

晋南全新世黄土剖面常量元素地球化学特征 及其古环境意义

李拓宇, 莫多闻, 朱高儒, 王海斌, 张翼飞, 郭媛媛

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 通过对晋南地区中梁铁厂全新世黄土剖面常量元素含量分析和粒度、磁化率及光释光年代测定, 探讨全新世以来该剖面的化学风化特征及其古环境意义。剖面沉积物的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 含量变化趋势基本一致, 三者含量在古土壤层中较高, 代表气候暖湿; 剖面常量元素含量与UCC对比具有富Ca而贫Na、K的特征; 剖面总体处于低等化学风化强度, 介于陕西扶风和宁夏彭阳的剖面之间, 其中古土壤层处于中等风化强度, Ca、Na大量淋失。常量元素地球化学特征指示该区全新世以来气候经历了“气候回暖→温暖湿润→气候转凉→持续干旱”的转化过程。1.2-2.5 ka BP期间区域地表流水作用较强, 导致了Ca的相对淋失。

关键词: 晋南; 全新世; 黄土剖面; 常量元素; 古环境

1 引言

中国黄土高原黄土剖面记录的古环境变化, 受到了国内外学者的广泛关注^[1-4]。黄土剖面常用于恢复古环境的指标包括粒度、磁化率、孢粉、植硅石及常量元素、微量元素等^[5-8]。近年来, 对黄土剖面常量元素地球化学特征进行分析的成果较多, 化学蚀变指数(CIA)和A-CN-K三角图被广泛应用。研究表明, 黄土发育时期风化作用较弱, 气候冷干; 古土壤发育时期风化作用较强, 气候暖湿^[9-13]; 这与深海氧同位素所反映的气候变化特征较为一致^[14]。常量元素的地球化学特征除了受气候条件变化的影响外, 还受颗粒粒径、地貌、构造活动、水文、植被等多个因素的影响, 如K、Mg元素较易被黏土吸附^[15], 构造运动引起的河流的下切会使原生矿物在下游富集^[16]; 此外, 全新世以来, 随着人口增多与文明的发展, 人类活动的影响也不可忽视^[17,18]。

晋南指山西省南部, 位于黄土高原东南缘。该区全新世以来仰韶时期—龙山时期—夏商时期—两周时期文化连续发展。仰韶中期庙底沟文化、龙山时期庙底沟二期文化和陶寺文化较为发达, 其中龙山时期的陶寺遗址被认为是都邑性遗址^[19]; 仰韶晚期西王村文化、夏商、西周时期文化相对衰落; 东周以来人口骤增, 晋文化发展^[20]。目前关于晋南地区的全新世环境演化研究仅有全新世地层的成壤过程^[21], 对该区全新世黄土剖面元素地球化学特征反映的环境演化尚少见报道。本文基于对晋南陶寺遗址外一黄土剖面样品进行的系统

收稿日期: 2013-03-04; 修订日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171006); 国家科技支撑计划项目课题(2013BAK08B02); 国家社科基金重大项目(11&ZD183)

作者简介: 李拓宇(1985-), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 研究方向为环境演变与环境考古。

E-mail: lituoyu@pku.edu.cn

通讯作者: 莫多闻(1955-), 男, 湖南桃江人, 教授, 博士生导师, 主要从事地貌学与环境演变方面的研究。

E-mail: dmo@urban.pku.edu.cn

采样和常量元素测试分析, 结合样品的磁化率和粒度测试结果及光释光测年建立的年代标尺, 分析该剖面常量元素的地球化学特征, 以还原当地全新世以来的古环境信息, 并探讨常量元素地球化学特征的影响因素。

2 采样剖面概况与实验方法

中梁铁厂 (ZLTC) 剖面位于晋南地区襄汾县城以东 7 km (图 1a), 地处塔儿山西北麓的缓倾斜黄土台塬上。该处黄土台塬的物质组成以黄土为主, 间部分山前冲洪积沉积物。靠近塔儿山山前部位坡度较陡, 远离山前部位坡度较缓。采样剖面深 220 cm, 根据地层岩性, 将剖面划分如下 (图 1b): ① 层深 0-50 cm, 为耕作层, 褐黄色粉砂, 疏松多孔; ② 层深 50-90 cm, 为棕黄色粉砂, 较疏松; ③ 层深 90-142 cm, 为黄色粉砂, 较致密; ④ 层深 142-158 cm, 为浅黄色黏土质粉砂, 较致密; ⑤ 层深 158-204 cm, 为红棕色黏土质粉砂, 较疏松; ⑥ 层深 204-220 cm, 为浅红棕色黏土质粉砂, 较致密。

分别在深 98 cm、138 cm、178 cm 和 198 cm 处采集光释光年代样品, 并在北京大学考古文博学院释光实验室进行分析测试, 测年结果分别为 1.24 ± 0.11 ka BP、 1.90 ± 0.17 ka BP、 7.79 ± 0.40 ka BP、 9.09 ± 0.54 ka BP。根据粒度年代模型^[22]和外推法, 算得①-⑥层年代分别为: 0-0.6 ka BP、0.6-1.2 ka BP、1.2-2.5 ka BP、2.5-4.9 ka BP、4.9-9.6 ka BP、9.6-10.5 ka BP。由于①层、②层和⑥层的年代是根据外推法算得, 可能存在一定误差。

