

DOI: 10.11766/trxb202011240643

王琳怡, 朱丽东, 于红梅, 李凤全, 陈天然, 贾佳, 马桢桢, 张忠萍, 张杭佳. 加积型红土剖面成壤特征及网纹化成因的土壤微形态证据[J]. 土壤学报, 2022, 59 (5): 1306–1320.

WANG Linyi, ZHU Lidong[†], YU Hongmei, LI Fengquan, CHEN Tianran, JIA Jia, MA Zhenzhen, ZHANG Zhongping, ZHANG Hangjia. Micromorphological Evidence on the Pedogenic Characteristics and Reticulated Mechanism of Aggradation Red Earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (5): 1306–1320.

加积型红土剖面成壤特征及网纹化成因的土壤微形态证据^{*}

王琳怡, 朱丽东[†], 于红梅, 李凤全, 陈天然, 贾佳, 马桢桢,
张忠萍, 张杭佳

(浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004)

摘要: 亚热带加积型红土很好地记录了中国南方第四纪以来风化特征及其变化趋势, 但相应风化强度下古土壤成壤细节仍尚待进一步揭示。本文以庐山东麓海会剖面(L-HH)为研究对象, 借助土壤微形态研究方法分析不同风化强度下古土壤成壤特征, 并结合粒度、色度、磁化率、地球化学等指标, 进一步探讨加积型红土成土环境及网纹机制。结果表明: (1) 加积型红土土壤基质以黏土、胶体为主, 并具有一定铁质侵染。沿剖面自下而上, 胶体含量由 70%减少至 50%, 黏土胶体与碎屑配比由 8: 2 逐渐变化为 6.5: 3.5, 成壤强度呈减弱趋势。(2) 土壤孔隙和形成物类型沿剖面的变化差异较好地记录了土壤水分及其干湿变化。网纹红土层以线状大孔道为主, 连通性好, 铁质迁移活跃, 铁锰质胶膜沿孔道分布且多层叠置, 部分铁质胶膜有脱色现象, 指示水分充足, 干湿变化频繁。网纹黄棕色土层大孔道减少, 孔洞、囊状孔隙增加, 有一定连结性, 铁锰胶膜多沿孔隙壁淀积, 铁锰质结核也尤为丰富, 指示水分减少, 干湿变化仍然频繁。黄棕色土层, 孔道极少, 以面状裂隙、囊状及不规则状孔隙、孔洞为主, 连结性差, 淀积胶膜多为扩散-团聚型, 水分少, 铁游离程度降低。(3) 土壤孔隙及其发育程度与网纹化程度有较好的对应关系, 裂隙产生、加宽、连通是网纹化的物理学基础。(4) 剖面土壤微形态特征与粒度、色度、磁化率等环境指标间有良好对应关系, 是解读红土形成环境、季风演化和网纹化机制的重要土壤学指标。

关键词: 加积型红土; 土壤微形态; 成壤特征; 网纹化机制

中图分类号: P595; S151 **文献标志码:** A

Micromorphological Evidence on the Pedogenic Characteristics and Reticulated Mechanism of Aggradation Red Earth

WANG Linyi, ZHU Lidong[†], YU Hongmei, LI Fengquan, CHEN Tianran, JIA Jia, MA Zhenzhen, ZHANG Zhongping, ZHANG Hangjia

(College of Geography and Environmental Science, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

* 国家自然科学基金项目(41572345、41971111)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41572345, 41971111)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhulidong@zjnu.cn

作者简介: 王琳怡(1995—), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事环境演变研究。E-mail: wly_zjnu@163.com

收稿日期: 2020-11-24; 收到修改稿日期: 2021-04-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-07-07

