

文章编号: 1008-2786-(2020)3-371-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000517

安徽宣城向阳剖面第四纪红土常量元素 地球化学特征及其古气候意义

李文慧^{1,2}, 胡春生^{1,2*}, 田景梅^{1,2}, 曹 乐^{1,2}

(1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖; 2. 安徽省江淮流域地表过程与区域响应重点实验室, 安徽 芜湖)

摘 要: 安徽宣城向阳剖面是我国南方第四纪红土标准剖面, 蕴含着丰富的古环境与古气候信息, 对其进行常量元素地球化学特征及古气候的研究, 对深刻理解该区红土风化成壤强度与古气候演化、充实中国南方第四纪红土的高分辨率研究具有一定意义。本文基于野外地质地貌、岩性调查与加密采样, 运用 ZSX PrimusIV 型 X 射线荧光光谱仪(XRF), 对该剖面进行常量元素测定, 并采用地球化学风化参数指标 CIA 与 BA、元素迁移率等分析方法, 结合前人的年代数据, 探讨了该剖面红土风化特征及古气候意义。研究表明: (1) 向阳剖面常量元素以 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 为主, 具有显著的富硅铝铁化特征, 约 916 ka 以来红土堆积处于相对暖湿的古气候背景下, 但是气候总体有向干凉方向变化的趋势; (2) 约 916 ka 以来研究区古气候大致存在 7 次相对暖湿与相对干凉期的旋回变化; 其中, 阶段 I 至阶段 II 暖湿程度与风化强度较大, 气候向暖湿方向发展, 阶段 III 暖湿程度与风化强度均有所降低, 阶段 IV 暖湿程度与风化强度达到最大, 是最稳定的时期, 阶段 V 至阶段 VII 气候一直向干凉方向变化; (3) 在 6.2 m (约 534 ka 前) 以下部分, 红土成土沉积动力强度较大, 干湿变化比较强烈, 沉积环境不稳定, 而此后红土成土沉积动力减弱, 沉积环境相对稳定。

关键词: 宣城向阳剖面; 第四纪红土; 常量元素; 地球化学风化参数; 古气候变化

中图分类号: P595

文献标志码: A

全球变化研究是在人类赖以生存的地球自然环境的基础上, 对过去进行探讨、与现在进行对比并对未来进行预测的一项工作, 为了揭示气候变化的区域差异和影响机制, 一般是把一定地质时期的古气候、古环境信息进行全球对比^[1]。当前, 国内外学术界对长尺度古气候的研究均十分重视, 并主要关注两极冰盖、深海沉积物以及中国黄土等古气候信息载体, 其中, 作为我国北方典型的陆相沉积物, 北方黄土研究取得了许多开创性的成果, 重建了我国北方第四纪古气候变化的历史^[2-8]。

作为与北方黄土相对应的南方陆相沉积物, 第四纪红土研究相对薄弱, 但其蕴含着丰富的古环境与古气候信息, 对重建我国南方第四纪古环境与古气候具有显著意义^[9]。当前, 基于年代学、沉积学、地球化学与微生物学等方法, 诸多学者对其年代、成因及其环境意义等多方面进行了研究与探索^[10-19], 希望从中提取我国南方第四纪古气候变化的有用信息, 从而能够与北方黄土的“黄土—古土壤”序列进行对比。其中, 安徽宣城的向阳剖面是我国南方第四纪红土的典型剖面, 其所

收稿日期(Received date): 2019-10-09; 改回日期: 2020-05-11

基金项目(Foundation item): 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyqZD2018014); 安徽师范大学博士科研启动基金(2018 XJJ43)。

[Anhui University Outstanding Young Talents Support Program(gxyqZD2018014); Anhui Normal University Doctoral Research Foundation(2018XJJ43)]

作者简介(Biography): 李文慧(1996-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地貌与第四纪环境。[LI Wenhui(1996-), female, born in Anqing, Anhui province, M. Sc. candidate, research on geomorphology and quaternary environment] E-mail: 2560464609@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 胡春生(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 河流地貌与第四纪环境变化。[HU Chunsheng(1978-), male, Ph. D., associate professor, research on river geomorphology and quaternary environmental change] E-mail: huchsh03@163.com

获关注与研究较多,但对于其是否存在多个沉积旋回,是否可以与北方黄土的“黄土—古土壤”对比等则争议较多^[20-22]。

常量元素、微量元素和稀土元素的地球化学分析在南方第四纪红土的研究中发挥着重要作用,其中,红土常量元素的组成、化学蚀变指数(CIA)、风化淋溶系数(BA)等地球化学参数指标,对揭示红土的化学风化阶段、强度与古气候意义等方面有着重要作用^[23]。因此,基于前人研究基础,本研究通过加密采样,对安徽宣城向阳剖面红土常量元素的含量与地球化学参数指标进行详细分析,并结合已有年代数据,探讨该剖面在堆积过程中的古气候变化,这对深刻地理解该区红土风化成壤强度及古气候演化、充实中国南方第四纪红土的高分辨率研究具有一定意义。

1 研究区与剖面

宣城位于安徽省东南部、长江以南,北交芜湖,南临黄山,西接池州,区域范围 $117^{\circ}58' \sim 119^{\circ}40'E$ 、 $29^{\circ}57' \sim 31^{\circ}19'N$,地理位置优越。宣城属亚热带季风气候,四季分明、雨热同期,多年均温为 $15.6^{\circ}C$,年降水量为 $1200 \sim 1500 \text{ mm}$;该区因构造上属扬子准地台地区,受地质构造控制,地势南高北低,北部以平原地貌为主,南部属中低山区。本文所研究的向阳剖面是一个旧石器出土地点^[11],范围为 $118^{\circ}51'54.3''E$ 、 $30^{\circ}52'23.6''N$,位于宣城向阳村砖瓦厂附

近,堆积于长江支流水阳江南岸二级阶地上,垂直高度约 11 m (图1、图2)。

通过野外观测土体颜色、纹理结构及岩性,将剖面自上而下分为现代表土、黄棕色土、均质红土、弱网纹红土、强网纹红土等5层。地层描述如下:①现代表土层,深度 $1 \sim 15 \text{ cm}$,淡棕色,有大量植物根系、虫孔;②黄棕色土层,深度 $15 \sim 220 \text{ cm}$,深黄棕色,土质疏松;③均质红土层,深度 $220 \sim 325 \text{ cm}$,土壤颜色呈较均匀棕色偏浅红色,结构致密,铁锰结核较多,与下层渐变接触,未出现网纹;④弱网纹红土层,深度 $325 \sim 450 \text{ cm}$,红色,质地较粘,有网纹存在,多为斑点状,但相对稀疏;⑤强网纹红土层,深度 $450 \sim 976 \text{ cm}$,赤红色,质地很黏,粒径偏细,有大量条状网纹,胶结紧密,硬度较大,整体性好。

野外采样工作中,从地表开始至剖面 9.76 m 处进行分层采样。其中 $0 \sim 0.8 \text{ m}$ 土层内,每隔 10 cm 进行等间距采样,获得样品8份; 0.8 cm 以下土层,采用 2 cm 等间距加密采样,获得样品448份,全剖面共获得样品456份。

2 研究方法

2.1 常量元素含量指标

一般来说,将在地壳中的总含量占99%左右的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等称为常量元素或主量元素^[24]。