黄土高原地区全新世地层一般可以划分为表土层、全新世晚期黄土层、全新世大暖期古土壤层、全新世早期过渡层^[23]。根据年代测定结果和岩性差别, 认为 ZLTC 剖面中①层为表土层, ②层、③层为全新世晚期黄土层, ④层、⑤层为全新世古土壤层, ⑥层为马兰黄土向全新世古土壤的过渡层。

以每 2 cm 间隔对 ZLTC 剖面连续采集 110 个样品, 对样品进行了粒度、磁化率和 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 等常量元素测定。粒度在北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室用英国 Malvern 公司 Mastersizer-2000 激光粒度仪进行测量, 样品用 H_2O_2 和 HCl 处理, 并加入 $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散^[24]。磁化率测试在北京大学地表过程

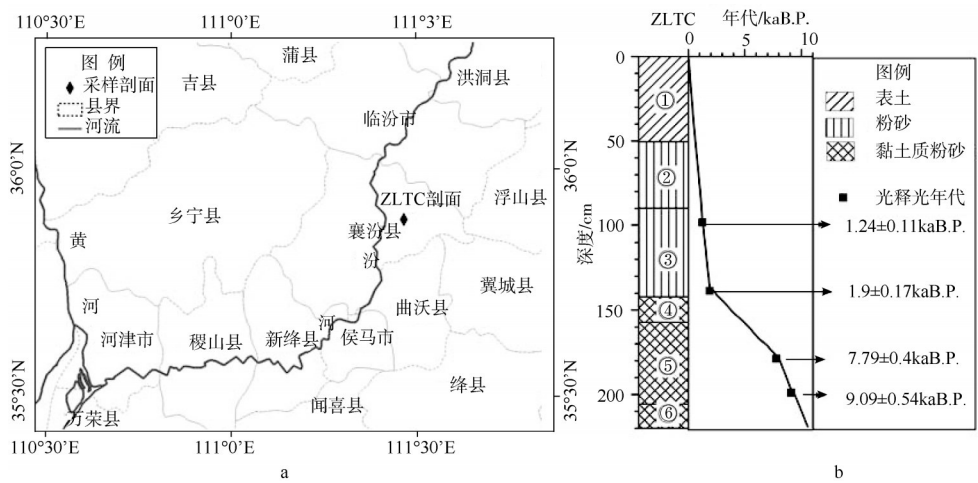


图 1 ZLTC 剖面位置 (a) 及剖面年代 (b)

Fig. 1 The location (a) and the OSL dating (b) of ZLTC profile

分析与模拟教育部重点实验室用英国 Bartington 公司 MS2 型磁化率仪完成, 测量 10 g 样品的质量磁化率 (χ_{ir})^[25]。常量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室使用 ADVANT XP+顺序式 X 射线荧光光谱仪测量, 测定中加入为土壤成分标准物质 GSS-8 进行质量控制, 实验误差小于 0.1%。

3 结果分析

3.1 元素分布特征

ZLTC 剖面常量元素含量及磁化率 (χ_{ir})、中值粒径 (Md)、粒径大于 100 μm 颗粒百分比的变化如图 2, 分层平均值如表 1, 各参数之间的相关性如表 2。综合分析 ZLTC 剖面常量元素的分布有以下特征。

(1) 剖面中各层元素平均含量由高到低为: SiO_2 (62.3%) > Al_2O_3 (13.4%) > CaO (5.23%) > TFe_2O_3 (4.61%) > K_2O (2.43%) > MgO (2.07%) > Na_2O (1.54%)。

(2) 剖面中 SiO_2 和 CaO 含量变化呈负相关 ($R=-0.885$), 与关中东部 YHC 剖面^[9]和新疆伊犁盆地^[26]反映的情况一致。一般来讲古土壤层中 SiO_2 含量较高, CaO 含量较低, 黄土层则相反。这可能是因为气候暖湿时, 土壤粒间溶液 pH 值降低, 碳酸钙被溶解生成重碳酸钙, 被水溶液带走, 硅酸盐在原地保留; 相反, 气候冷干时, 土壤粒间溶液的 pH 值增高, 碳酸钙生成, 而硅酸盐生成 HSiO_4^- 离子被水溶液带走^[27,28]。 CaO 含量变化与磁化率呈负相关 ($R=-0.697$)。由于磁化率是良好的气候变化代用指标^[29], 由此推证 CaO 的含量变化受气候变化的影响较大。 Mg 与 Ca 的化学性质相近, MgO 与磁化率也存在一定程度负相关。

