], D: annual precipitation record inferred from pollen-spore spectra from Bayan Chagan Lake^[34], E: moisture record inferred from total organic carbon (TOC) content of Bayan Nuur Lake^[33], F: humidity record inferred from pollen content of *Picea* spp. and *Pinus* spp. in Zhuyezhai Lake^[37], G: $\delta^{18}\text{O}$ records of stalagmites in the Lianhua Cave^[32].

图 9 CIA、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Rb/Sr、Zr/Rb 与与其他古气候记录对比Fig.9 Comparison in CIA, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Rb/Sr, Zr/Rb between Songcungou section and other paleoclimate records

4.2.5 驱动机制

Rb/Sr 值和化学蚀变指数常用于反映风化程度,是指示夏季风的良好代用指标^[38-39]。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Zr/Rb 被认为是可靠的冬季风代用指标^[40-41]。宋村沟土壤剖面的化学蚀变指数、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Rb/Sr 值、Zr/Rb 值曲线如图 9,它们反映了晚冰期以来的东亚季风演化呈现两阶段模式:东亚夏季风的增强和减弱。在第一阶段(晚冰期至早中全新世),夏季风逐渐加强,并达到最大值;第二阶段(早中全新世至中全新世晚期),东亚夏季风逐渐减弱,冬季风逐渐加强并占据主导地位。

宋村沟剖面的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Zr/Rb 曲线记录了临汾盆地晚冰期至早中全新世的冬季风较强,与估计的北半球冰盖面积变化^[42]十分吻合(图 9),推断这是由于高纬度大面积冰川的存在使得西风急流和冬季风增强引起的,符合高纬度冰川控温模式^[43]。宋村沟剖面的 CIA、Rb/Sr 曲线与 35°N 夏季太阳辐射量的变化趋势^[44]一致,但宋村沟剖面化学参数所指示的最强夏季风时期与 30°N 夏季太阳辐射量峰值存在一定的滞后,这与 Li 等^[45]在黄土高原中部的研究结果一致。Xiao 等^[46]认为这种滞后是因为北太平洋极地锋受北半球冰盖的影响向北退缩,推迟了夏季风的北移,进而抑制了东亚的季风降水。因此临汾盆地晚冰期以来的气候变化受北半球太阳辐射和冰量变化的双重控制。

5 结论

(1)宋村沟黄土-古土壤剖面是晚冰期至中全新

世晚期形成的风成土壤层。

(2)CIA 指数、Na/K 比以及 A-CN-K 三角图表明宋村沟剖面黄土层处于较弱的脱 Ca、Na 初级风化阶段,古土壤层处于中等化学风化阶段。不同地区风成堆积物的化学风化强度存在明显差异,主要受控于东亚夏季风强度的区域差异。

(3)临汾盆地晚冰期至中全新世晚期气候的 4 个演化阶段:晚冰期气候干冷,风化和成土作用较弱;东亚夏季风在早全新世强化,气候向暖湿转变,并在早中全新世达到峰值,为最暖湿的适宜期;随着东亚夏季风的减弱,气候在中全新世晚期又转向干冷。临汾盆地晚冰期至中全新世晚期的气候变化主要受控于北半球太阳辐射强度和冰量的变化。

致谢: 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见;河南大学陈英勇老师对文章提出进一步修改建议,特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Dongsheng. Loess and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] An Z S, Liu T S, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China [J]. *Quaternary International*, 1990, 7-8: 91-95.
- [3] Jia Y F, Huang C C, Pang J L, et al. Chronology of the Holocene loess-paleosol section and its deposition and pedogenesis on the south of Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18 (4): 415-442.
- [4] Wang H P, Chen J H, Zhang X J, et al. Palaeosol development in the