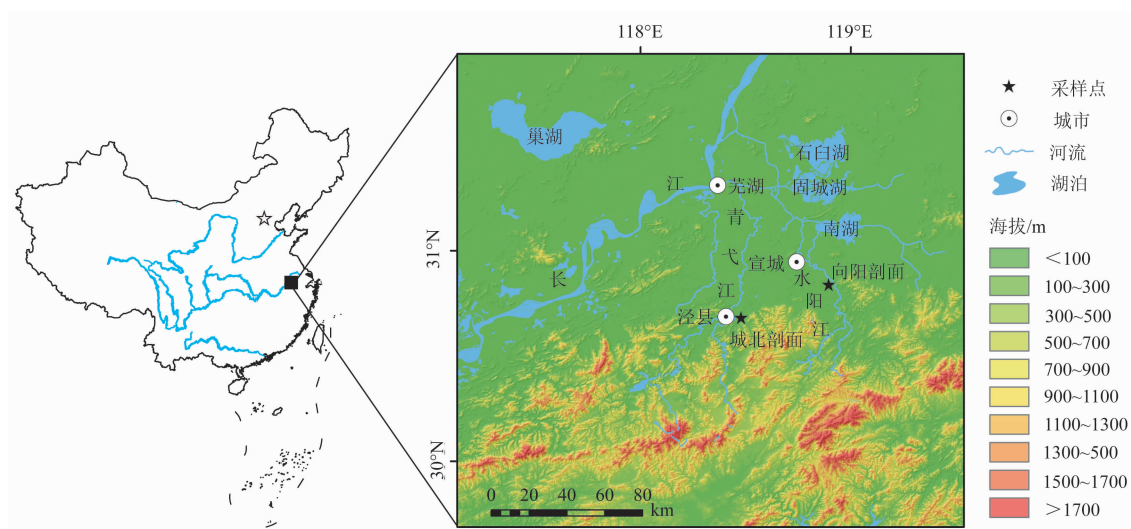


图1 研究区与向阳剖面位置

Fig. 1 Study area and location of Xiangyang section

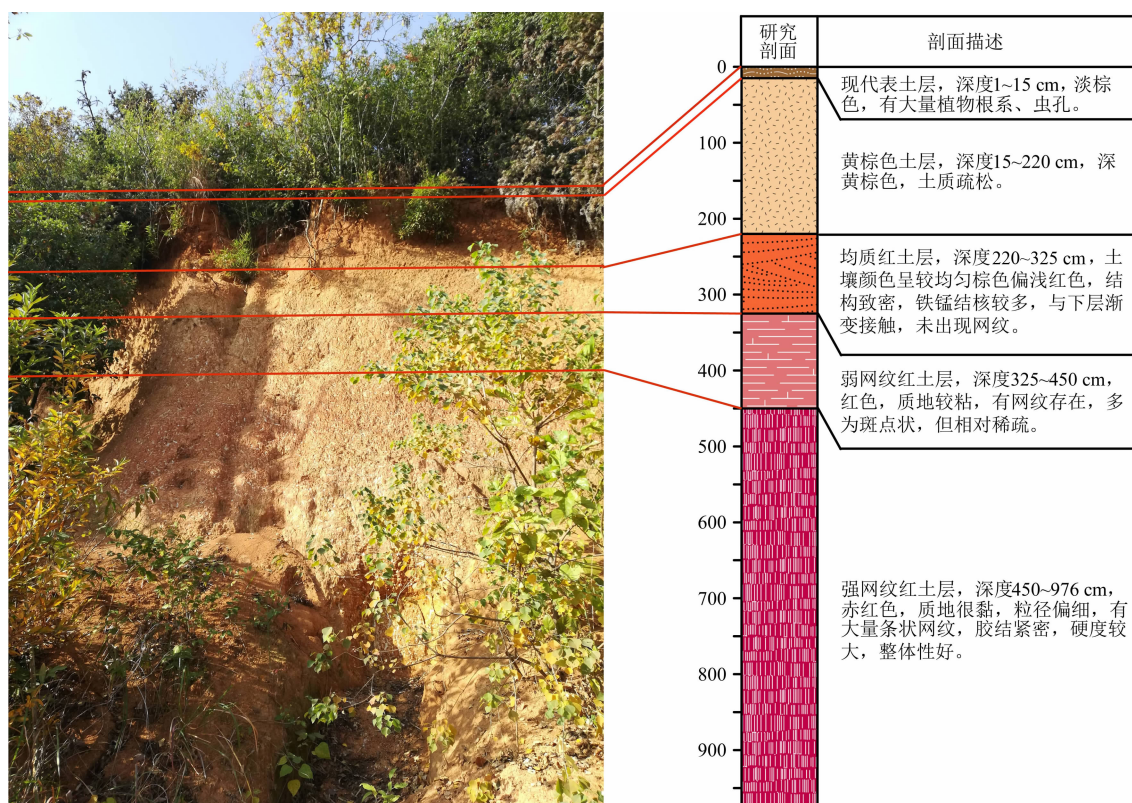


图2 向阳剖面照片与沉积地层结构

Fig. 2 Photos of Xiangyang section and sedimentary stratigraphic structure

将采集的样品在室内置于样品架上自然风干,并清除样品中的杂质(植物根系等)与白色网纹,然后用玛瑙研钵充分研磨,过100目筛;然后取研磨后的样品6~10 g于塑料环中,并用压片机压制成薄片;最后在ZSXPrimusIV型X射线荧光光谱仪(XRF)上进行测试,每个样品测试时间为15 min。主要测试样品中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等7种常量元素的含量,分析剖面常量元素随深度变化,并结合地球化学风化参数指标,提取剖面所蕴含的古气候意义。

2.2 地球化学风化参数指标

本文采用地球化学风化参数有CIA、BA和元素迁移率(δ),对向阳剖面常量元素地球化学特征以及发育过程中的暖湿、干凉变化及化学风化程度进行分析^[16,25-32]。

(1) CIA表征了硅酸盐矿物风化转化成黏土矿物的程度,反映了沉积物形成时的化学风化变化^[16,25]。根据表生环境中元素的地球化学行为可知,暖湿程度越高,化学风化程度越强,对应CIA值越大^[16,31]。根据CIA值大小,将CIA划分为三个阶

段:50~65、65~85、85~100,分别对应寒冷干燥的气候条件下初等的化学风化程度、温暖湿润条件下中等的化学风化程度与炎热潮湿的热带亚热带条件下强烈的化学风化程度^[16,23,27]。计算公式为:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100 \quad (1)$$

(2) BA表征了硅酸盐岩的化学风化强度与盐基的淋溶状况,也反映了活动组分与惰性组分之间的关系,与气候变化有关^[16,29-32]。BA越小,代表了气候暖湿程度愈强,矿物风化程度越高,盐基淋失愈重。反之,气候偏干凉^[29-31]。计算公式为:

$$\text{BA} = [(\text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3] \quad (2)$$

(3) δ 指标表征元素的迁出和富集程度状况,风化过程中,由于沉积物中元素活动性不同,活泼性元素易淋溶迁移出去,稳定性元素则残留富集,这使得元素的绝对含量在反映沉积物风化过程中元素的地球化学行为时发生分异,因此用 δ 指标表征元素的迁出和富集程度^[16,28,32-33]。计算公式为:

$$\delta = (X_s/I_s) / (X_p/I_p) - 1 \quad (3)$$

式中, X_s 、 I_s 分别为样品中元素 X、参比元素 I 的含量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); X_p 、 I_p 分别为原始母质中元素 X 和参比元素 I 的含量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。若 $\delta < 0$, 则元素 X 相对参比元素迁出, 若 $\delta > 0$, 则元素相对富集^[16,31]。由于向阳剖面原始母质不确定, 因此可用剖面中化学风化最弱的地层来代替^[16,31-32]。

3 结果与分析

3.1 常量元素指标

3.1.1 常量元素含量总变化特征

Al_2O_3 含量变化为 $12.04 \sim 15.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含

量为 $14.06 \pm 1.36 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; Fe_2O_3 含量变化为 $5.45 \sim 13.75 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $8.49 \pm 1.43 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量高值多出现于网纹红土层; SiO_2 含量变化为 $58.75 \sim 74.41 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $65.98 \pm 3.27 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 含量低值多出现在网纹红土层; MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量极低, 变化范围分别为 $0.27 \sim 0.58$ 、 $0.30 \sim 0.44$ 、 $0.21 \sim 0.30$ 、 $0.91 \sim 1.71 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量分别为 0.44 ± 0.06 、 0.37 ± 0.10 、 0.23 ± 0.01 、 $1.31 \pm 0.17 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。安徽宣城向阳剖面的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ; 元素含量呈现出 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$ 的规律(图3、表1)。