(3) Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 含量的变化趋势基本一致, 与中值粒径变化为负相关, 相关系数分别为 -0.687、-0.831、-0.588; 与磁化率为正相关, 相关系数分别为 0.827、0.700、0.745。 Al 和 Fe 是较稳定元素, 不易被风化, 其含量的变化是其他元素地球化学行为的良好参照系^[30], 即 Al 和 Fe 的相对聚集, 对应其他元素的风化淋溶作用较强, 气候较暖湿; Al 和 Fe 相对亏损, 对应其他元素风化淋溶作用较弱, 气候较冷干; K 虽然易被风化分

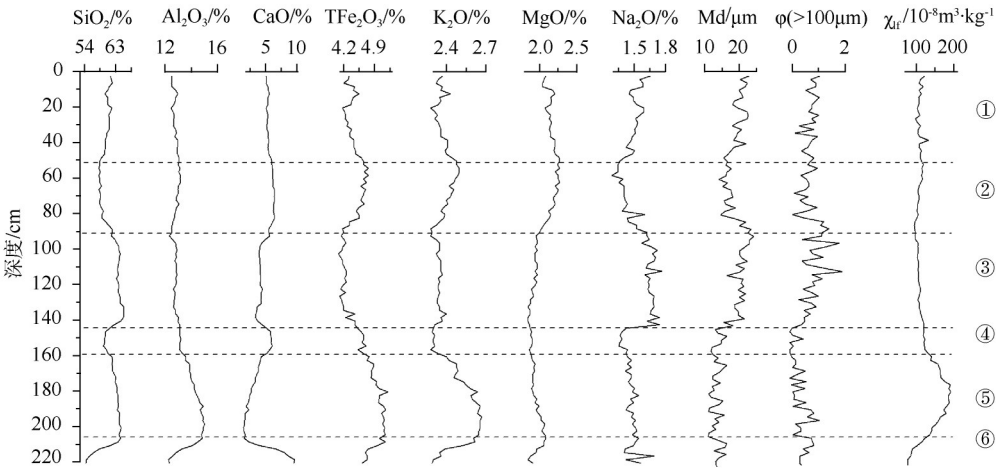


图2 ZLTC剖面常量元素、Md、 $\phi(>100\text{ }\mu\text{m})$ 、 χ_{ir} 曲线图

Fig. 2 The curves of major element contents, Md, $\phi(>100\text{ }\mu\text{m})$ and χ_{ir} of ZLTC profile

表 1 ZLTC 剖面常量元素、Md、 $\varphi(>100\ \mu\text{m})$ 、 χ_{f} 的分层平均值

Tab. 1 The mean valve of major element contents, Md, $\varphi(>100\ \mu\text{m})$ and χ_{f} for each layer of ZLTC profile

地层	常量元素含量(%)							Md	$\varphi(>100\mu\text{m})$	χ_{f}
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	(μm)	(%)	($10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$)
①层	61.5	13.0	5.85	4.43	2.39	2.19	1.53	20.6	0.83	117.4
②层	59.9	13.1	6.65	4.62	2.43	2.21	1.45	18.5	0.76	113.7
③层	64.7	13.0	4.66	4.29	2.36	1.95	1.68	20.9	0.92	115.4
④层	60.9	13.4	6.25	4.69	2.32	1.92	1.41	14.6	0.11	130.3
⑤层	64.1	14.6	3.14	5.06	2.59	2.00	1.50	14.0	0.38	174.7
⑥层	59.4	13.6	6.77	4.89	2.45	2.01	1.53	15.3	0.63	102.0

表 2 ZLTC 剖面地球化学参数的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of geochemical indexes of ZLTC profile

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Md
Al ₂ O ₃	0.392**							
CaO	-0.885**	-0.756**						
TFe ₂ O ₃	-0.064	0.865**	-0.367**					
K ₂ O	0.263**	0.912**	-0.653**	0.853**				
MgO	-0.495**	-0.130	0.310**	0.019	0.138			
Na ₂ O	0.597**	-0.267**	-0.272**	-0.563**	-0.301**	-0.456**		
Md	0.132	-0.687**	0.207*	-0.831**	-0.588**	0.156	0.517**	
χ_{f}	0.421**	0.827**	-0.697**	0.700**	0.745**	-0.250**	-0.222*	-0.580**

注：**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

解，但 K 离子半径较大，极化率高，易被黏土所吸附^[27]。相关研究表明 Al₂O₃、TFe₂O₃、K₂O 在黏土(<2 μm)中的含量较高^[15]，即可认为以上三者含量变化与成壤作用强度的变化相关。综上，可以认为 Al₂O₃、TFe₂O₃、K₂O 含量较高时（以⑤层最高），化学风化作用和成壤作用均较强，气候暖湿。

(4) Na₂O 含量与中值粒径为正相关 ($R=0.517$)，而与磁化率的相关性较低 ($R=-0.222$)，可见其含量变化受颗粒粒径大小影响较强；相关研究也表明 Na₂O 在较粗颗粒中含量较高^[15]。

