

引用格式:王吉,朱丽东,禹蕊斐,等. 2026. 南方加积型红土化学风化的非纬向地带性特征及其成因分析[J]. 沉积学报, 44(3): 945-960.

WANG Ji, ZHU LiDong, YU RuiFei, et al. 2026. Non-Latitudinal Zonal Characteristics and Origin of Chemical Weathering of Aggradational Red Earth in Southern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(3): 945-960.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.097

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.097

南方加积型红土化学风化的非纬向地带性特征及其成因分析

王吉^{1,2}, 朱丽东^{1,2}, 禹蕊斐^{1,2}, 张忠萍¹, 杜广琴^{1,2}

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004

2. 金华市流域地表过程及生态安全重点实验室, 浙江金华 321004

摘要 【目的】加积型红土的风化记录一直是中亚热带(25°~31° N)地区第四纪环境演变研究的重要内容。然而,空间尺度加积型红土风化特征的研究鲜有报道,阻碍了对加积型红土风化环境的系统性认识。【方法】基于对南方地区加积型红土剖面风化特征的系统分析,以非地带性因素影响较为显著的金衢盆地为研究对象,着重探讨盆地内红土化学风化特征和成因,以期深化加积型红土风化特征的认识。【结果】(1)从大尺度范围看,南方红土的风化强度与水热条件呈现较好的相关关系,总体随纬度降低风化作用增强。但加积型红土分布普遍的中亚热带(25°~31° N),部分地区或部分剖面红土的化学风化并不完全符合纬向地带性。(2)金衢盆地加积型红土地球化学组成具有较好的一致性,样品间元素富集亏损情况的差异也较小。但与同纬度其他加积型红土化学风化特征相比,网纹红土发育阶段和网纹终止之后均质红土发育阶段的化学风化程度存在一定区域性。(3)受物源、地形、局地气候等因素的综合影响,金衢盆地加积型红土的风化特征呈现一定的非纬向地带性特征。【结论】大尺度季风演化格局下,南方红土风化特征整体呈纬向地带性规律。但中亚热带25°~31° N范围内,受地形、大面积水域、潜在物源区地理特征差异等非地带性因素影响,加积型红土化学风化也呈现一定的非地带性。金衢盆地区域范围较小,相对封闭的盆地地形、局部小气候条件、基岩风化物对红土物源的贡献等非地带性因素在红土化学风化信息解读中扮演重要角色,从而在讨论各地化学风化特征时,还需要考虑地域性因素的影响。

关键词 加积型红土;化学风化;风化地带性;地域性因素

第一作者 王吉,男,1997年出生,硕士研究生,自然地理学,E-mail: WangJiZJNU@163.com

通信作者 朱丽东,女,教授,E-mail: zhulidong@zjnu.cn

中图分类号: P512.1¹2 P534.63 P59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)03-0945-16

0 引言

中国亚热带地区25°~31° N之间的风成加积型红土是解读中国南方第四纪期间气候与环境演化信息的良好陆相地质载体(Xiong *et al.*, 2002; 朱丽东, 2007; 王海力, 2012; Hu *et al.*, 2015; 熊文婷等, 2020; 张晓, 2021)。该类红土质地均一,富含风尘基本粒组,未经流水作用改造,具备边沉积边风化的加积性特征。其沉积剖面常见于我国长江以南地区的河流高阶地上以及低山丘陵向盆地过渡的平缓坡麓地带(朱丽东, 2007; 张晓等, 2022),自下而上由网纹红土

层、均质红土层、黄棕色土层等沉积单元构成。在一些沉积相对连续的剖面中,第四纪期间的环境变化信息能得到较好地保存,成为记录我国中低纬地区第四纪古环境信息的良好地质载体,长期以来备受地质学界关注(杨达源, 1991; 赵其国和杨浩, 1995; 胡雪峰等, 2004)。

前人围绕加积型红土的风成相似性(胡雪峰和龚子同, 2001; Xiong *et al.*, 2002; 胡雪峰等, 2005; 朱宗敏等, 2006; 陈秀玲等, 2009)、粉尘来源(黄颖等, 2019; 张晓, 2021; 马桢桢, 2022; 张晓等, 2022)、古环境变化(朱丽东等, 2011; 徐传奇等, 2016; 张晓等,

收稿日期: 2024-05-27; 修回日期: 2024-08-19; 录用日期: 2024-09-11; 网络出版日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572345); 金华市流域地表过程与生态安全重点实验室开放基金重点项目(KF-2022-04)

2020;汪玲玲等,2024)、风化特征(朱丽东等,2007a, 2014;彭莎莎,2009;李佐卿,2013;范庆斌,2014;何俊杰,2019)及网纹化机理(徐传奇等,2016;张晓等, 2020;吴开钦,2022;汪玲玲等,2024)等方面开展了大量研究工作。就目前红土风化研究成果看,普遍达成的共识有:(1)南方红土整体处于中强化学风化水平(朱丽东,2007;黄颖等,2019;何俊杰,2019;张晓等,2022);(2)南方红土发育存在阶段性,通常是暖湿气候阶段的产物。不同暖期,风化水平有别的网纹红土、红土、棕红色土的分布北界存在空间差异(黄镇国等,1999),网纹红土发育于夏季风异常强盛期(尹秋珍和郭正堂,2006);(3)红土剖面上化学风化记录较好地响应了第四纪期间中低纬地区从早、中更新世至晚更新世气候转型的过程(张明强等, 2010;熊文婷等,2020)。然而,对于红土风化特征的系统性认识还有待深入,特别是红土风化体系的空间研究方面尚有欠缺。黄镇国等(1999)早年的研究认为,中国南方红土自南向北可以分为网纹红土、红土、棕红色土等类型,风化程度在空间上依次减弱。近年来,随着风成红土物源的讨论,有学者认为南方加积型红土与北方粉尘之间存在一定物源联系(朱丽东等,2007c, 2014;杨立辉等,2008;李佐卿,2013),冬季风强盛时期,北方粉尘可以越过长江输移至长江以南地区(朱丽东等,2006a)。从而在大空间尺度上,黄土、下蜀黄土、风积红土等风积物地球化学组成相似,但粒径随冬季风风场自北而南逐渐变细(伊继雪等,2009;陈璞皎等,2017),化学风化也呈现地带性规律(朱丽东等,2006b;姜永见,2009;伊继雪等,2009;王海力,2012;李佐卿, 2013;詹文娟,2015)。这种风化地带性在红土区的相关研究中也得到了关注和呈现,如朱丽东(2006b)、杨立辉(2017)研究揭示,中亚热带 $25^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 风积红土的化学风化水平整体上自北向南呈增强趋势;部分学者(胡亚萍等,2013;张智等, 2014)指出鄱阳湖周边地区存在湖滨沙山—风成红土的风沙沉积体系,沿风向下风向方向存在元素的粒级分选(万智巍等,2020),王海力(2012)针对浙江、福建等地海岸风沙及其下风方向风积红土地球化学的对比研究也发现,两者的化学风化存在一定的空间差异。

然而,对比相关研究也发现一些剖面并不完全

符合风化地带性的规律(朱丽东,2007;许良峰等, 2010;应立朝等,2012;黄颖等,2019),这可能意味着红土风化研究中忽视了除纬度、风场因素以外的其他地理因素的影响。基于此,亟须推进和深化红土风化的空间对比研究。本文选取课题组多年来积累的尚未发表的10个剖面的元素地球化学数据和前人已发表的17个剖面的地球化学数据开展集成研究,试图揭示不同地区加积型红土的风化特征,按地层单元汇集数据并在空间上探究红土风化的地带性和非地带性特征。进而加深对加积型红土风化机制及其影响因素的理解,为认识地球表层系统环境演化提供更多线索。

1 材料与方法

1.1 剖面及样品选择

以加积型红土分布较为普遍的中亚热带东部地区为研究区,在 $25^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$ 选择有地球化学数据的红土剖面,主要包括已发表的17个剖面761个样品的地球化学数据和课题组多年来积累的尚未发表的10个剖面841个样品的元素地球化学数据,在此基础上开展集成研究。所遴选的共27个剖面的地理位置如图1所示,主要集中于皖南、浙中北、赣北、湖南洞庭湖周边等地,涵盖安徽、浙江、江西、湖南四省。研究区内加积型红土的剖面结构大致可以被归并为两类:一类是自下而上由网纹红土、弱网纹黄棕色土、黄棕色土构成的剖面(下文简称Ⅰ型剖面),另一类是自下而上由网纹红土、弱网纹红土、均质红土构成的剖面(下文简称Ⅱ型剖面)。Ⅰ型剖面多分布于长沙—新余—南昌—杭州一线以北,相反,Ⅱ型剖面主要出现于该界线以南地区,以金衢盆地最为集中(图1)。

鉴于多种测年方法在红土年代学研究中的尝试,红土年代学研究取得了一些进展,但长期以来该项工作仍然比较薄弱,各地红土测年数据也有较大差异。从研究区已发表的红土测年数据来看(表1),网纹红土(VRC)主要形成于 $1.2\sim 0.4\text{ Ma}$,黄棕色土(YBS)或均质红土(TRC)多形成于 $0.4\sim 0.1\text{ Ma}$ 。但表1数据显示,金衢盆地红土的年龄明显较其他地区年轻,这可能意味着金衢盆地红土发育环境与同纬度其他地区有所差异,可作为红土化学风化的特殊单元加以探究。研究剖面基本信息如表2所示。