- Chinese Loess Plateau as an indicator of the strength of the east Asian summer monsoon: evidence for a mid-Holocene maximum [J]. *Quaternary International*, 2014, 334-335: 155-164.
- [5] 王克鲁, 盛学斌, 严富华, 等. 山西临汾盆地黄土及其形成古环境[J]. 地震地质, 1996, 18(4): 339-348. [WANG Kelu, SHENG Xuebin, YAN Fuhua, et al. The loess and the paleo-environment for its formation in the Linfen Basin of Shanxi Province [J]. *Seismology and Geology*, 1996, 18(4): 339-348.]
- [6] 李拓宇. 山西陶寺遗址及临汾地区全新世环境演化与古文化发展 [D]. 北京大学博士学位论文, 2013. [LI Tuoyu. Holocene environmental change and cultural evolution of Taosi site and Linfen area of Shanxi Province [D]. Doctor Dissertation of Peking University, 2013.]
- [7] 田庆春, 杜五喜, 韩军青, 等. 末次间冰期以来临汾盆地气候演化特征: 以丁村古人类遗址东沟剖面为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 139-144. [TIAN Qingchun, DU Wuxi, HAN Junqing, et al. Climate evolution of Linfen Basin since the last interglacial period: case study of Donggou section near the ancient human site of Dingcun [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 139-144.]
- [8] 胡小猛, 王杜涛, 陈美君, 等. 山西临汾盆地末次冰期时段湖相沉积中的H, D/O事件记录[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 354-363. [HU Xiaomeng, WANG Dutao, CHEN Meijun, et al. The study on the records of H and D/O paleoclimatic events during the Last Glacial period from the lacustrine sediment in Linfen Basin, Shanxi graben [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 354-363.]
- [9] Ramsey C B. Bayesian analysis of radiocarbon dates [J]. *Radiocarbon*, 2009, 51(1): 337-360.
- [10] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50, 000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [11] Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process [J]. *Bayesian Analysis*, 2011, 6(3): 457-474.
- [12] Xu S J, Wang T. Comparative study on the grain size characteristics of loess deposit both on Miaodao Islands and on the Laizhou Bay plain and its implications for provenance [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1869-1875.
- [13] Huang C C, Pang J, Su H, et al. Climatic and anthropogenic impacts on soil formation in the semiarid loess tablelands in the middle reaches of the Yellow River, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(3): 280-298.
- [14] Heller F, Liu T S. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13(11): 1169-1172.
- [15] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 years [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [16] Bloemendal J, Liu X M, Sun Y B, et al. An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 257(1-2): 152-168.
- [17] 谢巧勤, 陈天虎, 徐晓春, 等. 西峰黄土-红粘土序列有机质记录及其对磁化率古气候意义启示[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 709-718. [XIE Qiaoqin, CHEN Tianhu, XU Xiaochun, et al. Organic matter record of Xifeng eolian deposits and its decipherment for the paleoclimatic proxy of magnetic susceptibility of the loess-red clay sequences in Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 709-718.]
- [18] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1997. [ZHANG Hucai. *Supergene Geochemical Characteristics and Theoretical Basis of Elements* [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1997.]
- [19] 陈旸, 陈骏, 刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征[J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 167-175. [CHEN Yang, CHEN Jun, LIU Lianwen. Chemical composition and characterization of chemical weathering of Late Tertiary red clay in Xifeng, Gansu Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(2): 167-175.]
- [20] 张虎才, 李吉均, 马玉贞, 等. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 154-160. [ZHANG Hucai, LI Jiejun, MA Yuzhen, et al. A study on elemental geochemical characters of the Wuwei loess section in the south vicinity of Tengger Desert [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(4): 154-160.]
- [21] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1174-1184. [LI Xusheng, HAN Zhiyong, YANG Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1174-1184.]
- [22] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. 中国科学:D 辑, 2001, 44(5): 403-413. [CHEN Jun, AN Zhisheng, LIU Lianwen, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(5): 403-413.]
- [23] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75-82. [LI Xusheng, YANG Dayuan, LU Huayu. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic record of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(4): 75-82.]
- [24] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in Southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(23-24): 3317-3326.
- [25] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [26] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [27] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544. [FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539-544.]