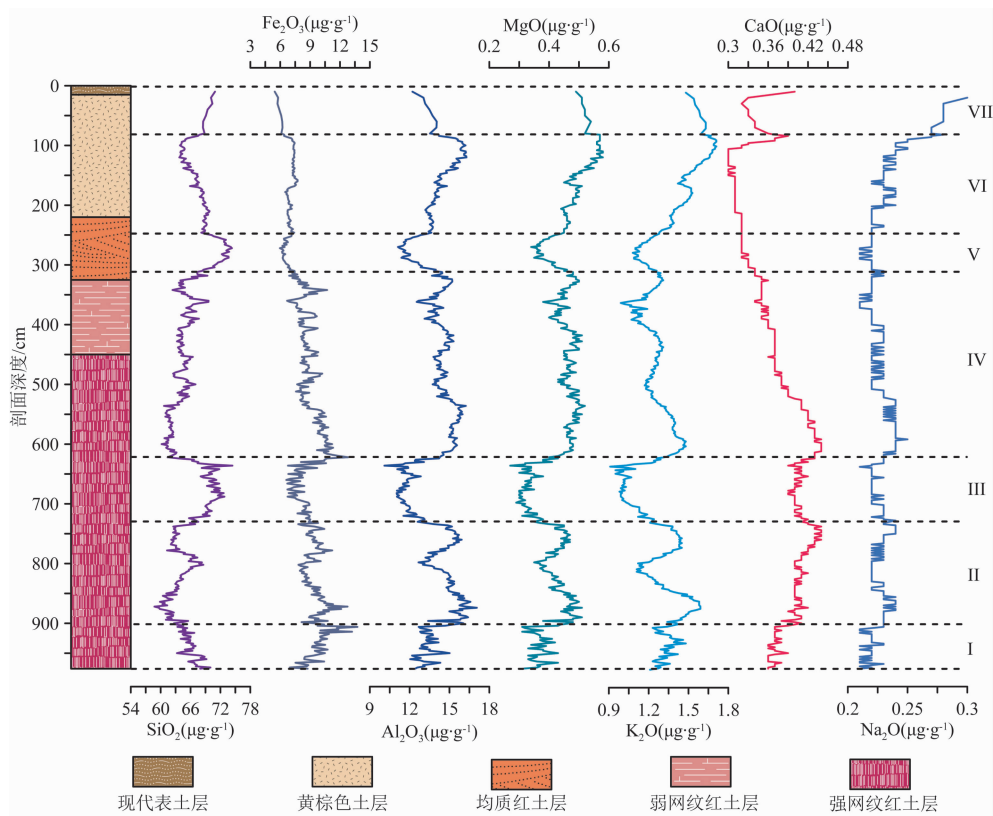


图3 向阳剖面常量元素随深度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of major elements with depth in the Xiangyang section

表1 向阳剖面常量元素总含量

Tab. 1 Total content of major elements in Xiangyang section

单位: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
变化范围	58.75 ~ 74.41	12.04 ~ 15.30	5.45 ~ 13.75	0.27 ~ 0.58	0.30 ~ 0.44	0.21 ~ 0.30	0.91 ~ 1.71
平均值	65.98 ± 3.27	14.06 ± 1.36	8.49 ± 1.43	0.44 ± 0.06	0.37 ± 0.10	0.23 ± 0.01	1.31 ± 0.17
总量	29954.86	6383.96	3853.00	199.53	169.42	103.37	594.87

同时,剖面自下而上,Al₂O₃、Fe₂O₃ 波动变化特征高度一致,含量均呈减小的变化趋势。SiO₂ 含量变化特征则刚好相反。此外,虽然 MgO、K₂O 与 Al₂O₃、Fe₂O₃ 的波动变化特征高度一致,但是其含量却呈上升的变化趋势;Na₂O 含量极低,且曲线变化不明显;CaO 含量波动性不大,但变化趋势较明显,含量从下至上大致呈先上升后下降再上升的变化趋势,剖面下部含量大于剖面上部。

研究表明,沉积物堆积后的环境变化可以由各常量元素含量的垂直变化来反映^[34-35]。Al 元素一般以 Al₂O₃ 的形式存在于沉积地层之中,在温暖潮湿的气候条件下易富集,而在干旱气候条件下含量则降低;Fe₂O₃ 与 Al₂O₃ 相似,风化过程中氧化作用越强,Fe₂O₃ 含量越高,反之,含量越低;Si 在地层中含量最多,并以 SiO₂ 形式保留在沉积层中,在剖面中含量的变化往往与 Al₂O₃、Fe₂O₃ 呈负相关关系;Ca、Mg、K、Na 化学性质较活跃,在湿润的气候环境下,CaO、MgO、K₂O、Na₂O 易被溶解和迁移,而在干旱气候环境下则易富集^[20]。

3.1.2 常量元素分段变化特征

根据常量元素含量随深度的变化情况,可分成 7 个阶段来分析。自下而上分别为:阶段 I(9.76 ~

9 m)、阶段 II(9 ~ 7.28 m)、阶段 III(7.28 ~ 6.2 m)、阶段 IV(6.2 ~ 3.1 m)、阶段 V(3.1 ~ 2.46 m)、阶段 VI(2.46 ~ 0.8 m)和阶段 VII(0.8 ~ 0 m)(表 2)。

以 Al₂O₃ 含量曲线为例(图 3),阶段 I,Al₂O₃ 含量较高,曲线大致呈波动上升趋势,且此阶段波动幅度较大,频率较高;阶段 II,Al₂O₃ 含量较阶段 I 有所增加,且达到最高值,曲线在 9 ~ 8.55 m 处波动幅度、频率均较大,8.55 ~ 7.28 m 处波动幅度、频率有所减小;阶段 III,Al₂O₃ 含量较阶段 II 有所减少,且大致呈先上升后下降的峰型变化形式,峰值出现在约 6.5 m 处,为 12.22 μg · g⁻¹,且此阶段波动幅度、频率均较大;阶段 IV,Al₂O₃ 含量较高,含量维持在 14 μg · g⁻¹ 左右;阶段 V,Al₂O₃ 含量曲线在此阶段表现为先下降后上升的谷型变化形式,谷值出现在约 2.58 m 处,为 11.12 μg · g⁻¹,波动幅度较小,频率较低;阶段 VI,Al₂O₃ 含量曲线在此阶段表现为先上升后下降的峰型变化,峰值出现在约 1.16 m 处,为 16.10 μg · g⁻¹;阶段 VII,Al₂O₃ 含量曲线呈下降的变化趋势,波动幅度最小,频率最低。阶段 I 至阶段 VII,Fe₂O₃、K₂O、MgO 波动变化特征与 Al₂O₃ 相似,SiO₂ 波动变化特征与 Al₂O₃ 刚好相反,CaO、Na₂O 波动变化特征不明显。

表 2 向阳剖面各阶段常量元素含量

Tab. 2 Contents of major elements in Xiangyang section at each stage

单位:μg · g⁻¹

阶段		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
阶段 VII	平均值	69.47 ± 0.91	13.40 ± 0.60	5.94 ± 0.27	0.52 ± 0.01	0.34 ± 0.03	0.28 ± 0.01	1.57 ± 0.05
	变化范围	68.49 ~ 70.91	12.21 ~ 14.04	5.45 ~ 6.23	0.49 ~ 0.54	0.32 ~ 0.40	0.27 ~ 0.30	1.48 ~ 1.63
阶段 VI	平均值	67.07 ± 1.89	14.52 ± 0.97	7.12 ± 0.32	0.50 ± 0.05	0.32 ± 0.02	0.23 ± 0.01	1.51 ± 0.12
	变化范围	63.75 ~ 69.82	13.18 ~ 16.28	6.39 ~ 7.75	0.44 ~ 0.58	0.30 ~ 0.39	0.22 ~ 0.27	1.28 ~ 1.71
阶段 V	平均值	72.04 ± 1.63	12.18 ± 0.76	6.57 ± 0.35	0.39 ± 0.03	0.33 ± 0.01	0.22 ± 0.00	1.17 ± 0.05
	变化范围	68.34 ~ 74.31	11.12 ~ 13.97	5.97 ~ 7.43	0.34 ~ 0.46	0.32 ~ 0.34	0.21 ~ 0.23	1.08 ~ 1.26
阶段 IV	平均值	64.11 ± 1.91	14.66 ± 0.78	8.97 ± 1.08	0.47 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.23 ± 0.01	1.27 ± 0.10
	变化范围	60.19 ~ 69.62	12.53 ~ 16.23	6.69 ~ 11.96	0.38 ~ 0.52	0.34 ~ 0.44	0.21 ~ 0.25	0.99 ~ 1.48
阶段 III	平均值	69.61 ± 2.23	11.88 ± 0.75	8.27 ± 1.19	0.33 ± 0.03	0.41 ± 0.01	0.22 ± 0.01	1.07 ± 0.09
	变化范围	61.39 ~ 74.41	10.10 ~ 14.27	6.61 ~ 12.82	0.27 ~ 0.43	0.39 ~ 0.43	0.21 ~ 0.24	0.91 ~ 1.29
阶段 II	平均值	63.45 ± 2.10	14.98 ± 0.97	9.43 ± 0.94	0.44 ± 0.04	0.41 ± 0.01	0.23 ± 0.01	1.37 ± 0.13
	变化范围	58.75 ~ 68.57	12.60 ~ 17.06	7.81 ~ 12.76	0.35 ~ 0.51	0.38 ~ 0.44	0.22 ~ 0.24	1.11 ~ 1.59
阶段 I	平均值	66.00 ± 1.67	13.34 ± 0.75	9.86 ± 1.34	0.37 ± 0.03	0.37 ± 0.01	0.22 ± 0.01	1.33 ± 0.06
	变化范围	63.10 ~ 69.99	12.04 ~ 17.06	6.96 ~ 13.75	0.31 ~ 0.44	0.36 ~ 0.40	0.21 ~ 0.23	1.21 ~ 1.48