(5) CaO 在③层黄土层中异常亏损，低于②层和④层，反映该层可能受到淋溶作用。同时，由于③层下部的④层（属古土壤层）粘化程度较高，③层流失的 Ca 在④层顶部沉积，导致④层 CaO 含量较高。相关研究表明，山前缓倾斜台塬区的风成黄土很容易受地表流水不同程度的改造和再调整^[31]，塔儿山西北麓缓倾斜台塬全新世晚期以来沉积速率的增高可能与地表坡面流水作用有关^[32]。ZLTC 剖面位于塔儿山西北麓缓倾斜台塬的前缘，坡度较缓，坡面流水作用的沉积物易在此处沉积。地表流水作用沉积物的特征为，粒径大于 100 μm 颗粒含量较高^[33]，并且沉积物中粒度增大可能指示古水土流失的发生^[34]。ZLTC 剖面③层沉积物中粒径大于 100 μm 颗粒含量和中位粒径均较其他层高，沉积速率也较大约为 4mm/a，说明该层在形成过程中受地表流水作用的影响较大，原因可能有：一是当时晋南地区进入东周时期，文化繁荣发展，农业活动增加，导致地表疏松，易被流水侵蚀；二是气候的持续干凉化可能促使植被退化，进而导致地表的抗侵蚀力降低，较易发生坡面流水侵蚀和再沉积。

化学风化过程中，活动性元素的淋失会造成样品中稳定元素的相对富集，导致元素的绝对含量并不能真实地反映风化成壤过程中元素的地球化学行为^[13,30]。为了消除这种影响，以基本未风化的上陆壳（UCC）平均化学成分含量为参照系^[35]，计算全新世黄土剖面常量元素的相对UCC亏损与富集程度。计算公式如式（1）^[28]，相应结果见图3。

$$\rho(\%)=[(m-n)/n]\times100 \tag{1}$$

式中：*m*代表ZLTC剖面某种常量元素X的含量；*n*代表UCC中X元素的含量； ρ 为亏损与富集程度值，若 $\rho>0$ ，反映元素X在该层中相对参比元素富集；若 $\rho<0$ ，则反映相对亏损。

ZLTC剖面常量元素含量与UCC对比而言，具有富Ca而贫Na、K的特征。Mg、Fe、Al、Si等元素含量与UCC接近但均呈现一定程度的亏损。Ca仅在⑤层表现明显的亏损，其余各层均相对UCC富集，可能反映黄土源区发生了Ca的富集，而⑤层古土壤发育时期发生Ca的强烈淋溶^[9]。Na和K相对亏损较大，且各层亏损程度相近，可能反映了黄土源区发生了Na和K的淋溶，而后期Na和K的含量变化并不十分明显。Fe、Al、Si等元素在各层中含量均相对UCC亏损，但在某些层位与UCC较为接近，相对亏损较小，如Fe在⑤层和⑥层，Al在⑤层，Si在③层和⑤层。综合以上特征，说明该剖面化学元素的总体特征受到黄土源区的相当影响，同时化学风化和成壤作用使其层间特征出现差异，其中⑤层古土壤发育时期风化作用最强，反映气候相对最为暖湿。

3.2 化学风化强度

3.2.1 化学蚀变指数 常量元素含量的比值可以消除某些干扰因素的影响，而且指示的气候意义更加明确，常用来指示化学风化强度的指标包括CIA（化学蚀变指数）和CPA（化学蚀变替代指标）。其中，CIA是衡量长石淋溶的强度指标，还被称为夏季风指数^[10]，在长石（钾长石和斜长石）淋溶期间Na、Ca、K元素从剖面中被移除，Al在风化残积物中相对聚集^[36]；CPA则被认为是代表钠长石（斜长石的一种）淋溶强度的最适宜指标^[37]。各指数公式为：

$$CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+CaO^*+K_2O)]\times100 \tag{2}$$

$$CPA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O)]\times100$$

式中： Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO^* 均为分子摩尔数； CaO^* 为硅酸盐里的Ca含量。

ZLTC剖面各层CIA、CPA值由高到低均为⑤层>④层>②层>⑥层>③层（表3），可见不同层位中长石和钠长石的淋溶强度基本一致，且⑤层古土壤中长石和钠长石的风化强度最强，③层黄土中长石和钠长石的风化强度最弱。

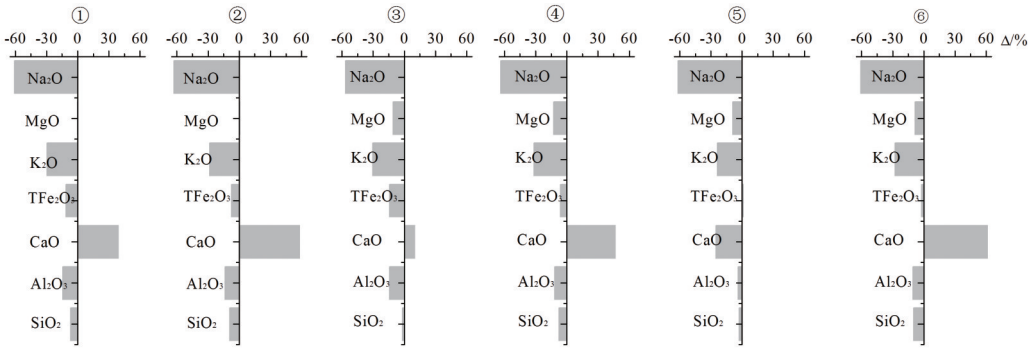


图3 ZLTC剖面各地层常量元素含量相对UCC亏损与富集程度
Fig. 3 Loss and accumulation of major elements of ZLTC profile relative to UCC