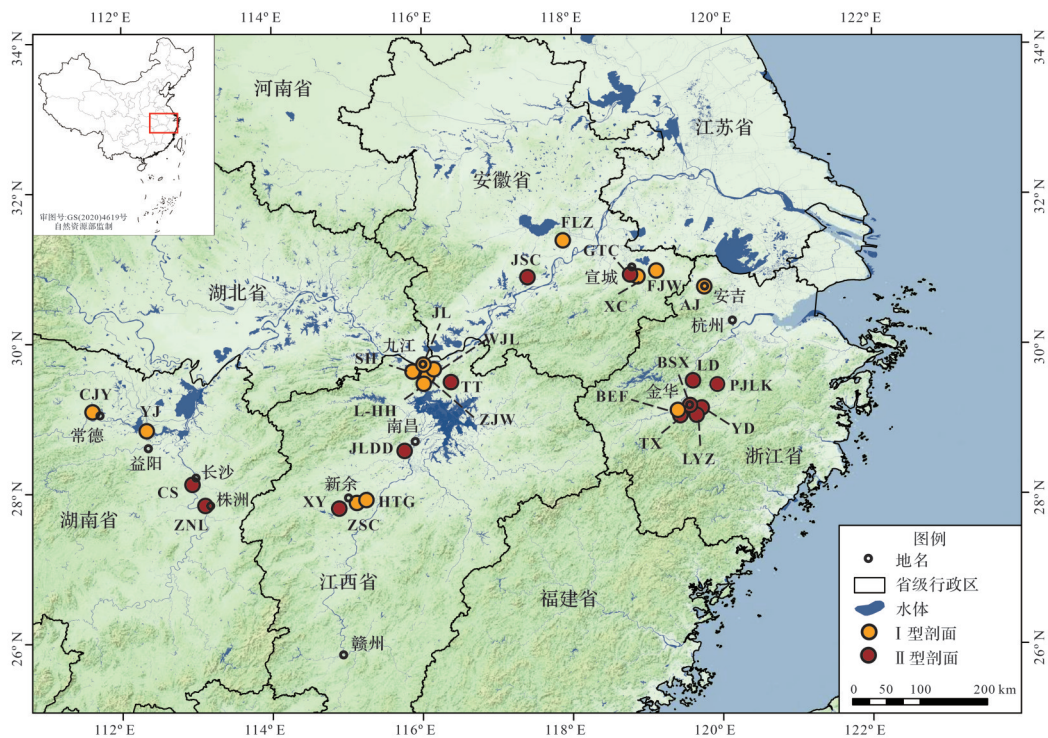


图1 研究剖面分布图
Fig.1 Distribution of Study Sections

表1 研究区已发表的红土测年结果

Table 1 Published dating results for red earth in the study area						
剖面名称	经度/°E	纬度/°N	网纹红土年代/ka	黄棕色土/均质红土年代/ka	测年方法	资料来源
安徽宣城剖面	118.85	30.90	730~400	400~100	ESR	赵其国和杨浩,1995
安徽宣城剖面	118.85	30.90	588~274	274以来	ESR,OSL	Hong <i>et al.</i> ,2010
安徽宣城剖面	118.85	30.90	850~400	400~100	古地磁、OSL	乔彦松等,2003
江西九江剖面	116.00	29.71	686~393	393~40.5	ESR,OSL	Hong <i>et al.</i> ,2013
江西九江长虹大道	116.00	29.71	1 232~392	392~101	古地磁、TL	蒋复初等,1997
江西九江兴城大道	115.96	29.66	1 148	—	OSL,ESR	李金典,2019
江西九江九庐公路剖面	116.03	29.70	中部1 138	440~230	ESR	朱丽东,2007
江西杨梅山剖面	114.67	29.16	>780	—	古地磁	刘育燕等,2003
江西修水	—	—	800~100	—	古地磁、TL,OSL	顾延生等,2002
安徽郎溪剖面	118.64	30.68	>80.05	80~4.06	OSL	Hu <i>et al.</i> ,2015
安徽沿江地区	—	30.91	<1 150~300	400~130	古地磁、TL	于振江和黄多成,1996
安徽宣城官塘村	118.79	—	1 134~143	143以来	古地磁、OSL	刘海丽,2012
金衢盆地罗店剖面	119.61	29.13	196.94~98.97	98.97~17.28	古地磁、OSL	莫东坡,2018
金衢盆地浦江剖面	119.56	29.45	256.46~129.39	129.39~48.44	古地磁、OSL	莫东坡,2018
金衢盆地源东剖面	119.72	29.14	244.89~95.44	95.44~68.29	古地磁、OSL	莫东坡,2018

注：“—”表示无数据。

表2 研究区被遴选的加积型红土剖面基本信息

Table 2 Information of selected aggradational red earth in the study area

地点	剖面名称	经度/°E	纬度/°N	层位(样品数)	出露厚度/m	CIA(均值)	资料来源
浙江安吉	安吉(AJ)	119.76	30.76	TRC(2)	1.45	83.83	伊继雪等,2009
				VRC(3)	1.55	87.16	
浙江金华	源东(YD)	119.72	29.14	TRC(18)	0.85	87.01	何俊杰,2019
				VRC(34)	4.35	87.03	
浙江金华	琅琊镇(LYZ)	119.63	29.06	TRC(14)	1.50	90.04	李建武,2009
				VRC(6)	0.50	90.89	
浙江金华	汤溪(TX)	119.41	29.05	TRC(152)	3.30	88.40	课题组数据
				VRC(248)	4.90	88.50	
浙江金华	罗店(LD)	119.61	29.51	TRC(12)	1.20	87.56	曹林,2012
				VRC(6)	2.40	90.50	
浙江金华	浦江粮库(PJLK)	119.93	29.45	TRC(9)	0.90	85.00	课题组数据
				VRC(20)	1.90	86.37	
浙江金华	白沙溪(BSX)	119.55	29.18	TRC(27)	0.90	88.24	课题组数据
				VRC(31)	2.25	88.40	
浙江金华	白鹅畈(BEF)	119.42	29.10	YBS(20)	0.90	76.62	曹林,2012
				VRC(0)	未出露	—	
江西九江	九庐公路(JL)	116.03	29.70	YBS(25)	4.46	80.87	朱丽东等,2007b
				VRC(72)	14.00	87.78	
江西九江	汪家垄(WJL)	116.08	29.60	YBS(32)	1.20	83.22	何俊杰,2019
				VRC(32)	3.20	88.03	
江西九江	沙河(SH)	115.89	29.61	YBS(51)	4.69	78.49	课题组数据
				VRC(155)	2.25	87.78	
江西九江	海会(LHH)	116.07	29.54	YBS(68)	3.57	86.97	马桢桢,2022
				VRC(91)	5.53	89.04	
江西九江	土塘(TT)	116.39	29.49	TRC(10)	0.80	87.94	凌超豪等,2015
				VRC(49)	4.18	89.96	
江西新余	新余(XY)	114.91	27.81	VRC(29)	3.30	94.56	杨立辉,2017
江西南昌	九龙大道(JLDD)	115.78	28.57	TRC(19)	1.30	86.97	熊文婷,2022
				VRC(20)	1.90	89.04	
江西九江	朱家湾(ZJW)	116.08	29.54	YBS(15)	2.90	80.21	熊文婷,2022
				VRC(10)	2.00	87.00	
江西樟树	竹山村(ZSC)	115.15	27.88	YBS(31)	0.70	88.22	课题组数据
				VRC(0)	未出露	/	
江西樟树	黄土岗(HTG)	115.22	27.90	YBS(16)	0.50	88.28	课题组数据
				VRC(0)	未出露	/	
湖南常德	陈家堰(CJY)	111.62	29.10	YBS(20)	1.30	83.19	何俊杰,2019
				VRC(11)	2.10	83.53	
湖南长沙	长沙(CS)	112.94	28.12	TRC(28)	2.50	94.89	杨立辉,2017
				VRC(30)	3.30	95.21	
湖南株洲	株洲(ZNL)	113.14	27.83	TRC(2)	0.60	88.25	朱丽东,2007
				VRC(9)	0.90	88.27	
湖南益阳	沅江(YJ)	112.34	28.84	YBS(16)	1.60	77.16	课题组数据
				VRC(32)	3.20	76.69	
安徽宣城	官塘村(GTC)	118.79	30.91	TRC(3)	0.60	85.78	刘海丽,2012
				VRC(66)	1.32	90.19	
安徽宣城	福家湾(FJW)	119.12	30.97	YBS(7)	1.50	78.43	课题组数据
				VRC(8)	2.00	80.95	
安徽宣城	宣城(XC)	118.82	30.89	YBS(5)	2.30	83.30	伊继雪,2010
				VRC(6)	3.70	86.10	
安徽铜陵	金社村(JSC)	117.40	30.86	VRC(9)	2.80	87.12	课题组数据
安徽芜湖	福禄镇(FLZ)	117.88	31.38	YBS(8)	2.80	71.33	课题组数据
				VRC(15)	2.70	75.52	

注: CIA 为化学蚀变指数, 计算公式为: $CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+CaO^*+K_2O)]\times 100$, CaO^* 为硅酸盐矿物中的 CaO (Nesbitt and Young, 1982; McLennan, 1993); YBS 为黄棕色土; TRC 为均质红土; VRC 为网纹红土。

1.2 实验及数据分析方法

本研究课题组所有样品的地球化学数据均采用XRF分析方法获得。将样品105℃条件下烘干,使用自动研磨机将烘干样品研磨至220目以下,称取4g放入聚氯乙烯环,通过半自动高压压片机制成样片,上机测试。元素测定过程采用国标样进行监控,测试误差低于5%。本课题组已发表和未发表元素地球化学数据测试均完成于浙江师范大学地理与过程实验室。

基于前人对研究区红土的年代学工作(赵其国,1992;赵其国和杨浩,1995;蒋复初等,1997;李长安和顾延生,1997;杨立辉等,2005;袁宝印等,2008;林旭等,2023),将九江九庐公路(JL)剖面0.44 Ma界线作为该地区网纹红土与黄棕色土或网纹红土与均质红土之间的年代界线(朱丽东,2007),即认为网纹红土形成于早更新世晚期至中更新世中期,均质红土或黄棕色土形成于中更新世中期至晚更新世早期。按此年代框架,采取同地层样品化学风化对比研究的思路,尝试不同时代红土化学风化地带性研究,同时将金衢盆地视为特殊地理单元,开展红土化学风化非地带性研究。

2 南方加积型红土的风化特征

2.1 纬向地带性特征

为了解南方加积型红土化学风化强度的空间变化,首先考察了北方黄土(陈骏等,2001)、下蜀黄土(李徐生等,2007)和加积型红土化学蚀变指数(CIA)沿纬向的分布特征。从大尺度季风演化格局来看,自北向南各类风积物化学风化程度的空间变化遵循风化地带性(图2)。如图2所示,洛川黄土的CIA值