- [28] 刘秀铭, 刘植, 吕钊, 等. 塞尔维亚黄土的磁学性质及其环境意义[J]. *科学通报*, 2013, 58(3): 353-363. [LIU Xiuming, LIU Zhi, LÜ Bin, et al. The magnetic properties of Serbian loess and its environmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(3): 353-363.]
- [29] 苏志珠, 杨宗园, 李晋昌. 距今220 ka以来大同盆地沉积物磁化率反映的气候变化[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 401-407. [SU Zhizhu, YANG Zongyuan, LI Jinchang. Climate change reflected by the magnetic susceptibility within the deposit sediment in Datong Basin, North China, since 220 kaBP [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 401-407.]
- [30] Sun Y Q, Qi L, Heng F, et al. Analysis of generalized semiparametric mixed varying-coefficients models for longitudinal data [J]. *Canadian Journal of Statistics*, 2019, 47(3): 352-373.
- [31] Zhao G Y, Liu X M, Chen Q, et al. Paleoclimatic evolution of Holocene loess and discussion of the sensitivity of magnetic susceptibility and median diameter [J]. *Quaternary International*, 2013, 296: 160-167.
- [32] Ming G D, Zhou W J, Wang H, et al. Moisture variations in lacustrine-eolian sequence from the Hunshandake sandy land associated with the east Asian summer monsoon changes since the Late Pleistocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 233: 106210.
- [33] Jiang W Y, Guiot J, Chu G Q, et al. An improved methodology of the modern analogues technique for palaeoclimate reconstruction in arid and semi-arid regions [J]. *Boreas*, 2010, 39(1): 145-153.
- [34] Dong J G, Shen C C, Kong X G, et al. Reconciliation of hydroclimate sequences from the Chinese Loess Plateau and low-latitude east Asian summer monsoon regions over the past 14, 500years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 435: 127-135.
- [35] An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the east Asian monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(8): 743-762.
- [36] 周卫健, 安芷生. 中国黄土高原¹⁴C年代学[M]//刘东升. 中国第四纪地质与环境. 北京: 科学出版社, 1991: 192-200. [ZHOU Weijian, AN Zhisheng. ¹⁴C chronology of Loess Plateau in China[M]//LIU Dongsheng. *Quaternary Geology and Environment in China*. Beijing: Science Press, 1991: 192-200.]
- [37] Chen F H, Cheng B, Zhao Y, et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China [J]. *The Holocene*, 2006, 16(5): 675-684.
- [38] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. *中国科学:D 辑*, 1998, 41(3): 235-241. [CHEN Jun, JI Junfeng, QIU Gang, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 1998, 41(3): 235-241.]
- [39] 汪海斌, 于英鹏, 刘现彬, 等. 黄土高原S₁古土壤的地球化学特征及其对物源的指示[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 338-346. [WANG Haibin, YU Yingpeng, LIU Xianbin, et al. Geochemical characteristics of last interglacial paleosols in the Chinese Loess Plateau and its implications to loess provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 338-346.]
- [40] 刘连文, 陈骏, 陈昉, 等. 最近130ka以来黄土中Zr/Rb值变化及其对冬季风的指示意义[J]. *科学通报*, 2002, 47(15): 1298-1302. [LIU Lianwen, CHEN Jun, CHEN Yang, et al. Variation of Zr/Rb ratios on the Loess Plateau of central China during the last 130000 years and its implications for winter monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15): 1298-1302.]
- [41] 彭淑贞, 郭正堂. 风尘堆积中SiO₂/Al₂O₃值与粒度的关系及其对东亚冬季风的指示意义[J]. *中国科学:D 辑*, 2001, 44(S1): 261-266. [PENG Shuzhen, GUO Zhengtang. Geochemical indicator of original eolian grain size and implications on winter monsoon evolution [J]. *Science in China Series D:Earth Science*, 2001, 44(S1): 261-266.]
- [42] Dyke A S. An outline of north American deglaciation with emphasis on central and northern Canada [J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2004, 2: 373-424.
- [43] Peltier W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and grace [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 111-149.
- [44] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the earth [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [45] Li P, Zhang C X, Wu H B, et al. Geochemical characteristics of Holocene loess-paleosol sequences in central Chinese Loess Plateau and their implications for east Asian monsoon evolution [J]. *Quaternary International*, 2022, 616: 99-108.
- [46] Xiao J L, Si B, Zhai D Y, et al. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene east Asian monsoon variability [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40(1): 519-528.