CIA 和 CPA 与磁化率的相关系数分别为 0.622 和 0.588, 表明两者受气候变化影响较强。CIA 值与化学风化强度和气候有如下对应关系: CIA 介于 50-65, 代表寒冷干燥气候下低等的化学风化强度; 介于 65-85, 代表温暖湿润气候下中等的化学风化强度; 介于 85-100, 代表炎热、潮湿气候条件下强烈的化学风化强度^[38]。ZLTC 剖面 CIA 均值为 63.6, 处于低等化学风化强度, ④层和⑤层的 CIA 值大于 65, 处于中等化学风化强度; 其余各层的 CIA 值介于 61.6-65 之间, 处于低等化学风化强度。ZLTC 全新世剖面的 CIA 值与其他黄土地区剖面的化学风化强度相比 (表 3), CIA 值由大到小为: 陕西扶风 JYC 剖面^[39]>山西襄汾 ZLTC 剖面>陕

表 3 ZLTC 全新世剖面与其他地区全新世剖面的 CIA 和 CPA 参数值

Tab. 3 The value of CIA and CPA indexes of ZLTC profile and other profiles

剖面	地层	CIA	CPA
山西襄汾 ZLTC	②层	63.9	84.6
	③层	61.6	82.4
	④层	65.1	85.2
	⑤层	65.3	85.5
	⑥层	63.7	84.3
	平均值	63.6	84.2
宁夏彭阳 CCY		61.2	82.3
陕西洛川		62.5	83.5
陕西扶风 JYC		66.0	86.2

西洛川剖面^[30]>宁夏彭阳 CCY 剖面^[40]; 这一排序与各剖面所处的地理位置现今气候条件的排序较为一致: 扶风、襄汾、洛川和彭阳的年均温分别为 12.4℃、11.5℃、9.2℃、7.2℃, 年均降水分别为 590 mm、550 mm、620 mm、450 mm。可见气候越暖湿 CIA 值越高, 长石化学风化作用越强。各剖面 CPA 的大小排序与 CIA 基本一致, 即气候越暖湿 CPA 值越高, 钠长石的化学风化作用越强。气候条件是影响长石风化的主要因素。

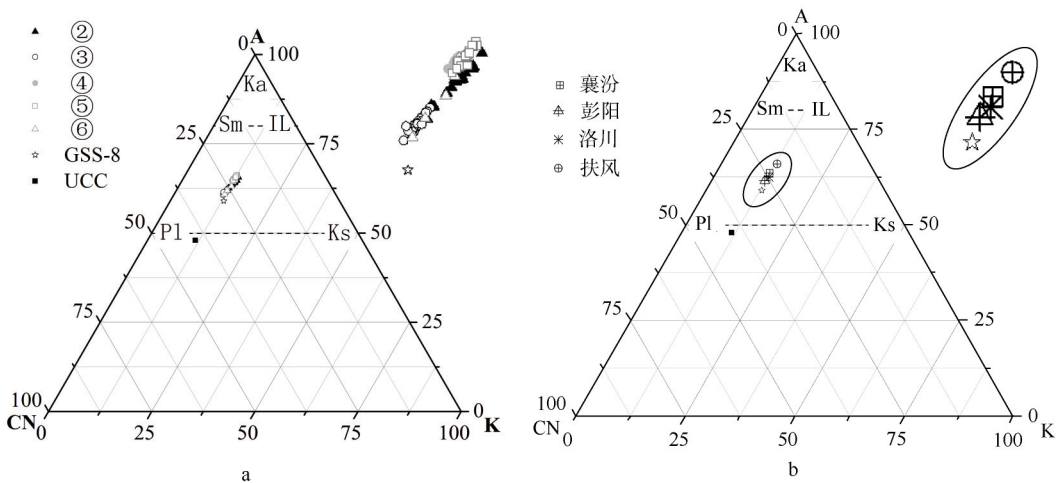
3.2.2 A-CN-K 三角模型图 A-CN-K (Al_2O_3 -CaO+Na₂O-K₂O) 三角模型图可以反映剖面地层的化学风化趋势^[41]。根据 ZLTC 剖面样品的分析结果在 A-CN-K 三角图上投点 (图 4a), 剖面样品均分布在 Pl-Ks 基线之上, 并与 A-CN 线平行, 靠近斜长石一侧, 而远离钾长石一侧; 与 GSS-8 黄土样品相比, 剖面的样品更远离 Pl-Ks 连线; 而 UCC 位于 Pl-Ks 连线之下。这表明剖面样品中经历了斜长石的脱 Ca 和 Na 的风化过程, 而钾长石几乎没有变化。斜长石的风化由强到弱为, ⑤层>④层>②层>⑥层>③层, 这与各层 CIA 值的排序一致。将山西襄汾 ZLTC、宁夏彭阳 CCY、陕西洛川和陕西扶风 JYC 全新世黄土剖面样品分析结果的平均值及 GSS-8 的分析结果在 A-CN-K 三角图上投点 (图 4b), 剖面样品均分布在 Pl-Ks 基线之上, 并与 A-CN 线平行; 斜长石风化由强到弱为, 陕西扶风>山西襄汾>陕西洛川>宁夏彭阳>GSS-8, 与各剖面 CIA 的平均值的排序一致。综合说明研究区长石风化主要表现为斜长石的风化, 气候条件是影响斜长石风化的主要因素。