主要介于62.53~66.13,下蜀黄土CIA值介于66.67~74.94,研究区加积型红土的CIA值介于76.60~91.41,符合纬度越低,水热条件越优,化学风化越强的地带性特征。其次,就研究区加积型红土而言,浙江、赣北、安徽、湖南境内加积型红土风化强度仍然与纬度之间存在较好的线性关系(图3)。将各剖面上部的黄棕色土(YBS)和均质红土(TRC)视为非网纹红土,如图3a所示,安徽境内非网纹红土的风化强度与纬度的线性拟合关系最好($R^2=0.86$),其次是浙江($R^2=0.65$)、湖南($R^2=0.51$),最后是江西($R^2=0.44$)。各剖面网纹红土样品CIA均值与纬度的线性拟合关系显示(图3b),安徽境内拟合关系最好($R^2=0.76$),其次是江西($R^2=0.74$)、湖南($R^2=0.48$),最后为浙江($R^2=0.11$)。所以中亚热带地区加积型红土化学风化整体上保留着大尺度风化地带性的格局。

2.2 非纬向地带性特征

然而,我们也发现各红土区之间红土的风化强度及其与纬度的线性拟合程度存在区域差异。相比之下,金衢盆地红土风化特征与其他地区差异较为显著。其差异主要表现在以下三个方面。第一,金衢盆地红土的剖面构型主要为Ⅱ型剖面,而同纬度江西、湖南境内则呈现Ⅰ型剖面。值得注意的是,江西、湖南境内Ⅱ型剖面的纬度位置比金衢盆地更偏低,这表明金衢盆地红土的风化不完全符合风化地带性规律。第二,从化学风化程度看,金衢盆地各剖面均质红土样品的CIA均值(83.83~90.04)接近或高于纬度较低的湖南长沙(CS)、株洲(ZNL)剖面(83.18~94.89)及江西新余(XY)、九龙大道(JLDD)剖面(78.49~86.97)。而金衢盆地网纹红土CIA均值(86.37~90.89)也与纬度偏低的湖南长沙(CS)、株洲(ZNL)剖面(88.27~95.21)及江西新余(XY)、九龙大

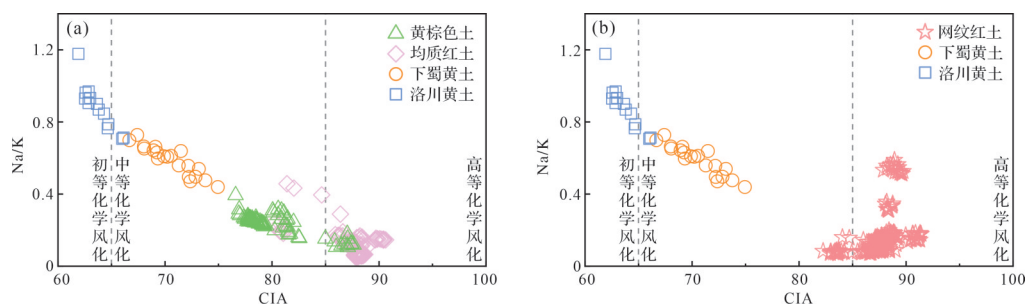


图2 北方黄土(陈骏等,2001)、下蜀黄土(李徐生等,2007)和研究区红土化学风化特征比较
(a)非网纹红土层;(b)网纹红土层

Fig.2 Comparison of chemical weathering characteristics from northern loess (Chen *et al.*, 2001), Xiashu loess (Li *et al.*, 2007), and red earth in the study area
(a) non-vermicular red earth; (b) vermicular red earth

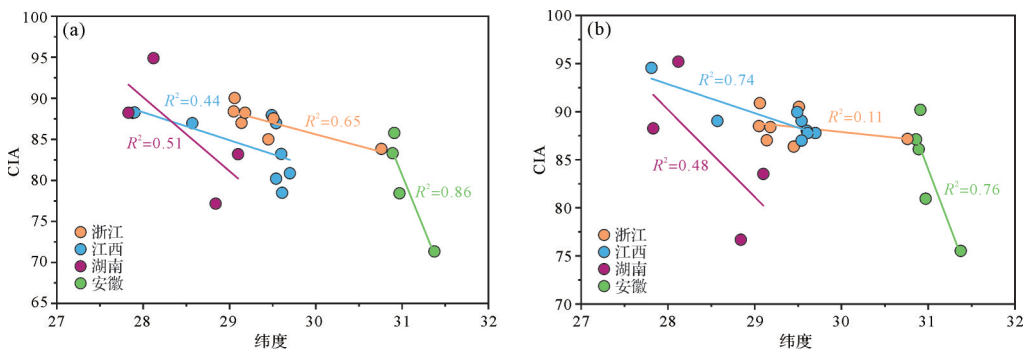


图3 研究区各红土剖面化学风化强度沿纬向的变化特征
(a)非网纹红土层(b)网纹红土层;图中CIA为均值

Fig.3 Characteristics of chemical weathering intensity along latitudinal direction
in various aggradational red earth sections in the study area
(a) non-vermicular and (b) vermicular red earth; Chemical Index of Alteration (CIA) is average in figure

道(JLDD)剖面(89.04~94.56)较为接近。第三,研究区浙江、安徽、江西、湖南等地红土的CIA值与纬度之间的线性拟合程度存在区域差异(图3a,b)。就金衢盆地的7个剖面(安吉AJ剖面除外)而言,均质红土及网纹红土CIA值与纬度的线性拟合度极差,几乎不符合纬向差异。

3 金衢盆地加积型红土的风化特征及其成因分析

上述研究表明,在大尺度上中国南方加积型红土的风化特征具有明显的纬向地带性,各地区加积型红土的化学风化强度与纬度之间存在较好的线性关系。然而,在亚热带内部特别是金衢盆地内部加

积型红土剖面风化并不完全符合纬向地带性,可能意味着该地红土风化还受到其他地理因素的影响。因此,本文以金衢盆地红土区为研究对象,进一步解译盆地内加积型红土化学风化信息,探究其控制因子。

3.1 金衢盆地内加积型红土的地球化学特征

金衢盆地加积型红土不同层位红土样品的常量元素测试结果见表3。样品的常量元素测试结果表明,金衢盆地加积型红土SiO₂含量介于57.22%~72.77%,Al₂O₃含量介于11.27%~19.41%,Fe₂O₃含量介于4.73%~8.79%,这三者常量元素的含量占主要部分。MgO、CaO、K₂O和Na₂O等含量较低,除K₂O之外,其他三种元素含量均低于1%。总体来看,金衢盆地加积型红土以SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃为主,易溶组分

表3 金衢盆地加积型红土剖面全岩样品的常量元素平均含量(%)

Table 3 Mean concentrations for major element compositions of bulk samples for aggradational red earth sections in the Jinqu Basin (%)

名称	类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
LYZ	均质红土	69.03	14.58	5.54	1.17	0.08	0.45	0.11	1.09	0.06	0.05
	网纹红土	68.58	15.56	5.49	1.15	0.07	0.40	0.11	1.01	0.04	0.04
LD	均质红土	72.77	11.72	4.73	0.96	0.09	0.40	0.11	1.10	0.04	0.05
	网纹红土	72.08	11.27	6.43	0.89	0.07	0.36	0.10	1.10	0.08	0.04
LDZ	均质红土	71.98	12.60	5.20	1.09	0.23	0.45	0.12	1.07	0.07	0.11
	网纹红土	68.93	13.23	7.23	0.93	0.11	0.43	0.11	1.00	0.04	0.09
BSX	均质红土	67.88	13.47	5.45	1.21	0.15	0.42	0.13	1.01	0.12	0.15
	网纹红土	67.64	14.79	5.43	1.39	0.07	0.41	0.11	0.93	0.10	0.09
TX	均质红土	60.03	18.41	7.67	1.57	0.07	0.90	1.08	1.21	0.15	0.08
	网纹红土	57.22	19.41	8.79	1.66	0.07	0.84	1.06	1.26	0.07	0.08
PJLK	均质红土	64.68	11.64	6.16	0.89	0.08	0.64	0.99	1.06	0.04	0.05
	网纹红土	63.02	13.21	6.96	0.87	0.07	0.64	0.99	1.04	0.03	0.05
YD	均质红土	73.58	11.92	5.17	1.51	0.10	0.58	0.29	1.07	0.20	0.05
	网纹红土	70.08	13.68	6.55	1.46	0.12	0.54	0.14	1.10	0.07	0.05

含量低。金衢盆地加积型红土与上地壳(UCC)相比,Ti和Fe相对富集,Mg、Ca、Na、K、P相对亏损(图4),这与前人在金衢盆地对加积型红土元素地球化学特征的研究结果一致(彭莎莎,2009;曹林,2012)。然而,样品基于UCC富集与淋溶情况存在差异,均质红土层所有样品都呈现Ti富集,Mg、Ca、Na、K、P亏损的情况,但是各样品在Fe、Al和Mn元素的富集与淋溶情况差异大,具体表现在:TX剖面明显富集Al,而其他剖面则略有亏损;LD剖面Fe的富集程度较其他剖面略低;YD、BSX、TX剖面Mn富集程度明显高于其他剖面,YD、PJLK剖面则表现为Mn亏损。网纹红土层中所有样品呈现富集Ti、Fe、Mg、Ca、Na、K、P亏损的情况,各样品在Al和Mn元素的富集与淋溶情况差异大,TX剖面Al更富集,LD剖面则表现为亏损;BSX、LD剖面Mn富集相对明显,LD、PJLK剖面则表现为Mn亏损。但整体上来看,金衢盆地各剖面主量元素的UCC标准化结果所呈现的元素富集亏损特征有较好的一致性。

3.2 金衢盆地内加积型红土的风化特征

CIA值与Na/K比值常作为判断化学风化程度的重要指标。一方面,CIA值可以有效地表征硅酸盐矿物的风化程度,前人研究认为50~65反映初等风化强度;65~85反映中等风化强度;85~100反映高等风化强度,一般来说CIA值越大代表风化作用越强(McLennan,1993;Fedo *et al.*,1995;冯连君等,2003)。另一方面,Na/K比值可作为斜长石风化程度的指标,反映沉积物在表生环境的风化程度,一般来说Na/K比值越小,代表风化程度越强,气候越暖湿,反之,化学风化程度越弱,气候越干燥(Nesbitt *et al.*,1980)。CIA值一般与化学风化强度成正比,而Na/K比值一