同时,阶段 I 至阶段 VII,常量元素含量曲线大致呈现出 7 个波动旋回,且需要指出的是,常量元素含量曲线在阶段 III(6.2 m)上下发生显著变化,6.2 m 以下部分(阶段 I~阶段 III)曲线波动幅度与频率明显增大,6.2 m 以上部分(阶段 IV~阶段 VII)曲线波动幅度与频率明显减小。

3.2 地球化学风化参数变化特征

3.2.1 地球化学风化参数总变化特征

从整个剖面来看,CIA 均较大,变化范围为 84.85~89.48,平均值为 88.01,高值多出现在网纹红土层;BA 均较小,总体呈上升趋势,变化范围为 0.15~0.22,平均值为 0.17,低值多出现在网纹红土层;剖面自下而上,CIA 总体呈下降趋势,BA 总体呈上升趋势(图 4、表 3)。

由实验数据得出,编号 XC 顶 08 号样品 CIA 最小,为 84.85,BA 值最大,为 0.22,即风化程度最弱,可近似代表原始母质。本文以 Zr 作为参比元素,计算常量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 的 δ 值,对元素在剖面的迁出与富集程度进行分析与判断。

常量元素迁移情况以 $\delta(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\delta(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $\delta(\text{SiO}_2)$ 最具代表意义。以 Zr 为参比元素的剖面迁移特征表明, $\delta(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 $-0.22 \sim 0.44$,平均值为 0.12,除少量样品 δ 值小于 0 外,其余均大于零,表示 Al_2O_3 以富集为主,伴有少量迁出; $\delta(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 变化范围为 $0.00 \sim 0.99$,平均值为 0.48,迁移率均大于 0,表现为明显的富集; $\delta(\text{SiO}_2)$ 值变化

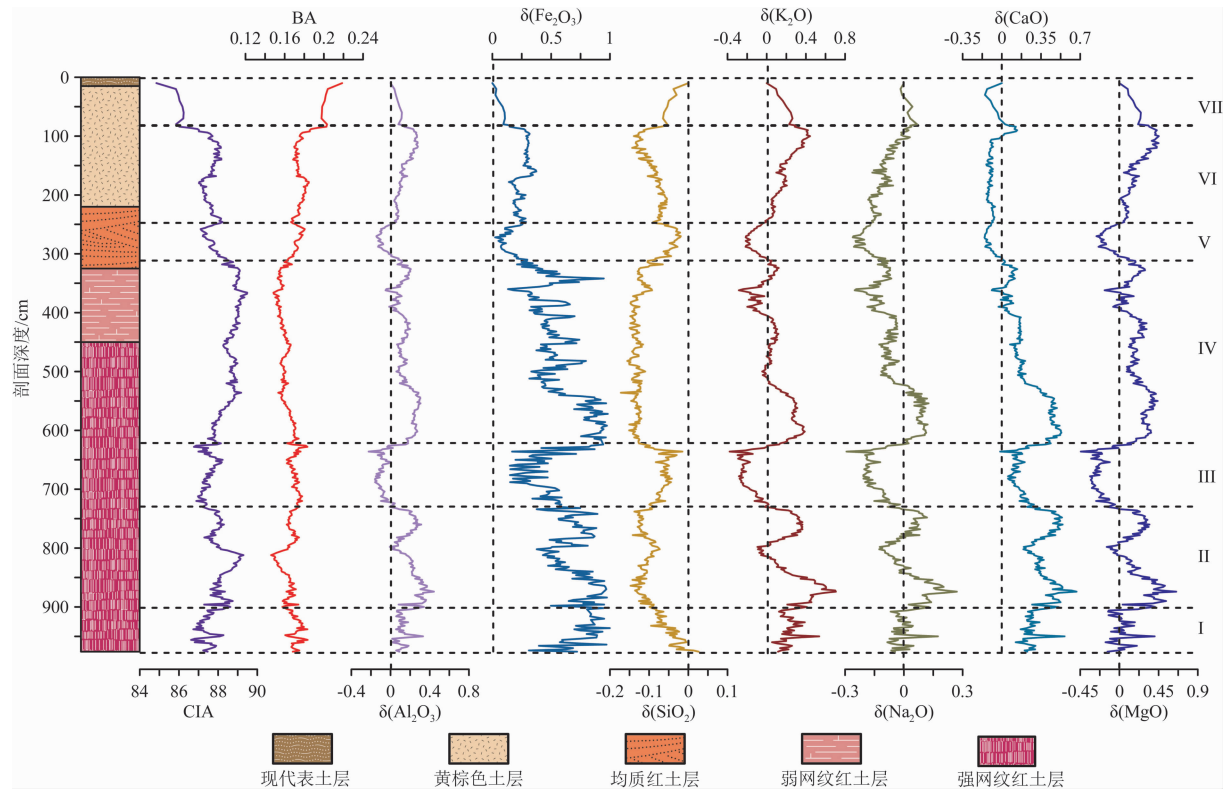


图 4 向阳剖面地球化学风化参数随深度变化

Fig. 4 Variation of geochemical weathering parameters with depth in the Xiangyang section

表 3 向阳剖面地球化学风化参数总变化

Tab. 3 Total variation of geochemical weathering parameters in the Xiangyang section

地球化学 风化参数	CIA	BA	δ						
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
平均值	88.01	0.17	-0.10	0.12	0.48	0.12	0.17	-0.06	0.11
变化范围	84.85~89.48	0.15~0.22	-0.17~0.03	-0.22~0.44	0.00~0.99	-0.44~0.65	-0.16~0.67	-0.29~0.27	-0.38~0.71

范围为 $-0.17 \sim 0.03$, 平均值为 -0.1 , 除个别样品大于 0 外, 其余均小于 0, 表现为明显的迁出。剖面自下而上, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的富集程度与 SiO_2 的迁出程度在逐渐减小。 $\delta(\text{MgO})$ 、 $\delta(\text{CaO})$ 、 $\delta(\text{Na}_2\text{O})$ 、 $\delta(\text{K}_2\text{O})$ 变化范围分别为 $-0.44 \sim 0.65$ 、 $-0.16 \sim 0.67$ 、 $-0.29 \sim 0.27$ 、 $-0.38 \sim 0.71$, 平均值分别为 0.12 、 0.17 、 -0.06 、 0.11 , 相对于 Zr 元素有富集也有迁出。

3.2.2 地球化学风化参数阶段性变化特征

与常量元素含量曲线一样, CIA、BA、 δ 曲线自下而上也大致划分为 7 个阶段。其中, 阶段 I, CIA 较高, 曲线大致呈波动上升趋势, 且此阶段 CIA 波动幅度较大、频率较高, 与常量元素含量曲线波动幅度、频率相似; 阶段 II, CIA 较阶段 I 有所增加, CIA 在 $9 \sim 8.55 \text{ m}$ 处波动幅度、频率均较大, $8.55 \sim 7.28 \text{ m}$ 处波动幅度、频率均有所减小; 阶段 III, CIA 较阶段 II 有所减小, 且大致呈先上升后下降的峰型变化形式, 峰值出现在约 6.5 m 处, 为 88.23 , 此阶段波动幅度较大, 频率较高; 阶段 IV, CIA 平均值在 7 个阶段中最大, 为 88.65 ; 阶段 V, CIA 曲线在此阶段表现为先下降后上升的谷型变化形式, 谷值出现