3.3 剖面常量元素特征所反映的古环境变化

通过以上分析, 认为气候是制约 ZLTC 剖面常量元素风化作用的主要因素, 同时地表流水作用也有一定影响。ZLTC 剖面常量元素地球化学特征及反映的全新世古环境变化如下:

全新世早期 (9.6-10.5 ka BP), CaO 含量大幅下降, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 含量大幅升高, CIA 值由 61.9 升高至 65.2, 磁化率由 $85 \times 10^{-8} m^3/kg$ 上升到 $131 \times 10^{-8} m^3/kg$ 。表明元素的化学风化作用增强, 由低等风化程度向中等风化程度过渡, 反映气候由于干凉向暖湿转换。

全新世早中期 (4.9-9.6 ka BP), CaO 平均含量为各层中最低, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 平均含量为各层中最高, CIA 值为 65.3, 磁化率均值为 $175 \times 10^{-8} m^3/kg$ 。表明元素的风化淋溶强度最强, 处于中等风化程度, 反映气候暖湿。



注: A=Al₂O₃, C=CaO*, N=Na₂O, K=K₂O, Pl=斜长石, Sm=蒙脱石, Ka=高岭石, IL=伊利石, Ks=钾长石, GSS-8 为土壤成分分析标准物质-黄土, UCC 为上部陆壳。

图4 ZLTC剖面及其对比剖面沉积物A-CN-K三角图

Fig. 4 Comparison of A-CN-K diagrams between ZLTC profile and other profiles

全新世中晚期 (2.5-4.9 ka BP), Al₂O₃、Fe₂O₃含量相对较高, CIA 值为 65.1, 磁化率均值为 130×10⁻⁸ m³/kg。表明这个时期元素处于中等风化强度, 但气候较之前变得温干。

全新世晚期 (2.5 ka BP 以来), Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O 平均含量较低, CIA 值为 62.7, 磁化率均值为 115×10⁻⁸ m³/kg。表明这个时期风化淋溶强度较弱, 反映气候干凉。其中 1.2-2.5 ka BP 期间大于 100 μm 的颗粒含量最高, 剖面沉积速率也较高, Ca 表现出相对淋溶且在下层顶部淀积, 反映这一时期地表流水作用较强。

将 ZLTC 剖面的磁化率、CIA、CPA 与陕西柞水县九仙洞石笋氧同位素^[42]进行对比 (图5)。氧同位素的绝对值越大表示东亚夏季风越强, 对应气候暖湿。ZLTC 剖面磁化率、CIA、CPA 所反映的气候变化和九仙洞石笋氧同位素所反映的结果趋势基本一致, 均为全新世早期气候快速转暖, 全新世中期气候暖湿, 全新世晚期气候逐渐干凉。通过相同年代相应数值的相关性分析, 发现九仙洞石笋氧同位素与 ZLTC 剖面的磁化率、CIA、CPA 之间均呈显著的负相关关系, 它们的相关系数分别为 -0.584、-0.533、-0.501。此外关中渭南剖面^[43]磁化率、孢粉、植硅体等环境代用指标反映的区域全新世气候演化与 ZLTC 剖面结果也较为一致。

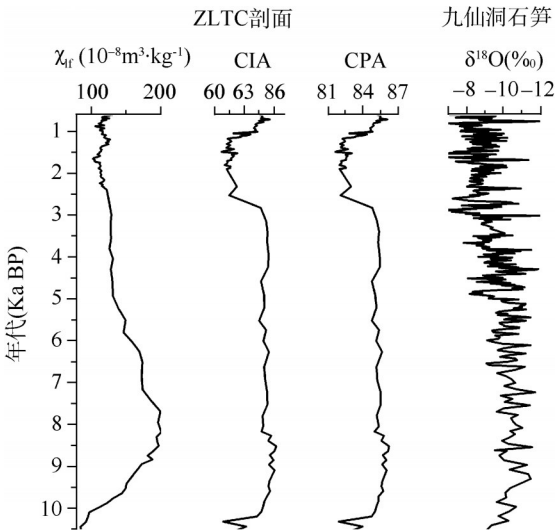


图5 ZLTC剖面CIA、CPA、磁化率与九仙洞石笋氧同位素对比

Fig. 5 Comparison of variations among CIA, CPA, magnetic susceptibility of ZLTC profile, oxygen isotope of stalagmites in Jiuxiandong cave