般与风化强度成反比,将两者比值投影到散点图可以有效地反映样品的风化强度。此外,K/Al比值也被用来反映黏土矿物伊利石/高岭石的丰度变化,进而指示风化程度(Lu *et al.*,2013),K/Al比值越大,风化程度越低。从图5可以看出,金衢盆地加积型红土样品的CIA值介于83~93,总体风化呈中、高风化强度,随着化学风化强度的增大,其样品Na/K、K/Al值均与CIA呈现负相关,其中K/Al与CIA的 R^2 高达0.61,从样品的风化强度比较来看,LDZ与LD剖面的风化强度更为强烈。

为了查明金衢盆地内部样品风化是否存在地带性规律,将金衢盆地内加积型红土剖面CIA值与经纬度展入三维空间图,以了解化学风化强度沿纬向的变化特征。结果发现,金衢盆地均质红土层样品风化程度自北而南体现纬度效应,而网纹红土层不完全符合风化纬向地带性规律(图6),尤其是在 $29.0^{\circ}\sim 29.5^{\circ}$ 范围内的样品,其CIA值差异显著。

3.3 金衢盆地不同层位样品纬向风化差异的成因

金衢盆地加积型红土TRC、VRC样品化学风化呈现不同的空间分异特征,可能与风化时间以及风化环境有关。一般认为,网纹红土形成于1.23~0.44 Ma,对应中更新世早、中期,非网纹红土沉积则是0.44 Ma之后的产物,对应中更新世晚期及晚更新世(蒋复初等,1997;李长安和顾延生,1997;朱丽东,2007)。网纹红土发育时期东亚夏季风异常强盛,1.2~0.6 Ma的昆黄运动,促使青藏高原快速隆升而全面进入冰冻圈(李吉均,1983;Fang *et al.*,2002;王婷等,2017),高原季风建立,高原冷高压和西伯利亚—蒙古高压同时增强,导致东亚季风气候发生重大的转型,冬夏季风均显著增强,此时盆地内加积型红土

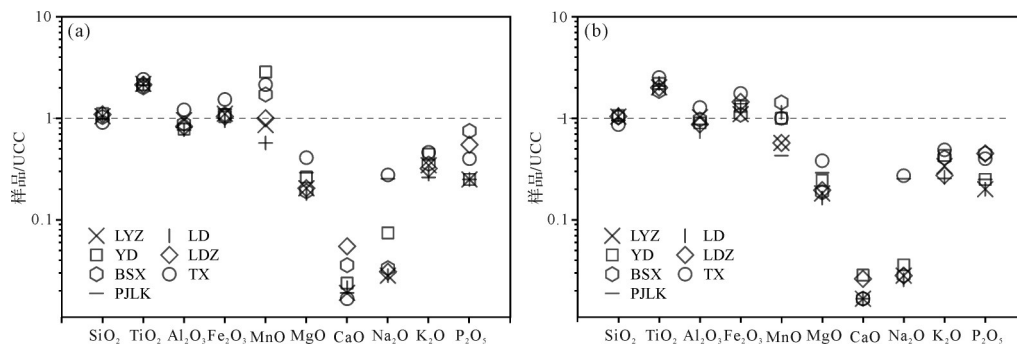


图4 金衢盆地加积型红土全岩样品常量元素UCC标准化蜘蛛图(均值)

(a)均质红土;(b)网纹红土

Fig.4 Upper continent crust (UCC) standardized spider plot of major elements of aggradational red earth whole rock samples in the Jinqu Basin (mean)

(a) typical red earth; (b) vermicular red earth

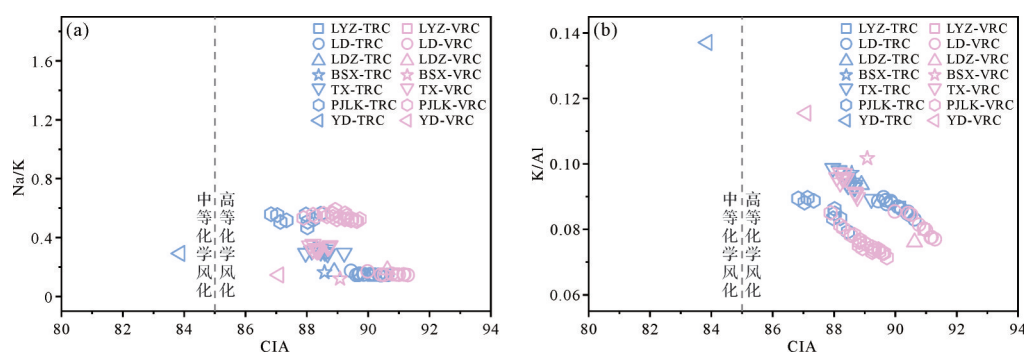


图5 金衢盆地加积型红土剖面化学风化参数 CIA-Na/K(a)、CIA-K/Al(b)的散点图

图中TRC为均质红土,VRC为网纹红土

Fig.5 Scatter plots of CIA-Na/K (a) and CIA-K/Al (b) for the aggradational red earth section in the Jinqu Basin

TRC refers to typical red earth, and VRC refers to vermicular red earth

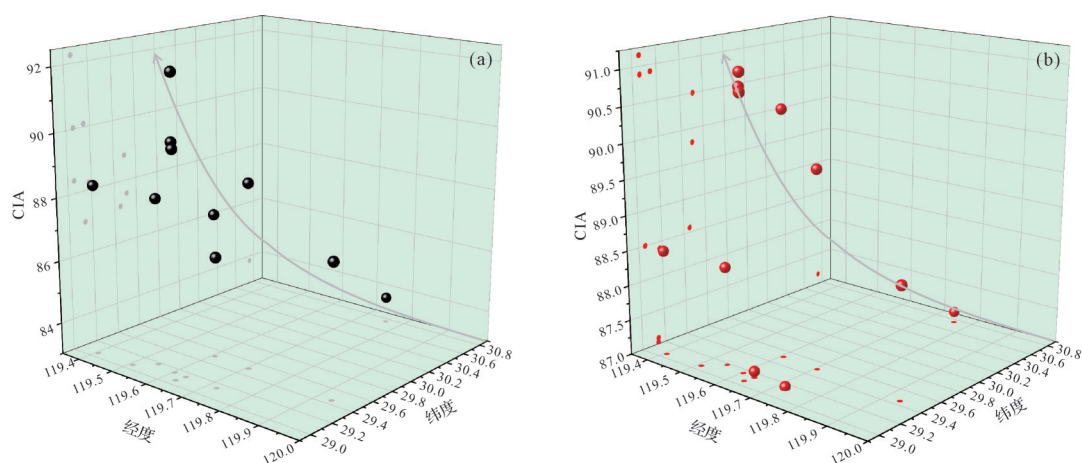


图6 金衢盆地加积型红土剖面化学风化强度沿纬向的变化特征

(a)均质红土;(b)网纹红土;图中灰色箭头代表风化趋势线

Fig.6 Characteristics of chemical weathering intensity along the latitudinal direction of the aggradational red earth sections in the Jinqu Basin

(a) typical red earth; (b) vermicular red earth; The grey arrows represent weathering trend lines

受到一致性风化作用,受温度、降水因子的影响较弱,而受地形等非气候因素的影响较强。非网纹红土发育期东亚冬季风异常强盛,0.44 Ma 正值中布容(MBE)气候转型期,主要表现为全球冰量的显著增加以及冰期与间冰期气候反差的进一步增大(Jansen *et al.*, 1986)。冷空气活动的增强及空气湿度的下降共同驱动晚第四纪中国南方干旱化(马桢桢等, 2022)。此时盆地内的风化为不一致风化的作用,受温度、降水因子的影响较强。因此,网纹红土发育时期湿热的风化环境叠加非气候因素的影响,促使其呈现非纬向地带性风化的特征,而均质红土层发育期间气候偏干冷,总体风化受控于气候条件。

3.4 金衢盆地加积型红土非纬向地带性风化的成因

加积型红土发育于表生环境,在地表这个开放的体系中,其风化情况不仅受水热条件的影响,还受

外源物质输入、地形等的影响。本研究将从物源、地形、局地气候等方面分析金衢盆地加积型红土的风化特征呈现特殊性的原因。

3.4.1 物源影响

将沉积区(汇)与潜在物源区(源)进行比较,是开展风尘沉积物物源示踪研究的基本思路。已有研究表明,加积型红土可能来源于北方黄土(Che and Li, 2013)、长江沉积物(何梦颖等, 2013; He *et al.*, 2013)或本地基岩风化物(张忠萍, 2023)。推测物源可能是加积型红土空间风化特征变化的原因之一,这里讨论了金衢盆地加积型红土与三种潜在物源的联系。

1) 稳定元素比值的物源判别

特征元素比值可以消除矿物组成、粒度等因素引起化学元素改变的效应,更有效地判断沉积物的

物源(操应长等,2007)。将金衢盆地加积型剖面样品与潜在物源进行 TiO_2/Al_2O_3 与 SiO_2/Al_2O_3 对比,以此推断金衢盆地红土的物源,从图7中可以看出,金衢盆地内加积型红土样品均质红土、网纹红土与长江沉积物、基岩样品基本重叠,指示金衢盆地内加积型红土的样品的物源系基岩风化物与长江沉积物的混合,而非远距离的北方黄土。进一步地,借鉴 Dickson and Scott (1998)以及 Ashley and Driese (2000)的研究成果,利用 Ti/Zr 比例来辨别土壤的成土母质贡献。若假设加积型红土与基岩存在物源联系,则两者的 Ti/Zr 比值将不会发生明显偏移,红土样品与基岩样品的 Ti/Zr 比值集中在同一区间,说明加积型红土剖面元素与基岩具有同源性(图8)。基岩处在 Ti 浓度较低的位置,而加积型红土处于较高位置,反映了从基岩风化物贡献的元素在后期沉积的过程中发生了强烈的风化。