在约 2.58 m 处, 为 87.11 , 波动幅度较小, 频率较低; 阶段 VI, CIA 曲线在此阶段表现为先上升后下降的峰型变化, 峰值出现在约 1.16 m 处, 为 88.03 ; 阶段 VII, CIA 曲线呈下降趋势, 波动幅度最小, 频率最低, 且平均值最小, 为 85.90 。而 BA 各个阶段的变化与 CIA 刚好相反(图 4、表 4)。

阶段 I 至阶段 II, Al_2O_3 以富集为主, 富集程度较高, 且阶段 II 富集程度较阶段 I 有所增加; 阶段 III, Al_2O_3 以迁出为主; 阶段 IV, Al_2O_3 富集明显; 阶段 V, Al_2O_3 以迁出为主; 阶段 VI 至阶段 VII, Al_2O_3 以富集为主, 但富集程度呈减小的变化趋势。阶段 I 至阶段 II, Fe_2O_3 富集程度均较高; 阶段 III, Fe_2O_3 富集程度有所减小; 阶段 IV, Al_2O_3 富集程度较阶段 III 有所增加; 阶段 V 至阶段 VII 富集程度呈减小的变化趋势。阶段 I, SiO_2 迁出程度较高; 阶段 II, SiO_2 迁出程度较阶段 I 有所增加; 阶段 III, SiO_2 迁出程度有所减少; 阶段 IV, SiO_2 迁出程度达到最大; 阶段 V 至阶段 VII, SiO_2 迁出程度呈减小的变化趋势。 K_2O 、 MgO 的迁出主要在阶段 III、阶段 IV 的上部以及阶段 V, 且阶段 III 迁出率最高; Na_2O 的迁出主要在阶段 III 至阶段 VI; CaO 的迁出主要在阶段 V 至阶段 VI。

表 4 向阳剖面地球化学风化参数阶段性变化

Tab.4 Periodic changes of geochemical weathering parameters in the Xiangyang section

阶段		CIA	BA	δ						
				SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
阶段 VII	平均值	85.90	0.20	-0.04	0.07	0.06	0.16	-0.06	0.02	0.16
	变化范围	84.85 ~ 86.24	0.20 ~ 0.22	-0.06 ~ 0.00	0.00 ~ 0.12	0.00 ~ 0.11	0.10 ~ 0.25	-0.15 ~ 0.03	-0.02 ~ 0.17	0.00 ~ 0.26
阶段 VI	平均值	87.85	0.18	-0.09	0.14	0.26	0.21	-0.08	-0.09	0.19
	变化范围	86.00 ~ 88.23	0.11 ~ 0.20	-0.14 ~ 0.05	0.04 ~ 0.28	0.14 ~ 0.37	0.01 ~ 0.45	-0.14 ~ 0.14	-0.18 ~ 0.04	-0.01 ~ 0.44
阶段 V	平均值	87.68	0.17	-0.04	-0.06	0.14	-0.12	-0.10	-0.20	-0.13
	变化范围	87.11 ~ 88.43	0.16 ~ 0.18	-0.08 ~ 0.02	-0.15 ~ 0.08	0.02 ~ 0.29	-0.26 ~ 0.11	-0.16 ~ 0.01	-0.26 ~ -0.09	-0.22 ~ 0.01
阶段 IV	平均值	88.65	0.16	-0.13	0.16	0.57	0.20	0.21	-0.04	0.08
	变化范围	87.48 ~ 89.48	0.15 ~ 0.17	-0.17 ~ -0.07	-0.05 ~ 0.31	0.13 ~ 0.98	-0.17 ~ 0.44	-0.09 ~ 0.53	-0.25 ~ 0.13	-0.28 ~ 0.39
阶段 III	平均值	87.48	0.17	-0.07	-0.07	0.43	-0.22	0.16	-0.15	-0.17
	变化范围	86.76 ~ 88.23	0.16 ~ 0.18	-0.13 ~ 0.02	-0.22 ~ 0.18	0.15 ~ 0.94	-0.44 ~ 0.13	-0.02 ~ 0.44	-0.29 ~ 0.02	-0.38 ~ 0.14
阶段 II	平均值	88.18	0.16	-0.11	0.22	0.69	0.22	0.40	0.04	0.26
	变化范围	87.20 ~ 89.29	0.15 ~ 0.17	-0.15 ~ 0.07	-0.01 ~ 0.44	0.38 ~ 0.97	-0.15 ~ 0.65	0.19 ~ 0.67	-0.13 ~ 0.27	-0.10 ~ 0.71
阶段 I	平均值	87.43	0.17	-0.05	0.12	0.76	0.03	0.26	-0.01	0.22
	变化范围	86.62 ~ 88.39	0.16 ~ 0.18	-0.10 ~ 0.03	0.01 ~ 0.33	0.31 ~ 0.99	-0.16 ~ 0.40	0.12 ~ 0.56	-0.08 ~ 0.17	0.05 ~ 0.54

同时,地球化学风化参数曲线自下而上大致呈现出 7 个波动旋回,且需要指出的是,地球化学风化参数曲线在阶段 III(6.2 m)上下发生显著变化,6.2 m 以下部分(阶段 I~阶段 III)曲线波动幅度与频率明显增大,6.2 m 以上部分(阶段 IV~阶段 VII)曲线波动幅度与频率明显减小。

4 讨论

4.1 剖面年代数据的估算

学者们对于向阳剖面年代的确定已经做了大量的研究^[9,11,36-38],本文基于前人的研究基础,选取其绝对年代数据,从而得到研究剖面的年代控制点,即深度 0.4、0.8、2.4、8.4 和 9.1 m 的年代分别为 18、41、110、780 和 850 ka^[11,36-38]。基于这些年代控制点,采用线性内插法和外推法建立了剖面各阶段的年代-深度模式,估算得出 9.76、9.728、6.2、3.1、2.46、0.8 m 处年代大致分别对应于 916、840、655、534、188、116 和 41 ka(表 5)。根据上述年代估算值,采样深度为 9.76 m 的向阳剖面开始堆积于约 916 ka。

表 5 向阳剖面各阶段年代-深度模式

Tab. 5 Time - depth model of each stage in the Xiangyang section

阶段	深度范围/m	年代区间/ ka
阶段 VII	0.80 ~ 0.00	41 ~ 0
阶段 VI	2.46 ~ 0.80	116 ~ 41
阶段 V	3.10 ~ 2.46	188 ~ 116
阶段 IV	6.20 ~ 3.10	534 ~ 188
阶段 III	7.28 ~ 6.20	655 ~ 534
阶段 II	9.00 ~ 7.28	840 ~ 655
阶段 I	9.76 ~ 9.00	916 ~ 840

4.2 向阳剖面蕴含的古气候意义

4.2.1 总体特征所反映的古气候意义

向阳剖面红土,以粉砂质粘土及粘土为主,质地黏,粒径细,胶结紧密,硬度较大,整体性较好,整体以红色为主,颜色较亮,而形成于较干冷气候下的北方黄土,质地较松散,胶结度较低,颜色以灰黄色、棕色为主^[39];且基于常量元素的环境学意义以及年代估算值,通过对向阳剖面 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO、CaO 和 Na₂O 七种常量元素进行分析,发现向

阳剖面主要化学成分为 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃,说明该剖面具有显著的富硅铁铝化特征;同时,结合剖面的高 CIA 值以及常量元素迁移情况,得出剖面 SiO₂ 迁出明显,但整体依旧以 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 三者含量居多。上述特征表明约 916 ka 以来该剖面红土整体形成于相对暖湿的古气候背景下^[20,40-41]。

同时,剖面自下而上土壤颜色逐渐由赤红色向黄棕色、淡棕色转变,土壤胶结度逐渐降低,土质逐渐疏松,灰白色的网纹逐渐由较大的条状向较小的斑点状转变,数量由多至少,均质红土层以上灰白色的网纹消失不见;SiO₂、MgO、K₂O、Na₂O、BA 呈现上升现象,而 Al₂O₃、Fe₂O₃、CIA 呈现下降现象,Fe₂O₃、Al₂O₃ 的富集程度与 SiO₂ 的迁出程度在逐渐减小,表明约 916 ka 以来该剖面所反映的暖湿程度和风化强度均发生减弱趋势,暗示了古气候虽然总体上仍处于暖湿状态,但有趋于干凉的变化趋势。该结论也验证了前人的相关研究成果,其认为研究区古气候自早更新世晚期以来虽然发生多次波动,但在早、中更新世的大部分时间里,气候都比现在更为暖湿^[10,20,38]。至于 CaO 的变化趋势,则较为异常。一般而言,CaO 高含量指示干凉的气候环境^[20],但该剖面 CaO 下部含量反而高于剖面上部。该异常现象很可能是由于该区处于江南亚热带地区,即使是在干凉时期,其暖湿程度也不会很低,而较多的降水使表层 CaO 淋溶下渗到较低的位置淀积,进而造成剖面中出现 Ca 含量随地层深度增加而递增的现象^[20]。这也从另一个侧面支持了上述研究区古气候总体较为暖湿且趋于干凉的基本结论。