4 结 论

通过对晋南地区中梁铁厂(ZLTC)剖面样品中常量元素的测定与分析,结合光释光测年建立的年代标尺,分析了该剖面全新世以来常量元素的分布特征及其与磁化率、粒度的关系;通过计算地球化学风化强度指标、相对UCC亏损与富集程度、A-CN-K三角图等方法综合探讨地球化学参数与化学风化和成壤作用的关系,进而分析该区全新世以来的古环境变化及其产生原因,得到如下结论:

(1) ZLTC剖面沉积物的化学组成以 Si_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 TFe_2O_3 为主, K_2O 、 MgO 、 Na_2O 含量相对较低; SiO_2 与 CaO 呈负相关关系; Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 含量变化趋势一致,三者含量较高时代表气候暖湿; Na_2O 含量变化受粒径大小的影响较强,受气候变化的影响相对较弱; CaO 含量受气候变化影响较强,但也受淋溶淀积作用的影响。可见不同常量元素的含量变化受气候变化的影响的程度不同,同时也受颗粒粒径变化和淋溶淀积作用的影响。ZLTC剖面常量元素含量与UCC对比,具有富Ca而贫Na、K的特征,但古土壤层中出现了Ca的淋失。

(2) 气候条件是影响ZLTC剖面长石风化的主要因素,且长石风化主要表现为斜长石的风化。剖面总体处于低等化学风化强度,介于陕西扶风JYC剖面和宁夏彭阳CCY剖面之间,与各剖面所处地理位置现今气候条件的排序一致。不同地层之间的化学风化强度差异明显,其中古土壤层(⑤层)化学风化强度最强,斜长石中Ca和Na大量淋失;黄土层(③层)化学风化强度最弱。

(3) 常量元素地球化学特征指示研究区全新世古气候变化过程为:全新世早期(9.6-10.5 ka BP)气候由干凉向暖湿转换,全新世早中期(4.9-9.5 ka BP)气候暖湿,全新世中晚期(2.5-4.9 ka BP)气候较之前温干,但仍较现今暖湿,全新世晚期(2.5 ka BP以来)气候持续干凉。

(4) 地表流水作用对ZLTC剖面元素地球化学特征也有一定影响。在1.2-2.5 ka BP期间大于100 μm 的颗粒含量最高,沉积速率也较高,Ca出现相对淋溶,反映当时地表流水作用较强,这可能与农业活动的增加导致地表疏松及植被退化导致地表抗侵蚀力降低有关。

参考文献(References)

- [1] Porter S C. Chinese loess record of monsoon climate during the last glacial-interglacial cycle. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1-3SI): 115-128.
- [2] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L et al. Stacked 2.6Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 5-15-21.
- [3] An Z S, Kukla G, Porter S C et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau. *Catena*, 1991, 18(2): 125-132.
- [4] 顾洪亮, 黄春长, 周亚利, 等. 关中盆地杨官寨遗址古洪水事件释光测年. *地理研究*, 2012, 31(10): 1837-1848.
- [5] Maher B A. The magnetic properties of Quaternary Aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 87-144.
- [6] 程玉芬, 姜文英. 末次盛冰期以来陕北黄土高原的植被和气候变化. *第四纪研究*, 2011, 31(6): 982-989.
- [7] Lu H Y, Wu N Q, Liu K B et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: palaeoenvironmental reconstruction in the Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5-6): 759-772.