2) 锆石 U-Pb 年龄谱的物源判别

由于锆石具有较高的稳定性,它在搬运和沉积过程中不容易发生年龄特征的改变。因此,锆石的 U-Pb 年龄谱通常被用作指示沉积物中碎屑物质来源的有效方法。前人针对金衢盆地加积型红土和潜在源区的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱进行了研究,选取金衢盆地 TX、PJLK 剖面的 4 个红土样品、3 个基岩风化物样品(QJ-JY、DC-JY、PJWQ-JY)、北方黄土、长江沉积物进行了碎屑锆石 U-Pb 年龄谱的对比分析(张忠萍,2023)。结果发现,金衢盆地加积型红土(TX 剖面)和长江漫滩沉积物(湖口段)的碎屑锆石年龄谱更加相似,均在 330~400 Ma、550~700 Ma、750~

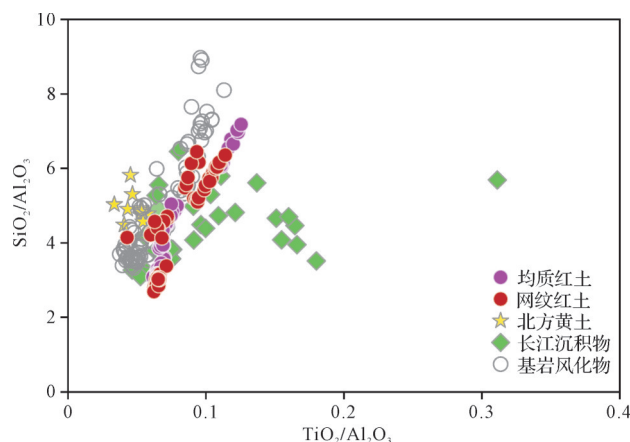


图7 金衢盆地加积型红土剖面 TiO_2/Al_2O_3 与 SiO_2/Al_2O_3 散点图

Fig.7 Scatter plots of TiO_2/Al_2O_3 and SiO_2/Al_2O_3 in the aggradational red earth sections of the Jinqu Basin

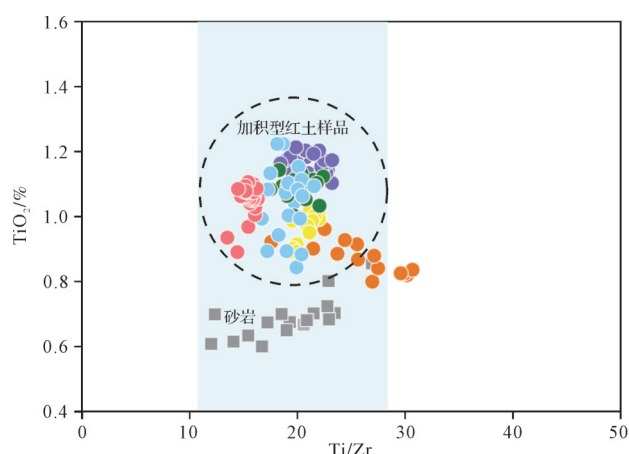


图8 金衢盆地加积型红土剖面 Ti/Zr 与 Ti 的百分含量散点图

图中彩色圆圈代表各加积型红土剖面,灰色正方形代表砂岩

Fig.8 Scatter plots of Ti/Zr and Ti percentage of the aggradational red earth sections in the Jinqu Basin

Colored circles represent aggradational red earth sections and grey squares represent sandstones

950 Ma、1 000~1 100 Ma、1 410~1 550 Ma 和 2 000~2 100 Ma 出现了年龄峰值,而与北方黄土的锆石年龄谱特征存在显著差异。此外,金衢盆地加积型红土(TX 剖面)也与本地基岩风化物(QJ-JY、DC-JY)的 U-Pb 年龄谱的年龄峰值存在相似,主要表现在 TX 剖面均质红土和网纹红土在 100~150 Ma、300~450 Ma、800~1 100 Ma 等强年龄峰值段高度一致。PJLK 剖面红土和基岩风化物(PJWQ-JY)在 100~200 Ma、700~850 Ma 和 500~550 Ma 等年龄峰值段基本一致,表现出较高的相似性(张忠萍,2023)。

从物源构成来看,金衢盆地内可能与盆地外加积型红土分布区存在不同的源库系统,在冬季,西北风和北风主导着气候,北方的风尘物质能显著影响赣北和洞庭湖等地区,但金衢盆地位置更加偏南,冬季风的作用下北方粉尘输送能力有限,不足以到达该地。然而,在冬季风尤为强劲的冰期阶段,长江河漫滩经历了显著的扩张,为金衢盆地就近提供了丰富的沉积物质。此外,金衢盆地独特的地形特征以及局部风况的复杂作用,促进了盆地边缘基岩风化产物的有效搬运与沉积,使得这些基岩风化物能够更加容易到达并就地沉积(张忠萍,2023)。综上所述,金衢盆地独特的物源构成,即长江漫滩沉积物与基岩风化物的综合作用,可能是该地区加积型风化强度展现出非纬向地带性特征的关键因素之一。

3.4.2 地形影响

金衢盆地是一个长约220 km,宽20~40 km的东北—西南走向的走廊式构造盆地(陈初才,1991;吕学斌,1993),独特的长廊式地形构造,对盆地内红土风化的影响十分复杂,主要表现在如下三个方面。

首先,金衢盆地具有复杂的地质历史。盆地的形成可以追溯到中生代的晚侏罗世。在晚侏罗世之前的地质历史演化时期,盆地范围内时升时降,剥蚀沉积几经沧桑。到了晚侏罗世末期,燕山运动第三幕产生了北东东向地堑、半地堑式的断陷盆地,构成了金衢盆地的雏形。其后断陷盆地由内陆湖盆逐步演化为今天的外流盆地,四周隆起的断块逐步演化为今天的山脉体系,最终构成了东西向长廊状地貌格局(陈初才,1991)。金衢盆地因其复杂的构造演化过程,而成为南方重要的红层盆地之一,盆地内连片分布着第四纪古红土,经过湿热风化作用,为加积型红土的形成提供了物质基础。

其次,地貌、地形构造上的差异导致盆地内部风化过程存在差异性。在经历过复杂的构造活动和动力演变后,盆地的地貌形态,具有明显的对称性和阶梯状上升特征,从南北两缘至盆底依次为中山、低山、高丘、低丘、岗地、平原等地貌。盆地底部比较平坦,由河谷平原与丘陵构成,海拔范围分别为23~70 m、70~90 m、90~150 m,坡度范围为 2° ~ 6° 。盆缘海拔较高,海拔范围分别为150~250 m、250~500 m、500~1 000 m、1 000 m以上,坡度在 6° 以上(吕学斌,1993)。因此,盆地内复杂的地貌造成水热条件多样,使得盆地内部的加积型红土风化不均一。低海拔的河谷平原和丘陵地区,气温相对较高,湿度较大,降水较为丰富,这种环境条件有利于红土的风化作用。

最后,金衢盆地特殊的地形和局地气候效应的叠加影响,也会加速岩石的溶解和分解过程。一方面,金衢盆地地势低洼,山脉环绕,容易形成地形雨,使得盆地内部降水量相对较大,形成局部降水增加的气候效应。盆地内部降水较多,加之地势低洼,又使得盆地内部湿度较大,形成湿润的气候环境从而加速风化。另一方面,盆地内部昼夜温差较大,白天温度较高,夜晚较低,这种温度变化也会影响岩石的化学风化速率。盆地独特的长廊式形状,以及以北东东向延伸为主要特征的地形构造,引发了多样的小气候,这种效应对化学风化产生了显著的影响。

3.4.3 季风气候与盆地小气候的叠加作用

气候环境是影响不同气候带岩石风化过程中元素迁移的重要因素之一(Mao *et al.*, 2018; 张俊文等, 2023)。金衢盆地气候存在明显地域性,一方面,地处中亚热带,纬度偏北,且临近海域,受到太平洋季风的影响,呈现出典型的亚热带季风气候特征,气候温和湿润。另一方面,由于地形特殊、地貌复杂,盆地呈现出降水充沛和干湿两季明显等典型的小气候特征。前人对金衢盆地的降水特征研究也发现其降水量在地区分布上变化较大,总体从东到西逐渐递增,受地形的影响,降水量从盆地中心向外围也逐渐递增(浙江师范大学地理系,1993)。史料中也记载了此地干湿分明、易旱易涝的气候条件(郭文扬和汪铎,1988;浙江师范大学地理系,1993;方濒曦,2021)。

为了进一步确定金衢盆地的气候特征,将金衢盆地与其他加积型红土分布区的气象站数据对比,制作1990—2020年平均降水量折线图(图9),结果表明金衢盆地内部衢州站点(原衢县站点)的年平均降水量(QUXIAN Station),不仅高于同纬度的江西昌北站点(CHANGBEI Station),还高于安徽芜湖站点(原芜湖县站点,WUHUXIAN Station)和湖南长沙站点(CHANGSHA Station),这正是地形、气候因素综合作用的结果。由此可见,金衢盆地独特的盆地气候,为加积型红土的发育提供了良好水热条件。

综上所述,大尺度季风演化格局下,南方红土风化特征整体呈纬向地带性规律。但中亚热带 25° ~ 31° N范围内,受地形、大面积水域、潜在物源区地理特征差异等非地带性因素影响,加积型红土化学风

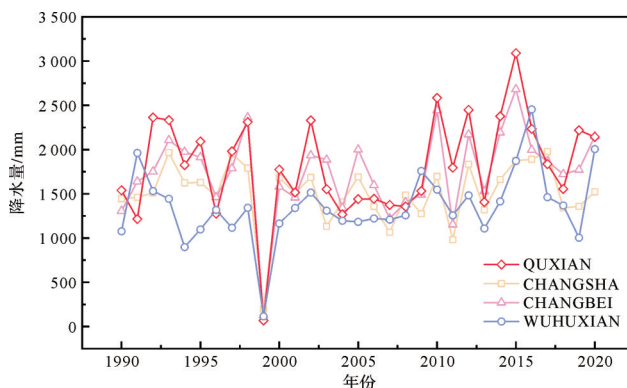


图9 金衢盆地与其他加积型红土分布区年平均降水量对比

Fig.9 Comparison of mean annual precipitation between the Jinqu Basin and other aggradational red earth distribution areas

化也呈现一定的非地带性。金衢盆地区域范围较小,相对封闭的盆地地形、局部小气候条件、基岩风化物对红土物源的贡献等非地带性因素在红土化学风化信息解读中扮演重要角色,从而在讨论各地化学风化特征时,还需要考虑地域性因素的影响。