4.2.2 各阶段所反映古气候意义

如前所述,尽管约 916 ka 以来研究区在暖湿程度和风化强度方面均具有总体减弱的趋势,但是在此期间仍然可以划分出 7 个主要的古气候阶段,表明研究区古气候曾发生过多次较显著的相对暖湿期与相对干凉期的变化,同时每个阶段也存在一些小的内部波动。

阶段 I:通过野外观察可以看出,该段土壤位于强网纹红土层底部,以粉砂质粘土及粘土为主,质地黏,粒径细,胶结紧密,硬度较大,整体性好,赤红色的红土与大量的白色网纹相交错,颜色较亮;Al₂O₃、CIA 较高,且自下而上呈上升趋势;Al₂O₃、Fe₂O₃ 富集程度与 SiO₂ 迁出程度较高,且此阶段各常量元素波动频率均较高。因此,可以推断研究区古气候在

该阶段应该处于相对暖湿期,风化强度较大,且其成土环境变化强烈,并且有向暖湿方向发展的趋势。

阶段 II:为强网纹红土层中下部,土壤颜色较阶段 I 深、亮,以粘土为主,质地较阶段 I 黏,粒径较阶段 I 细,9~8.55 m 有大量条状网纹,8.55~7.28 m 网纹有所减少,胶结紧密,硬度大,整体性好; Al_2O_3 、CIA 相对于阶段 I 有所上升; SiO_2 迁出程度与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 富集程度较阶段 I 有所增加;常量元素与 CIA 曲线在 9~8.55 m 处波动幅度、频率大于 8.55~7.28 m。因此,可以推断阶段 II 相较阶段 I,其研究区古气候暖湿程度、风化强度均有所增加。其中,9~8.55 m 红土成土沉积动力强度较大,环境变化比较强烈,而 8.55~7.28 m 沉积动力减弱、沉积环境相对稳定。

阶段 III:强网纹红土层中部,土壤颜色较阶段 II 浅、暗,条状网纹较阶段 II 少,质地较黏,胶结较紧密,硬度较大,整体性较好;CIA、 Al_2O_3 相对于阶段 II 有所下降; Al_2O_3 以迁出为主, Fe_2O_3 富集程度与 SiO_2 迁出程度相对于阶段 II 有所减小;其中,在 7.28~6.5 m 处,CIA、 Al_2O_3 呈上升趋势,而 6.5~6.2 m 与之相反,表明阶段 III 较阶段 II 暖湿程度、风化强度有所减小,且 7.28~6.5 m 研究区古气候暖湿程度、风化强度均呈上升趋势,而 6.5~6.2 m 暖湿程度、风化强度则呈下降趋势。

阶段 IV:包含强网纹红土层顶部、弱网纹红土层及均质红土层底部,此阶段网纹稀疏,且多为斑点状,土壤颜色、质地较均匀,出现大量铁锰结核等黑色物质;CIA、 Al_2O_3 在 7 个阶段中最大; SiO_2 迁出程度达到最大, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 富集明显;而且,上述各值相对稳定、波动幅度比较小。因此,可以推断 6.2~3.1 m 研究区古气候暖湿程度、风化强度均达到最大,并且是约 916 ka 以来最为稳定的古气候时期。

阶段 V 至阶段 VII:包含均质红土层大部、黄棕色土层及现代表土层,无网纹,土壤颜色渐渐由红色向黄棕色、淡棕色转变,土质胶结度降低,渐渐疏松,现代表土层处出现大量植物根系及虫孔; Al_2O_3 含量较低;CIA 持续减小;约 2.58 m (130 ka) 处, Al_2O_3 、CIA 为谷值,1.16 m (56 ka) 处, Al_2O_3 、CIA 为峰值;其中 3.1~2.58 m, Al_2O_3 、CIA 呈下降趋势,2.58~1.16 m, Al_2O_3 、CIA 呈上升趋势,1.16~0 m, Al_2O_3 、CIA 则又呈下降趋势。因此可以推断,约

188 ka 以来气候向干凉转变,且 3.1~0 m 研究区古气候有干凉~暖湿~干凉的变化。

综上所述,向阳剖面红土发育时期古气候存在多次暖湿与相对干凉期的旋回变化,阶段 I 至阶段 IV 红土发育时期至少存在 4 次气候的暖湿与相对干凉期的旋回变化,阶段 V 至阶段 VII 红土发育时期也至少存在 3 次,表明约 916 ka 以来研究区古气候存在约 7 次暖湿与相对干凉期的旋回变化。该结论与其他研究者对向阳剖面 $\delta^{13}\text{C}^{[9]}$ 、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}[42]$ 、色度^[43]等相关研究基本一致。同时,各曲线变化趋势在 6.2 m (约 534 ka) 上下发生显著变化,6.2 m 以下部分(阶段 I~阶段 III)曲线波动幅度与频率明显增大,6.2 m 以上部分(阶段 IV~阶段 VII)曲线波动幅度与频率明显减小,反映了约 534 ka 前研究区红土成土沉积动力强度较大,干湿变化比较强烈,沉积环境不稳定,而此后红土成土沉积动力减弱,沉积环境相对稳定。这种变化现象可能反映了强烈的淋溶与土壤的干湿交替作用是网纹红土发育的重要动力^[16,20,44]。

5 结论

通过对宣城向阳红土剖面常量元素含量的分析,并采用元素地球化学参数 CIA 与 BA 值、元素迁移率等指标,并基于前人的年代数据,初步探讨了该剖面元素地球化学特征及其所蕴含的古气候信息,并得到以下一些认识。

(1) 向阳剖面常量元素以 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 为主,具有显著的富硅铝铁化特征,表明了约 916 ka 以来该红土堆积于相对暖湿的古气候背景下。但是,剖面自下而上 CIA、脱硅富铁铝程度等逐渐减小,BA 与 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 等逐渐增大,亦表明约 916 ka 以来研究区古气候暖湿程度、风化强度逐渐降低,有向干凉方向变化的趋势。

(2) 约 916 ka 以来研究区古气候主要存在约 7 次相对暖湿与相对干凉期的旋回变化。其中,阶段 I 至阶段 II 暖湿程度与风化强度较大,气候向暖湿方向发展,阶段 III 暖湿程度与风化强度有所降低,阶段 IV 暖湿程度与风化强度达到最大,是最稳定的时期,阶段 V 至阶段 VII 气候一直向干凉方向变化。

(3) 向阳剖面在 6.2 m (约 534 ka) 上下各指标变化趋势发生显著变化,6.2 m 以下波动幅度与频

率明显增大,6.2 m 以上部分曲线波动幅度与频率明显减小,反映了约 534 ka 前研究区红土成土沉积动力强度较大,干湿变化比较强烈,沉积环境不稳定,而此后红土成土沉积动力减弱,沉积环境相对稳定。