- [8] Gallet S, Jahn B, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chemical Geology*, 1996, 133(1): 67-88.
- [9] 丁敏, 庞奖励, 黄春长, 等. 关中东部全新世黄土古土壤序列常量元素地球化学特性研究. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 862-867.
- [10] Jahn B, Gallet S, Han J M. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: Eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chemical Geology*, 2001, 178(1): 71-94.
- [11] Guan Q Y, Pan B T, Gao H S et al. Geochemical evidence of the Chinese loess provenance during the Late Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 270(1): 53-58.
- [12] 毛龙江, 贾耀锋, 邹欣庆. 长江下游地区下蜀黄土堆积与成壤环境演变: 以南京江北地区一典型剖面为例. *地理研究*, 2006, 25(5): 887-894.
- [13] 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. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1997, 27(6): 531-536.
- [14] 程燕, 张小曳, 鹿化煜, 等. 最近 140 ka 以来黄土元素地球化学演化及其古气候意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 103-108.
- [15] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1695-1709.
- [16] Liu Z F, Colin C, Huang W et al. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(Q05005): 1525-2027.
- [17] Dong G H, Xia Z K, Elston R et al. Response of geochemical records in lacustrine sediments to climate change and human impact during middle Holocene in Mengjin, Henan Province, China. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(3): 279-285.
- [18] 宫进忠. 华北地区人类文化遗址的地球化学环境演变. *地球科学进展*, 2012, 27(10): 1153-1160.
- [19] 何笃. 都城考古的理论与实践探索—从陶寺城址和二里头遗址都城考古分析看中国早期城市化进程. 见: 中国社会科学院考古研究所夏商周考古研究室. *三代考古*. 北京: 科学出版社, 2009. 3-58.
- [20] 国家文物局. *中国文物地图集—山西分册*. 北京: 中国地图出版社, 2007. 5-8.
- [21] 杨前进, 黄春长, 刘昆, 等. 洪积扇上全新世古土壤的特点及环境意义: 以临汾盆地东坡沟剖面为例. *沉积学报*, 2004, 22(2): 332-336.
- [22] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305-308.
- [23] 黄春长. 渭河流域全新世黄土与环境变迁. *地理研究*, 1989, 8(1): 20-31.
- [24] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. *科学通报*, 1997, 42(23): 2535-2538.
- [25] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 1041-1048.
- [26] 叶玮, Sadaya Y, Shinji K. 中国西风区黄土常量元素地球化学行为与古环境. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 23-29.
- [27] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础. 兰州: 兰州大学出版社, 1997. 1-2.
- [28] 文启忠. *中国黄土地球化学*. 北京: 科学出版社, 1989. 15-60.
- [29] Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in Central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 72: 203-225.
- [30] 郭媛媛, 莫多闻, 毛龙江, 等. 澧阳平原岩板挡剖面地球化学特征与风化强度研究. *地理科学*, 2013, 33(3): 335-341.
- [31] 滕志宏, 申西平. 中国风成黄土及其形成下限研究. *地层学杂志*, 1995, 19(2): 81-87.
- [32] 苏宗正, 王汝雕, 程新原, 等. 临汾盆地的近代地壳运动. *山西地震*, 1995, (3、4): 60-67.
- [33] 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. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(3): 280-298.
- [34] 杨晓燕, 袁仁茂. 全新世时期古水土流失与古人类活动相互影响分析. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 11-14.
- [35] Taylor S, McLennan S. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 1985. 277.
- [36] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, (229): 715-717.
- [37] Buggle B, Glaser B, Hambach U et al. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies.

Quaternary International, 2011, 240(1SI): 12-21.

- [38] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐. 化学蚀变指数 (CIA) 及其在新元古代碎屑岩中的应用. 地学前缘, 2003, 4(10): 539-544.
- [39] 刘安娜. 渭河流域全新世剖面元素地球化学特征与成壤环境变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006. 15-44.
- [40] 杨红瑾. 宁夏长城塬全新世黄土—土壤元素地球化学特征与成壤环境演变研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010. 31-41.
- [41] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. The Journal of Geology, 1996, 104(5): 525-542.
- [42] Cai Y J, Tan L C, Cheng H et al. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 291(1-4): 21-31.
- [43] 吕厚远, 张健平. 关中地区的新石器古文化发展与古环境变化的关系. 第四纪研究, 2008, 28(6): 1050-1060.

Geochemical characteristics of major elements and its paleoenvironmental significance of Holocene loess profile in southern Shanxi, China

LI Tuoyu, MO Duowen, ZHU Gaoru, WANG Haibin, ZHANG Yifei, GUO Yuanyuan

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the analysis of major elements, magnetic susceptibility, grain size and optically stimulated luminescence (OSL) dating of samples from the Zhongliangtiechang (ZLTC) profile in southern Shanxi Province, China, using comprehensive approaches such as Chemical Index of Alteration (CIA), loss and accumulation of major elements relative to UCC, A-CN-K diagram, the geochemical characteristics and its paleoenvironmental significance are discussed. The results show that the chemical compounds consist mainly of SiO_2 , Al_2O_3 , CaO and TFe_2O_3 . The curves of Al_2O_3 , TFe_2O_3 and K_2O have the same trend, and the three elements come out top in paleosol layer when the climate is warm-wet. Ca enriches while Na and K decrease in ZLTC profile relative to UCC, which possibly represents the characteristics of loess in the source region. The climate is the main factor which influences the feldspar weathering process, and the feldspar weathering is mostly showing up to plagioclase feldspar weathering. The profile is in low weathering intensity as a whole, which lies between profiles in Fufeng of Shanxi and Pengyang of Ningxia; the sequence is in accordance with recent climate conditions in the three regions. The paleosol layer is in medium weathering intensity, in which Ca and Na leached greatly; while the loess layer is in low weathering intensity. Geochemical characteristics of major elements indicate that the climate "cool-dry (9.6-10.5 ka BP) \rightarrow warm-wet (4.9-9.5 ka BP) \rightarrow warm-dry (2.5-4.9 ka BP) \rightarrow cool-dry (since 2.5 ka BP)". During 1.2-2.5 ka BP, the content of particles with grain size above 100 μm is the highest, the deposition rate is high, and Ca leaches relatively, which represents the sheet erosion is strong at that time.

Key words: southern Shanxi; Holocene; loess profile; major element; paleoenvironment