4 结论

(1) 在大尺度上,中国南方加积型红土的风化特征具有明显的纬向地带性,各地区加积型红土的化学风化强度与纬度之间存在较好的线性关系。然而,在亚热带内部,仍有部分地区的剖面风化不符合纬向地带性,可能意味着红土风化还受到其他地理因素的影响。

(2) 金衢盆地加积型红土地球化学组成具有较好的一致性,样品间元素富集亏损情况的差异也较小。但与同纬度其他加积型红土化学风化特征相比,金衢盆地加积型红土样品的剖面构型与风化特征方面均表现出一定差异。一方面,盆地内剖面构型以均质红土与网纹红土为主,较该组合在亚热带其他地区出现纬度更北。另一方面,风化研究也揭示出该地区较强的风化信号特征。

(3) 金衢盆地内部加积型红土的风化特征为多因素共同作用的结果。首先,金衢盆地具有复杂的地质历史和地壳结构,区域内白垩系红层广布,其经历过湿热风化作用,为加积型红土的形成提供了物质基础。其次,盆地的总体走向为东北—西南走向,由多个小盆地构成,来自不同盆地的地方性信号存在差异。这种地形构造上的差异可能导致不同地区风化过程的差异性。此外,盆地内地质地貌复杂、水热条件多样,存在独特的小气候,这些因素相互作用,共同影响着盆地内红土的风化过程。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师在论文修改过程中提供的宝贵建议。

参考文献(References)

曹林. 2012. 金衢盆地河流阶地发育和环境变化[D]. 金华:浙江师范大学:1-69. [Cao Lin. 2012. The terrace development and environmental change in the Jinhua-Quzhou Basin[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-69.]

操应长,王艳忠,徐涛玉,等. 2007. 特征元素比值在沉积物物源分析中的应用:以东营凹陷王58井区沙四上亚段研究为例[J]. 沉积学报, 25(2): 230-238. [Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Xu Taoyu, et al. 2007. Application of the ratio of characteristic ele-

ments in provenance analysis: A case study from the upper part of the Fourth member of the Shahejie Fm. in the W58 area, Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(2): 230-238.]

陈初才. 1991. 浙江省金衢地区生态环境演变[J]. 山地研究, 9(2): 73-80. [Chen Chucai. 1991. evolution of ecologic environment in Jinhua-Quzhou region, Zhejiang province[J]. Mountain Research, 9(2): 73-80.]

陈骏,安芷生,刘连文,等. 2001. 最近2.5 Ma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:地球科学, 31(2): 136-145. [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, et al. 2001. 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 China Earth Sciences, 31(2): 136-145.]

陈璞皎,郑祥民,周立旻,等. 2017. 宁镇地区下蜀黄土粒度特征及其古环境意义[J]. 地质科技情报, 36(5): 7-13. [Chen Pujiao, Zheng Xiangmin, Zhou Limin, et al. 2017. Grain size distribution and its significance of the Xiashu loess in Nanjing-Zhenjiang area[J]. Geological Science and Technology Information, 36(5): 7-13.]

陈秀玲,李志忠,靳建辉,等. 2009. 中国南方第四纪红土研究进展[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 25(5): 118-124. [Chen Xiuling, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. 2009. Research advance of Quaternary red earth in South China[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science edition), 25(5): 118-124.]

范庆斌. 2014. 中国南方风成沉积石英颗粒表面形态特征及环境意义[D]. 金华:浙江师范大学:1-64. [Fan Qingbin. 2014. Surface features of quartz grains of aeolian deposit in South China and its environmental significance[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-64.]

方瀛曦. 2021. 金衢盆地古堰坝灌区景观研究[D]. 北京:北京林业大学:1-139. [Fang Binxi. 2021. Research on the landscape of ancient weir irrigation areas in Jinqu Basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University: 1-139.]

冯连君,储雪蕾,张启锐,等. 2003. 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, 10(4): 539-544. [Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. 2003. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 10(4): 539-544.]

顾延生,肖春娥,章泽军,等. 2002. 中国南方红土的研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版)(1): 69-75. [Gu Yansheng, Xiao Chun'e, Zhang Zejun, et al. 2002. Research advance of red earth in South China[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (1): 69-75.]

郭文扬,汪铎. 1988. 浙江省金衢盆地的旱涝特点[J]. 山地研究, 6(3): 189-192. [Guo Wenyang, Wang Duo. 1988. The drought and waterlogging characteristics in Jinhua-Quzhou Basin of Zhejiang province[J]. Mountain Research, 6(3): 189-192.]

何俊杰. 2019. 加积型红土粘土矿物及风化特征研究[D]. 金华:浙江师范大学:1-71. [He Junjie. 2019. Study on the clay minerals and weathering characteristics of aggradation red earth[D]. Jinhua:

- Zhejiang Normal University: 1-71.]
- 何梦颖, 郑洪波, 贾军涛. 2013. 长江现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成与物源示踪研究[J]. 第四纪研究, 33(4): 656-670. [He Mengying, Zheng Hongbo, Jia Juntao. 2013. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of modern sediments in the Yangtze River: Implications for the sediment provenance[J]. Quaternary Sciences, 33(4): 656-670.]
- 胡雪峰, 龚子同. 2001. 江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究[J]. 土壤学报, 38(1): 1-9. [Hu Xuefeng, Gong Zitong. 2001. Comparative study on the origin of Quaternary red earth in Jiujiang and Taihe, Jiangxi province[J]. Acta Pedologica Sinica, 38(1): 1-9.]
- 胡雪峰, 沈铭能, 方圣琼. 2004. 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, 24(2): 160-166. [Hu Xuefeng, Shen Mingneng, Fang Shengqiong. 2004. Grain-size distribution of the reticulate red clay in southern Anhui province and its paleo-environmental significance[J]. Quaternary Sciences, 24(2): 160-166.]
- 胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 2005. 南方网纹红土多元成因的粒度证据[J]. 科学通报, 50(9): 918-925. [Hu Xuefeng, Zhu Yu, Shen Mingneng. 2005. Grain-size evidence for multiple origins of the reticulate red clay in southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 50(9): 918-925.]
- 胡亚萍, 贾玉连, 张智, 等. 2013. 粒度揭示的末次间冰期以来长江中游风沙—风尘体系[J]. 中国沙漠, 33(5): 1324-1332. [Hu Yaping, Jia Yulian, Zhang Zhi, et al. 2013. Sand-loess system in the middle reaches of Yangtze River since late interglacial indicated by grain size[J]. Journal of Desert Research, 33(5): 1324-1332.]
- 黄颖, 朱丽东, 张晓, 等. 2019. 庐山北麓 JL 红土剖面粉砂粒级元素地球化学特征及其物源意义[J]. 第四纪研究, 39(5): 1092-1102. [Huang Ying, Zhu Lidong, Zhang Xiao, et al. 2019. Geochemical characteristics and their provenance implications of the silt fraction from JL red earth section in Lushan region, Jiujiang, South China[J]. Quaternary Sciences, 39(5): 1092-1102.]
- 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿. 1999. 中国红土与自然地带变迁[J]. 地理学报, 54(3): 193-203. [Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang, Chen Junhong. 1999. The change of natural zones and the evolution of red earth in China[J]. Acta Geographica Sinica, 54(3): 193-203.]
- 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 1997. 九江地区网纹红土的时代[J]. 地质力学学报, 3(4): 27-32. [Jiang Fuchu, Wu Xihao, Xiao Huaguo, et al. 1997. Age of the vermiculated red soil in Jiujiang area, central China[J]. Journal of Geomechanics, 3(4): 27-32.]
- 姜永见. 2009. 中亚热带加积型红土沉积特征与沉积环境变化[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-80. [Jiang Yongjian. 2009. Sedimentary characteristics and environmental changes of aggradation red earth in mid-subtropics[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-80.]
- 李长安, 顾延生. 1997. 江西修水第四系网纹红土的地层学研究[J]. 地层学杂志, 21(3): 226-232. [Li Chang'an, Gu Yansheng. 1997. Stratigraphic study on the vermicular red earth at Xiushui county, Jiangxi province[J]. Journal of Stratigraphy, 21(3): 226-232.]
- 李吉均. 1983. 中国东部山地第四纪冰期气候问题[J]. 地理学报, 38(4): 438-442. [Li Jijun. 1983. Climatic problems of Quaternary glaciation in the eastern China mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 38(4): 438-442.]
- 李建武. 2009. 金衢盆地红土的理化特征与形成环境[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-60. [Li Jianwu. 2009. The physical and geochemical characteristics and formative environment of red earth in Jinhua-Quzhou Basin[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-60.]
- 李金典. 2019. 江西省九江盆地晚新生代沉积序列及盆地演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-61. [Li Jindian. 2019. Late Cenozoic sedimentary sequence and basin evolution of the Jiujiang Basin, Jiangxi province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-61.]
- 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 2007. 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, 62(11): 1174-1184. [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, et al. 2007. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 62(11): 1174-1184.]
- 李佐卿. 2013. 鄱阳湖周边地区第四纪风成沉积物粒度空间变化及环境意义[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-60. [Li Zuoqing. 2013. The grain size characteristics, space changing rule and environmental significance of eolian deposits in Quaternary in the surrounding area of Poyang Lake[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-60.]
- 林旭, 胡程伟, 吴中海, 等. 2023. 江西九江中更新世红土物质来源研究[J]. 地球学报, 44(3): 511-521. [Lin Xu, Hu Chengwei, Wu Zhonghai, et al. 2023. Provenance tracing of Middle Pleistocene red earth in the Jiujiang area, Jiangxi province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(3): 511-521.]
- 凌超豪, 龙进, 贾玉连, 等. 2015. 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, 17(5): 699-708. [Ling Chao hao, Long Jin, Jia Yulian, et al. 2015. Geochemical characteristics and palaeoclimate significance of the Quaternary laterite of Tutan section in Poyang Lake region, northern Jiangxi province[J]. Journal of Palaeogeography, 17(5): 699-708.]
- 刘海丽. 2012. 宣城官塘村红土剖面的网纹成因浅析[D]. 南京: 南京大学: 1-68. [Liu Haili. 2012. Formation of vermiculated mottles in the laterite at Guantangcun of Xuancheng[D]. Nanjing: Nanjing University: 1-68.]
- 刘育燕, 林文姣, 朱宗敏, 等. 2003. 南方红土中的磁极倒转以及磁化率变动记录[J]. 地质科技情报, 22(3): 33-36. [Liu Yuyan, Lin Wenjiao, Zhu Zongmin, et al. 2003. Geomagnetic polarity reversal records and susceptibility variations of the laterite in South China[J]. Geological Science and Technology Information, 22(3): 33-36.]
- 吕学斌. 1993. 金衢盆地沉积环境演变[J]. 山地研究, 11(1): 15-22. [Lü Xuebin. 1993. Evolution of sedimentary environment of Jinhua-Quzhou Basin, Zhejiang province[J]. Mountain Research, 11(1): 15-22.]
- 马桢桢. 2022. 加积型红土粉砂组分元素地球化学特征及物源解析