本文以安徽宣城向阳剖面为例,对其常量元素含量进行了检测,尝试讨论了安徽宣城向阳剖面所蕴含的古气候信息,对研究中国南方古气候演化具有一定参考价值,但是由于资料有限,文中对向阳剖面物源、成因等的研究还未涉及,还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 杜艳. 中国长江流域第四纪红土年代学研究及末次间冰期以来古气候演变[D]. 上海: 上海大学, 2013. [DU Yan. OSL dating of the quaternary red clay distributed in the reaches of the Yangtze River and paleoclimatic changes since the Last Interglacial period in mid-subtropical southeast China [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013]
- [2] 张浣荻, 郝青振. 深海和冰芯证据指示氧同位素阶段 MIS 11 ~ 10 时期北极冰盖增长滞后[J]. 第四纪研究, 2019, **39**(3): 786 – 788. [ZHANG Huandi, HAO Qingzhen. Marine and ice core evidence confirms delayed buildup of arctic ice sheets during the MIS 11 ~ 10 [J]. Quaternary Sciences, 2019, **39**(3): 786 – 788]
- [3] 曲华祥, 黄宝琦. 南海北部 MD12 – 3432 站深海氧同位素 MIS6 期到 MIS5 期陆源沉积物元素比值反映的古气候变化[J]. 地学前缘, 2019, **26**(3): 236 – 242. [QU Huaxiang, HUANG Baoqi. Paleoclimate change reflected by element ratios of terrigenous sediments from deep-sea oxygen isotope MIS6 to MIS5 at MD12 – 3432 station in northern South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2019, **26**(3): 236 – 242]
- [4] 董飞银, 徐元芹, 李萍, 等. 南海北部陆坡 DLW3101 孔 MIS5 期以来的古海洋学信息[J]. 海洋科学进展, 2019, **37**(3): 432 – 441. [DONG Feiyin, XU Yuanqin, LI Ping, et al. Paleocceanographic information of the core DLW3101 in the northern slope of the South China Sea since MIS5 [J]. Advances in Marine Science, 2019, **37**(3): 432 – 441]
- [5] 王兆夺, 黄春长, 周亚利, 等. 关中东部全新世黄土 – 古土壤序列粒度组分变化特征及古气候意义[J]. 地球科学进展, 2018, **33**(3): 293 – 304. [WANG Zhaoduo, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Characteristics of Holocene loess-paleosol particle size composition and paleoclimatic significance in east Guanzhong, Shanxi province [J]. Advances in Earth Science, 2018, **33**(3): 293 – 304]
- [6] 宋友桂, 宗秀兰, 李越, 等. 中亚黄土沉积与西风区末次冰期快速气候变化[J]. 第四纪研究, 2019, **39**(3): 535 – 548. [SONG Yougui, ZONG Xiulan, LI Yue, et al. Loss sediments and rapid climate oscillation during the Last Glacial period in the westerlies-dominated Central Asia [J]. Quaternary Sciences, 2019, **39**(3): 535 – 548]
- [7] 胡斐南, 赵世伟, 常闻谦, 等. 淳化黄土 – 古土壤序列黏土矿物分布特征及古环境意义[J]. 土壤学报, 2018, **55**(5): 1062 – 1073. [HU Feinan, ZHAO Shiwei, CHANG Wenqian, et al. Distribution of clay minerals in the Chunhua loess-paleosol sequence and its paleoenvironmental significance [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(5): 1062 – 1073]
- [8] 李越, 宋友桂, 王千锁. 新疆昭苏黄土剖面色度变化特征及古气候意义[J]. 地球环境学报, 2014, **5**(2): 67 – 75. [LI Yue, SONG Yougui, WANG Qiansuo. Chroma characteristics in the Zhaosu loess section and its paleoclimatic significance [J]. Journal of Earth Environment, 2014, **5**(2): 67 – 75]
- [9] 赵其国, 杨浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究[J]. 第四纪研究, 1995, **15**(2): 107 – 116. [ZHAO Qiguo, YANG Hao. A preliminary study on red earth and changes of quaternary environment in South China [J], Quaternary Sciences, 1995, **15**(2): 107 – 116]
- [10] 杨达源, 韩辉友, 周旅复, 等. 安徽宣城地区中晚更新世风成堆积与环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, **11**(2): 97 – 104. [YANG Dayuan, HAN Huiyou, ZHOU Lvfu, et al. Eolian deposit and environmental change of Middle-Late Pleistocene in Xuancheng, Anhui province south of the lower reaches of the Yangtze River [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, **11**(2): 97 – 104]
- [11] 杨浩, 赵其国, 李小平, 等. 安徽宣城风成沉积 – 红土系列剖面 ESR 年代学研究[J]. 土壤学报, 1996, **33**(3): 293 – 300. [YANG Hao, ZHAO Qiguo, LI Xiaoping, et al. ESR dating of eolian sediment and red earth series from Xuancheng profile in Anhui province [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, **33**(3): 293 – 300]
- [12] 蔡方平, 胡雪峰, 杜艳, 等. 安徽郎溪黄棕色土 – 红土二元结构土壤剖面的成因与长江流域第四纪晚期古气候演变[J]. 土壤学报, 2012, **49**(2): 220 – 229. [CAI Fangping, HU Xuefeng, DU Yan, et al. Pedogenesis of yellow-brown earth-red clay profile in Langxi county, Anhui province and paleoclimatic change in the Yangtze River valley, southeast China in the late quaternary period [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(2): 220 – 229]
- [13] 牛东风, 李保生, 舒培仙, 等. 佛山西樵山及邻近地区 MIS5a 红土中主量元素含量特征及其古气候意义[J]. 地质论评, 2019, **65**(5): 1217 – 1228. [NIU Dongfeng, LI Baosheng, SHU Peixian, et al. Climate environment during MIS5a from Xiqiaoshan and its adjacent areas of Guangdong province: evidence from major element oxides in red clay and paleontology [J]. Geological Review, 2019, **65**(5): 1217 – 1228]
- [14] 曾永耀, 高磊, 赵文青, 等. 中国南方红土磁化率的古气候意义研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(5): 133 – 139.

- [ZENG Yongyao, GAO Lei, ZHAO Wenqing, et al. Study on the paleoclimate implications of magnetic susceptibility of the red soils in southern China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(5): 133–139]
- [15] 朱丽东, 周尚哲, 李凤全, 等. 金衢盆地 TX 红土剖面元素迁移特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, **27**(1): 117–123. [ZHU Lidong, ZHOU Shangzhe, LI Fengquan, et al. The elemental transport features of red earth from TX-section and its paleoclimatic implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, **27**(1): 117–123]
- [16] 凌超豪, 龙进, 贾玉连, 等. 赣北鄱阳湖地区土塘剖面第四纪红土地球化学特征及古气候意义[J]. *古地理学报*, 2015, **17**(5): 699–708. [LING Chaohao, LONG Jing, JIA Yulian, et al. Geochemical characteristics and palaeoclimate significance of the quaternary laterite of Tutang section in Poyang Lake region, northern Jiangxi province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, **17**(5): 699–708]
- [17] 邓黄月, 郑祥民, 杨立辉, 等. 长江中下游地区第四纪红土磁学特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2015, **33**(2): 285–298. [DENG Huangyue, ZHENG Xiangmin, YANG Lihui, et al. Magnetic properties of quaternary red earth profile in Yangtze River valley and its paleo-environmental implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, **33**(2): 285–298]
- [18] 熊平生. 江西赣县花岗岩型红土剖面常量元素地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2015, **21**(3): 553–558. [XIONG Pingsheng. Major elements geochemical characteristics of the granite-type laterite profile in Ganxian, Jiangxi province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, **21**(3): 553–558]
- [19] 马瑞元. 安徽宣城红土微生物 GDGTs 分布特征及其古气候意义[D]. 湖北: 中国地质大学, 2016. [MA Ruiyuan. Distributions and paleo-climate implications of microbial GDGTs from red earth profile in Xuancheng, Anhui province[D]. Hubei: China University of Geosciences, 2016]
- [20] 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]
- [21] 胡雪峰, 沈铭能, 方圣琼. 皖南网纹红土的粒度分布特征及古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2004, **24**(2): 160–166. [HU Xuefeng, SHEN Mingneng, FANG Shengqiong. Grain-size distribution of the reticulate red clay in southern Anhui province and its paleo-environmental significance [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(2): 160–166]
- [22] 胡雪峰, 程天凡, 巫和听. 南方网纹红土内是否可能存在多个“沉积-成土”过程的旋回?[J]. *科学通报*, 2003, **48**(9): 969–975. [HU Xuefeng, CHENG Tianfan, WU Hexin. Whether there maybe multiple cycles of “sedimentation-formation” process in the reticulated laterite of South China? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(9): 969–975]
- [23] 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]
- [24] 彭莎莎. 青藏高原东北缘会宁黄土揭示的中更新世以来大气环流和粉尘源区变化[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. [PENG Shasha. Pronounced changes in atmospheric circulation and dust source areas during the Mid-Pleistocene implicated by the Huining loess-soil sequence from the northeastern margin of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014]
- [25] 杨红瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 宁夏长城塬全新世黄土-土壤剖面元素地球化学特征研究[J]. *地理科学*, 2010, **30**(1): 134–140. [YANG Hongjin, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Geochemical characteristics of Holocene loess-soil profile on Changchengyuan loess tableland of Ningxia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, **30**(1): 134–140]
- [26] 熊平生, 王鹏, 张忆, 等. 衡阳盆地红土剖面元素地球化学特征及其古环境意义[J]. *山地学报*, 2019, **37**(5): 693–701. [XIONG Pingsheng, WANG Peng, ZHANG Yi, et al. Geochemistry of elements and its paleoenvironmental implications from the red earth profile in the Hengyang Basin [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(5): 693–701]
- [27] 楚纯洁, 赵景波. 西安少陵塬黄土-古土壤序列 S-3 剖面元素迁移及古气候意义[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(2): 311–321. [CHU Chunjie, ZHAO Jingbo. Element migration in S-3 profile of the Shaolingyuan loess-paleosol sequence in Xi'an and its paleoclimatic implication [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(2): 311–321]
- [28] 张智, 贾玉连, 彭学敏, 等. 赣北鄱阳湖地区黄土元素地球化学特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(8): 1125–1131. [ZHANG Zhi, JIA Yulian, PENG Xuemin, et al. The study of chemical weathering intensity in North Poyang Lake region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(8): 1125–1131]
- [29] 李拓宇, 莫多闻, 朱高儒, 等. 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[J]. *地理研究*, 2013, **32**(8): 1411–1420. [LI Tuoyu, MO Duowen, ZHU Gaoru, et al. Geochemical characteristics of major elements and its paleoenvironmental significance of Holocene loess profile in southern Shanxi, China [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(8): 1411–1420]
- [30] 刘俊余, 查小春, 黄春长, 等. 甘肃天水全新世黄土-古土壤序列化学风化特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2018, **36**