- [D]. 金华:浙江师范大学:1-54. [Ma Zhenzhen. 2022. Geochemical characteristics and their provenance implication of the silt fraction from aggradation red earth[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-54.]
- 马桢桢,朱丽东,张杭佳,等. 2022. 中国南方红土记录的晚第四纪干旱化[J]. 第四纪研究,42(6):1501-1516. [Ma Zhenzhen, Zhu Lidong, Zhang Hangjia, et al. 2022. Late Quaternary aridification recorded by red earth from South China[J]. Quaternary Sciences, 42(6): 1501-1516.]
- 莫东坡. 2018. 金衢盆地加积型红土年代学初步研究[D]. 金华:浙江师范大学:1-66. [Mo Dongpo. 2018. Preliminary studies on chronology of aggradation red earth in Jinhua-Quzhou Basin[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-66.]
- 彭莎莎. 2009. 江西九江红土堆积的磁性地层学及其成因研究[D]. 青岛:中国海洋大学:1-55. [Peng Shasha. 2009. Magnetostatigraphy and origin of the red earth formation in Jiujiang city of Jiangxi province China[D]. Qingdao: Ocean University of China: 1-55.]
- 乔彦松,郭正堂,郝青振,等. 2003. 皖南风尘堆积—土壤序列的磁性地层学研究及其古环境意义[J]. 科学通报,48(13):1465-1469. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. 2003. Research on magnetic stratigraphy of aeolian dust deposition-soil sequence in south Anhui and its paleoenvironmental significance [J]. Chinese Science Bulletin, 48(13): 1465-1469.]
- 万智巍,陈曦,鞠民,等. 2020. 鄱阳湖南矶湿地沉积物粒级组成特征及搬运趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,29(11):2462-2469. [Wan Zhiwei, Chen Xi, Ju Min, et al. 2020. Analysis of grain size characteristics and trend of sediments in the Nanji wetland of Poyang Lake[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 29(11): 2462-2469.]
- 王海力. 2012. 中亚热带第四纪风成沉积物地球化学特征[D]. 金华:浙江师范大学:1-77. [Wang Haili. 2012. Geochemical characteristics of the Quaternary eolian sediments in mid-subtropics[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-77.]
- 汪玲玲,李凤全,吴开钦,等. 2024. 九江加积型红土网纹形态特征及其环境意义[J]. 沉积学报,42(2):534-544. [Wang Lingling, Li Fengquan, Wu Kaiqin, et al. 2024. Reticulate morphologies and environmental significance of red earth aggradation in Jiujiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(2): 534-544.]
- 王婷,孙有斌,刘星星. 2017. 中更新世气候转型:特征、机制和展望[J]. 科学通报,62(33):3861-3872. [Wang Ting, Sun Youbin, Liu Xingxing. 2017. Mid-Pleistocene climate transition: Characteristic, mechanism and perspective[J]. Chinese Science Bulletin, 62(33): 3861-3872.]
- 吴开钦. 2022. 我国南方加积型网纹红土网纹形态特征及其与理化性质的关系[D]. 金华:浙江师范大学:1-84. [Wu Kaiqin. 2022. Morphological characteristics of reticulate red earth and their relationship with physicochemical properties in southern China[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-84.]
- 熊文婷. 2022. 加积型红土地球化学粒级效应及其环境意义[D]. 金华:浙江师范大学:1-48. [Xiong Wenting. 2022. Geochemical grain size effect of aggradational red earth and its environmental significance[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-48.]
- 熊文婷,朱丽东,张晓,等. 2020. 中国南方红土记录的中更新世气候转型及其环境效应[J]. 第四纪研究,40(6):1441-1452. [Xiong Wenting, Zhu Lidong, Zhang Xiao, et al. 2020. Middle Pleistocene transition and its environmental effects revealed by red earth of South China[J]. Quaternary Sciences, 40(6): 1441-1452.]
- 徐传奇,廖富强,贾玉连,等. 2016. 中国南方网纹红土元素地球化学特征及其对网纹化过程的指示意义[J]. 古地理学报,18(5):865-878. [Xu Chuanqi, Liao Fuqiang, Jia Yulian, et al. 2016. Element geochemical characteristics of the reticulate red clay in southern China and its significance for the formation process of reticulated mottles[J]. Journal of Palaeogeography, 18(5): 865-878.]
- 许良峰,魏骥,姜伟. 2010. 皖南网纹红土的剖面风化特征及其古气候意义[J]. 土壤通报,41(1):7-12. [Xu Liangfeng, Wei Ji, Jiang Wei. 2010. The weathering characteristics of the reticulate red clay in southern Anhui province and its paleo-environmental significance[J]. Chinese Journal of Soil Science, 41(1): 7-12.]
- 杨达源. 1991. 中国东部的第四纪风尘堆积与季风变迁[J]. 第四纪研究,11(4):354-360. [Yang Dayuan. 1991. The Quaternary dust-fall accumulation and the monsoon variability in eastern China[J]. Quaternary Sciences, 11(4): 354-360.]
- 杨立辉. 2017. 长江中下游地区第四纪红土沉积特征与成因机制研究[D]. 上海:华东师范大学:22-78. [Yang Lihui. 2017. The study of sedimentary characteristics and genetic mechanism of the Quaternary red clay in the middle and lower reaches of Yangtze River[D]. Shanghai: East China Normal University: 22-78.]
- 杨立辉,叶玮,朱丽东,等. 2005. 中国南方第四纪红土的形成时代[J]. 热带地理,25(4):293-297. [Yang Lihui, Ye Wei, Zhu Lidong, et al. 2005. A summary of the Quaternary red earth dating research in southern China[J]. Tropical Geography, 25(4): 293-297.]
- 杨立辉,叶玮,朱丽东,等. 2008. 第四纪加积型红土与黄土的风成相似性探讨[J]. 干旱区地理,31(3):341-347. [Yang Lihui, Ye Wei, Zhu Lidong, et al. 2008. Aeolian-genesis comparability of aggraded red earth in South China with loess in North China[J]. Arid Land Geography, 31(3): 341-347.]
- 伊继雪. 2010. 第四纪加积型红土与下蜀黄土理化特征对比及环境意义[D]. 金华:浙江师范大学:1-75. [Yi Jixue. 2010. Comparative study on Quaternary red earth and Xiashu loess in physical and chemical characteristics and its environmental significance[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-75.]
- 伊继雪,朱丽东,姜永见,等. 2009. 第四纪加积型红土与下蜀黄土理化特征比较[J]. 海洋地质与第四纪地质,29(2):123-130. [Yi Jixue, Zhu Lidong, Jiang Yongjian, et al. 2009. Comparative study on Quaternary red earth and Xiashu loess in physical and chemical characteristics[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(2): 123-130.]
- 尹秋珍,郭正堂. 2006. 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,51(2):186-193. [Yin Qiuzhen, Guo Zhengtang. 2006. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in southern China as

- an indication of unusually strengthened East Asian monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 51(2): 186-193.]
- 应立朝,梁斌,王全伟,等. 2012. 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, 18(4): 759-764. [Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. 2012. Major elements characters of the Middle Pleistocene vermicular red clay from the western Sichuan Plain[J]. Geological Journal of China Universities, 18(4): 759-764.]
- 于振江,黄多成. 1996. 安徽省沿江地区网纹红土和下蜀土的形成环境及其年龄[J]. 安徽地质, 6(3): 48-56. [Yu Zhenjiang, Huang Duocheng. 1996. Formation environment of net veined laterite and Xiashu loess and their ages in the area along the Yangtze River, Anhui province[J]. Geology of Anhui, 6(3): 48-56.]
- 袁宝印,夏正楷,李保生,等. 2008. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. 第四纪研究, 28(1): 1-13. [Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. 2008. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern China[J]. Quaternary Sciences, 28(1): 1-13.]
- 詹文娟. 2015. 中亚热带加积型红土重矿物特征及物源探讨[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-52. [Zhan Wenjuan. 2015. Heavy minerals composition and its provenance implications of aggradation red clay in mid-subtropics, China[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-52.]
- 张俊文,闫雅妮,孟俊伦,等. 2023. 大兴安岭地区花岗岩风化过程中锂同位素地球化学行为[J]. 矿物岩石地球化学通报, 42(4): 873-881. [Zhang Junwen, Yan Yani, Meng Junlun, et al. 2023. Lithium isotope geochemical behavior in the weathering process of granites in the Greater Khingan Mountain area, northeastern China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 42(4): 873-881.]
- 张明强,朱丽东,姜永见,等. 2010. 九江JL红土剖面记录的中更新世气候转型事件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(6): 115-123. [Zhang Mingqiang, Zhu Lidong, Jiang Yongjian, et al. 2010. Mid-Pleistocene climate transition event recorded by JL red earth section, Jiujiang, Jiangxi province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 30(6): 115-123.]
- 张晓. 2021. 加积型红土矿物组成特征记录的东亚季风演化[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-69. [Zhang Xiao. 2021. Evolution of East Asian monsoon recorded by mineral composition characteristics of aggradational red earth[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-69.]
- 张晓,朱丽东,黄颖,等. 2020. 加积型网纹红土网纹化机制及形成环境[J]. 第四纪研究, 40(1): 214-228. [Zhang Xiao, Zhu Lidong, Huang Ying, et al. 2020. The reticulated mechanism and its climatic implication of aggradation red earth[J]. Quaternary Sciences, 40(1): 214-228.]
- 张晓,朱丽东,李凤全,等. 2022. 0.44 Ma以来南方风尘加积型红土物源分析: 重矿物和碎屑锆石年代学证据[J]. 沉积学报, 40(2): 494-507. [Zhang Xiao, Zhu Lidong, Li Fengquan, et al. 2022. Provenance analysis of eolian red earth aggradation in southern China since 0.44 Ma: Heavy minerals and detrital zircon geochronology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 494-507.]
- 张智,贾玉连,彭学敏,等. 2014. 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, 23(8): 1125-1131. [Zhang Zhi, Jia Yulian, Peng Xuemin, et al. 2014. The study of chemical weathering intensity in north Poyang Lake region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 23(8): 1125-1131.]
- 张忠萍. 2023. 金衢盆地加积型红土物源示踪[D]. 金华: 浙江师范大学: 1-80. [Zhang Zhongping. 2023. Provenance identification of cumulated red earth in the Jinqi Basin[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-80.]
- 赵其国. 1992. 我国红壤现代成土过程和发育年龄的初步研究[J]. 第四纪研究, 12(4): 341-351. [Zhao Qiguo. 1992. A study on recent pedogenic process and its developing age of red soils in China[J]. Quaternary Sciences, 12(4): 341-351.]
- 赵其国,杨浩. 1995. 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, 15(2): 107-116. [Zhao Qiguo, Yang Hao. 1995. A preliminary study on red earth and changes of Quaternary environment in South China[J]. Quaternary Sciences, 15(2): 107-116.]
- 浙江师范大学地理系. 1993. 金衢盆地地理研究[M]. 北京: 气象出版社: 1-169. [Zhejiang Normal University Geography Department. 1993. A geography study on Jinqi Basin[M]. Beijing: Meteorological Press: 1-169.]
- 朱丽东. 2007. 中亚热带加积型红土及其所记录的第四纪环境变化探讨[D]. 兰州: 兰州大学: 1-156. [Zhu Lidong. 2007. Aggradation red earth sediments in mid-subtropics of China and their recorded environmental changes during Quaternary[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-156.]
- 朱丽东,谷喜吉,叶玮,等. 2014. 洞庭湖周边地区第四纪红土粒度特征及环境意义[J]. 地理科学进展, 33(1): 13-22. [Zhu Lidong, Gu Xiji, Ye Wei, et al. 2014. Grain-size features of Quaternary red earth in Dongting Lake area and their paleoenvironmental significance[J]. Progress in Geography, 33(1): 13-22.]
- 朱丽东,姜永见,张明强,等. 2011. 庐山JL剖面红土磁化率特征及古环境记录[J]. 山地学报, 29(4): 385-394. [Zhu Lidong, Jiang Yongjian, Zhang Mingqiang, et al. 2011. Characteristics of magnetic susceptibility and its paleoenvironmental records from JL red earth section, Lushan area[J]. Mountain Research, 29(4): 385-394.]
- 朱丽东,叶玮,周尚哲,等. 2006a. 金衢盆地第四纪红土沉积粒度组成特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(4): 111-116. [Zhu Lidong, Ye Wei, Zhou Shangzhe, et al. 2006a. Grain-size features of Quaternary red earth in Jinhua-Quzhou Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(4): 111-116.]
- 朱丽东,叶玮,周尚哲,等. 2006b. 中亚热带第四纪红粘土的粒度特征[J]. 地理科学, 26(5): 586-591. [Zhu Lidong, Ye Wei, Zhou Shangzhe, et al. 2006b. Grain-size features of red earth in mid-subtropics[J]. Scientia Geographica Sinica, 26(5): 586-591.]
- 朱丽东,周尚哲,李凤全,等. 2007a. 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, 27(1): 117-123. [Zhu Lidong,

- Zhou Shangzhe, Li Fengquan, et al. 2007a. The elemental transport features of red earth from TX-section and its paleo-climatic implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(1): 117-123.]
- 朱丽东,周尚哲,李凤全,等. 2007b. 南方更新世红土氧化物地球化学特征[J]. *地球化学*, 36(3): 295-302. [Zhu Lidong, Zhou Shangzhe, Li Fengquan, et al. 2007b. Geochemical behavior of major elements of Pleistocene red earth in South China[J]. *Geochimica*, 36(3): 295-302.]
- 朱丽东,周尚哲,叶玮,等. 2007c. 网纹红土稀土元素地球化学特征的初步研究[J]. *中国沙漠*, 27(2): 194-200. [Zhu Lidong, Zhou Shangzhe, Ye Wei, et al. 2007c. Preliminary study on geochemical behavior of rare earth element of plinthitic red earth in South China [J]. *Journal of Desert Research*, 27(2): 194-200.]
- 朱宗敏,杨文强,林文姣,等. 2006. 安徽宣城第四纪网纹红土的磁组构特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 26(4): 105-110. [Zhu Zongmin, Yang Wenqiang, Lin Wenjiao, et al. 2006. Magnetic fabric characteristics and significance of reticulate red earth in Xuancheng profile, Anhui province[J]. *Marine Geology Quaternary Geology*, 26(4): 105-110.]
- Ashley G M, Driese S G. 2000. Paleopedology and paleohydrology of a volcanoclastic paleosol interval: Implications for early Pleistocene stratigraphy and paleoclimate record, Olduvai Gorge, Tanzania[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 70(5): 1065-1080.
- Che X D, Li G J. 2013. Binary sources of loess on the Chinese Loess Plateau revealed by U-Pb ages of zircon[J]. *Quaternary Research*, 80(3): 545-551.
- Dickson B L, Scott K M. 1998. Recognition of aeolian soils of the Blayney district, NSW: Implications for mineral exploration[J]. *Journal of Geochemical exploration*, 63(3): 237-251.
- Fang X M, Li J J, Chen X L, et al. 2002. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China[J]. *Science China Earth Sciences*, 45(4): 289-299.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921-924.
- He M Y, Zheng H B, Clift P D. 2013. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope data from the Yangtze River sands: Implications for major magmatic events and crustal evolution in central China[J]. *Chemical Geology*, 360/361: 186-203.
- Hong H L, Gu Y S, Li R B, et al. 2010. Clay mineralogy and geochemistry and their palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits in the Xuancheng section, southern China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 25(5): 662-674.
- Hong H L, Gu Y S, Yin K, et al. 2013. Clay record of climate change since the mid-Pleistocene in Jiujiang, South China[J]. *Boreas*, 42(1): 173-183.
- Hu X F, Du Y, Liu X J, et al. 2015. Polypedogenic case of loess overlying red clay as a response to the last glacial-interglacial cycle in mid-subtropical Southeast China[J]. *Aeolian Research*, 16: 125-142.
- Jansen J H F, Kuijpers A, Troelstra S R. 1986. A Mid-Brunhes climatic event: Long-term changes in global atmosphere and ocean circulation[J]. *Science*, 232(4750): 619-622.
- Lu P, Fu Q, Seyfried W, et al. 2013. Coupled alkali feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems-2: New experiments with supercritical CO₂ and implications for carbon sequestration[J]. *Applied Geochemistry*, 30: 75-90.
- Mao H R, Zhao Z Q, Cui L F, et al. 2018. The influence of climate and topography on chemical weathering of granitic regoliths in the monsoon region of China[J]. *Acta Geochimica*, 37(5): 758-768.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659-1666.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715-717.
- Xiong S F, Sun D H, Ding Z L. 2002. Aeolian origin of the red earth in Southeast China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 17(2): 181-191.

Non-Latitudinal Zonal Characteristics and Origin of Chemical Weathering of Aggradational Red Earth in Southern China

WANG Ji^{1,2}, ZHU LiDong^{1,2}, YU RuiFei^{1,2}, ZHANG ZhongPing¹, DU GuangQin^{1,2}

1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

2. Jinhua Key Laboratory of Watershed Earth Surface Processes and Ecological Security, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract: [Objective] Research on the weathering process of the aggradation red earth in subtropical China has long been crucial for understanding the evolution of the Quaternary environment. However, a comprehensive knowledge of the weathering environment of the aggradation red earth is hampered by the infrequent reporting of research on the weathering characteristics of the aggradation red earth at the spatial scale. [Methods] Based on a systematic analysis of the weathering characteristics of the aggradational red earth sections in southern China, this study focused on the Jinqi Basin, where non-zonal factors have a significant impact. The research primarily explored the chemical weathering characteristics and formation mechanisms of red earth within the basin, to deepen our understanding of the weathering features of aggradational red earth. [Results] (1) On a large scale, the weathering intensity of aggradational red earth in southern China is strongly correlated with hydrothermal conditions, with weathering intensifying as latitude decreases. However, the chemical weathering of red earth in certain locations or specific sections does not entirely conform to the latitudinal zonality in the mid-subtropical region between 25° N and 31° N, where aggradational red earth is widely spread. (2) The geochemical composition of aggradational red earth in the Jinqi Basin exhibits good consistency, with minimal differences in element enrichment or depletion among samples. However, there is regional variability in the degree of chemical weathering in the developmental stages of vermicular and typical red earth following the stagnation of vermicularization in the Jinqi Basin, compared with the chemical weathering characteristics of other aggradational red earth sections at the same latitude. (3) Influenced by a combination of factors such as provenance, topography, and local climate, the weathering characteristics of the aggradational red earth in the Jinqi Basin exhibit certain non-latitudinal zonal features. [Conclusions] The weathering characteristics of the aggradational red earth in southern China primarily follow a latitudinal zonal pattern under the large-scale monsoon evolution pattern. However, owing to the influence of non-zonal factors including topography, water, and differences in the geographic features of potential provenance, the chemical weathering of aggradational red earth also exhibits certain non-zonal characteristics within the mid-subtropical region between 25° N and 31° N. The relatively small and enclosed basin terrain of the Jinqi Basin, along with local microclimate conditions and contribution of bedrock weathering products to the red earth provenance, plays a significant role in interpreting the chemical weathering information of the red earth. Therefore, it is crucial to consider regional impacts while discussing the chemical weathering characteristics in different areas.

Key words: aggradational red earth; chemical weathering; weathering zonality; regional factors

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41572345; Jinhua Key Laboratory of Watershed Earth Surface Processes and Ecological Security, No. KF-2022-04

Corresponding author: ZHU LiDong, E-mail: zhulidong@zjnu.cn