- (5): 937 - 945, [LIU Junyu, ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, et al. Chemical weathering characteristics and its climate significance of Holocene loess-paleosol sequence in Tianshui of Gansu province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, **36**(5): 937 - 945]
- [31] 应立朝, 梁斌, 王全伟, 等. 川西平原中更新世网纹红土主量元素地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 2012, **18**(8): 759 - 764. [YING Lichao, LIANG Bin, WANG Quanwei, et al. Major elements characters of the Middle Pleistocene vermicular red clay from the Western Chuanxi Plain [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, **18**(8): 759 - 764]
- [32] 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游归仙河口剖面地球化学特性及其意义[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(1): 98 - 104. [MAO Peini, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Geochemical characteristics of Guixianhekou profile in the upper Hanjiang River valley and its significance [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, **42**(1): 98 - 104]
- [33] 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, **18**(3): 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, **18**(3): 1174 - 1184]
- [34] 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: 地球科学)*, 1997, **27**(6): 531 - 536. [CHEN Jun, JI Junfeng, QIU Gang, et al. Geochemical study on the degree of chemical weathering of loess in Luochuan, Shanxi [J]. *Science in China (Series D)* 1997, **27**(6): 531 - 536]
- [35] HONG H, GU Y S, LI R B, et al. Clay mineralogy and geochemistry and their palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits in the Xuancheng section, southern China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, **25**(5): 662 - 674.
- [36] 乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 安徽宣城黄土堆积的磁性地层学与古环境意义[J]. *地质力学学报*, 2002, **8**(4): 369 - 375. [QIAO Yansong, GUO Zhengtang, HAO Qingzhen, et al. Magneto stratigraphy and paleoclimatic significance of an eolian sequence from the Xuancheng area, Anhui province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, **8**(4): 369 - 375]
- [37] 袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. *第四纪研究*, 2008, **28**(1): 1 - 13. [YUAN Baoyin, XIA Zhengkai, LI Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern China [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(1): 1 - 13]
- [38] 杨浩, 李小平, 赵其国. 宣城风积红土系列剖面有机碳同位素的特征及意义[J]. *土壤学报*, 1995, **32**(2): 117 - 183. [YANG Hao, LI Xiaoping, ZHAO Qiguo. Characteristics and significance of organic carbon isotopes in Xuancheng aeolian laterite section [J]. *Acta Pedologica Sinica*. 1995, **32**(2): 117 - 183]
- [39] 张宗祜. 中国黄土高原中几个剖面的岩性、地层分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, **3**(3): 1 - 15. [ZHANG Zonghu. Lithological and stratigraphical analysis on the loess profiles of the Loess Plateau in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, **3**(3): 1 - 15]
- [40] 刘莉红, 胡雪峰, 叶玮, 等. 皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(5): 991 - 1001. [LIU Lihong, HU Xuefeng, YE Wei, et al. Relationship between Illite Crystallinity (IC) value and weathering degree of quaternary red clay in southern Anhui province, southeast China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(5): 991 - 1001]
- [41] 洪汉烈, 杜登文, 李荣彪, 等. 安徽宣城红土剖面中粘土矿物过渡相及其意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, **37**(3): 424 - 432. [HONG Hanlie, DU Dengwen, LI Rongbiao, et al. Mixed-layer clay minerals in the Xuancheng red clay sediments, Xuancheng, Anhui province [J]. *Earth Science-Journal of China University of geosciences*, 2012, **37**(3): 424 - 432]
- [42] 杨达源, 李徐生, 鹿化煜, 等. 安徽宣城地区的“黄土”和旧石器文化[J]. *地质力学学报*, 1997, **3**(4): 87 - 91. [YANG Dayuan, LI Xusheng, LU Huayu, et al. “Loess” in Xuancheng prefecture of Anhui province and palaeolithic culture [J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, **3**(4): 87 - 91]
- [43] 曹乐, 胡春生, 李文慧, 等. 宣城红土剖面色度特征及其古气候意义[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2019, **42**(4): 355 - 359. [CAO Le, HU Chunsheng, LI Wenhui, et al. Chroma characteristics of Xuancheng red clay profile and its paleoclimatic significance [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2019, **42**(4): 355 - 359]
- [44] 尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期[J]. *科学通报*, 2006, **51**(2): 186 - 193. [YIN Qiuzhen, GUO Zhengtang. The reticulated clay of southern China and the unusually strong period of the East Asian Monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(2): 186 - 193]

Geochemical Characteristics and Paleoclimate Significance of Major Elements of the Quaternary Red Clay in the Xiangyang Section in Xuanchen, Anhui Province, China

LI Wenhui^{1,2}, HU Chunsheng^{1,2*}, TIAN Jingmei^{1,2}, CAO Le^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China;

2. Anhui Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in Yangtze-Huaihe River Basin, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: The Xiangyang section in Xuancheng, Anhui Province is a standard section of the Quaternary red clay in southern China, which contains rich information on past paleoenvironment and paleoclimate. The study on the major elements, geochemical characteristics and paleoclimate of Xiangyang section has great significance to the insights into the red clay weathering intensity and paleoclimate evolution across the region, and also the investigation about the high-resolution of quaternary red clay in South China. Based on field geological and geomorphic investigation and density-increased sampling, the ZSX Primus IV X-ray fluorescence spectrometer (XRF) was used to measure the major elements of this section. Moreover, combining with the chronological data of predecessors, the weathering characteristics and paleoclimatic significance of the red clay in this section were discussed by using combined methods of the geochemical weathering parameters (CIA and BA) and element mobility. The research results showed that: (1) The main elements of xiangyang section are Fe_2O_3 , Al_2O_3 and SiO_2 , which have significant characteristics of ferro-silicon-aluminium. Since approximately 916 ka ago, the accumulation of the red clay was in a relatively warm and wet paleoclimate, but the climate generally changed towards the direction of dry and cool since then. (2) During the past 916 ka, the paleoclimate in the Xiangyang section had roughly 7 cycle changes of relative warm and wet periods and relative cool and dry periods. From stage I to stage II, the warm-wet degree and weathering intensity were relatively strong, and the paleoclimate developed towards the direction of warm and wet. In stage III, both the warm-wet degree and weathering intensity decreased. In stage IV, they reached the maximum, which was the most stable period. From stage V to stage VII, the paleoclimate had a tendency of dry and cool. In stage VII, the degree of the warm-wet and weathering intensity reached the minimum; (3) Under 6.2 m (about 534 ka ago), the sedimentary dynamic strength of the red clay soil was relatively strong with significant dry-wet changes and unstable sedimentary environments. After that, the sedimentary dynamic strength of the red clay soil was relatively weak with relatively stable sedimentary environment.

Key words: Xiangyang section in Xuancheng; quaternary red clay; major elements; geochemical weathering parameters; paleoclimate changes