Abstract: 【Objective】The aggradation red earth sediment is widely distributed on terraces in the middle and lower reaches of the Yangtze River, especially in the piedmont of Lushan Mountain in China. Their sequences have well recorded the weathering history during Quaternary in South China. Therefore, the objectives of this research were to(1)investigate the micromorphological characteristics of aggradation red earth sequence and(2)reveal the paleosol pedogenic environment.【Method】The research profile was L-HH($29^{\circ}32'07.88''N$, $116^{\circ}04'19.53''E$, H=87 m)at the eastern piedmont of Lushan Mountain. Nine undisturbed samples were collected from the different pedogenic unit and made into thin sections, which were observed by plane polarized(PPL)and crossed polarized light(XPL)using Zeiss Axio Lab. A1 polarizing microscope in the laboratory. A total of 159 bulk samples were collected along with the profile at 5~6cm intervals. Moreover, particle size, chroma, susceptibility and geochemical data of the 159 bulk samples were measured.【Result】 L-HH profile can be divided into reticular red soil unit(RRS), reticulated yellowish-brown soil unit(RYB)and yellowish-brown soil unit(YBS)from the bottom up. The soil matrix under Fe-impregnation was mainly composed of clay and colloid, the content of which is up to 50%~70%. The fragments included quartz, plagioclase and muscovite, while the secondary mineral was mostly illite and vermiculite. Also, heavy minerals that were observed included apatite, zircon, rutile and tourmaline. These results suggest in general that the soil units have a moderate-strong degree of chemical weathering. However, there were differences in detail among different units. The voids types of RRS are dominated by large linear channels with good connectivity and smooth wall. Also, the pedological features were mainly composed of coating, ferromanganese nodules, and diffuse concentric rings. Additionally, the illuvial coating developed along the voids wall and formed interbedded layers. Mn-coating was mostly superposed on the Fe-coating, and some pores were filled with the coating. Besides, part of the illuvial Fe-clay coating had a decolorization phenomenon. Thus, the pedogenic environment of RRS was characterized by strong summer monsoon, high soil moisture content, and increased seasonal climate contrast. Furthermore, the voids types of RYB were dominated by vughs, chamber voids and well-connected channels. Fe-Mn features were abundant in the soil matrix. The types of pedological features were rich with Fe masses, ferromanganese nodules and rhizospheric concentric iron-rings scattered in the matrix. The brown-red or grey-black flaky coating was developed repeatedly along the voids wall, and the deposition thickness was increased. Also, the soil moisture decreased, but the alternation between dry and wet was still significant. This, indicated a warm and dry environment. The voids types of YBS were dominated by plane voids, chamber voids, irregular voids, and vughs. Also, the voids' wall was rough and the channel connection was poor. The pedological features mainly included diffused coating. A thin Fe-illuvial coating was found on some voids wall. During this period, the temperature and moisture conditions became worse. The climate was dry and cool, and the winter monsoon was strengthened. Also, changes of environmental proxies along the profile strongly supported the results of soil micromorphology. From the bottom up, the soil moisture content decreased continuously, and the climate tended to be dry and cool. The micromorphological characteristics support the view that the reticulation process was controlled by iron differentiation. Moreover, the micromorphological characteristics also showed that soil voids and plant roots accelerated the process of reticulation.【Conclusion】The findings in this study demonstrate that there is a significant correspondence between soil micromorphological characteristics and environmental proxies in the L-HH profile. This is an important indicator for interpreting the pedogenic environment of red earth, monsoon evolution signal. and the reticulated mechanism.

Key words: Aggradation red earth; Soil micromorphology; Pedogenic characteristics; Reticulated mechanism

土壤微形态能够有效还原土壤的机械组成、原始结构、成壤过程中物质淋溶、迁移、转化与淀积过程^[1]，从而被广泛用于古土壤研究。如潘美慧等^[2]利用土壤微形态方法并结合风化及粒度、磁化率、色度等参数判定古土壤发育程度，指出天水盆地北部新近系沉积序列的早中新世中晚期及中中新世分

别为湿润-半湿润及温暖湿润环境，两期古土壤发育程度均高于当地现代土壤；郭正堂等^[3]对典型黄土-古土壤序列的土壤微形态研究表明，特定微形态指标对植被和水热条件具有良好指示意义；Taheri 等^[4]在伊朗高原中部的研究认为，土壤微形态可以指示早更新世黄土序列中复合古土壤的成壤强度与成壤

条件; Srivastava 等^[5-6]则基于微形态技术很好地揭示了印度北部及恒河平原 50 ka 以来的古土壤发育特征与晚第四纪气候变化。中国南方红土通常被认为是长期湿热环境下的产物^[7-8], 或归属残余古土壤, 或为埋藏古土壤^[9], 不同时期古红土的发育程度及其时空分布与东亚季风演化相耦合^[10]。尹秋珍和郭正堂^[11-12]特别针对网纹红土开展土壤微形态研究, 认为网纹红土形成于夏季风异常强盛期, 但古土壤发育程度弱于现代砖红壤。加积型红土是亚热带地区第四纪环境变化研究的良好地质载体^[13], 其风成成因、物源、风化、古气候演化趋势已有大量研究^[14-15], 但成壤特征, 特别是网纹红土成壤机制仍然不够清晰, 现代过程研究也表明网纹红土是红壤区土壤物质循环的关键层位^[16], 需要加强机理研究。为此, 本文选取庐山东北麓海会剖面(L-HH), 在研究区加积型红土风化特征的基本框架内, 基于土壤微形态特征进一步探究加积型红土的成壤特征及网纹化过程, 以期获得红土区环境演化的土壤学证据。

1 材料与方法

1.1 供试剖面形态特征与采样

庐山山麓及环鄱阳湖周边地区是风成红土主要

分布区^[13]。海会剖面(L-HH)位于庐山东北麓海会镇(图 1a), 地理位置 29°32'07.88"N, 116°04'19.53"E, 海拔 87 m, 地势向鄱阳湖方向缓倾, 坡度 30°~35°。属亚热带季风气候, 年均气温 15℃~17℃, 年降水量 1 400~1 830 mm。该剖面质地均一, 不含砾, 无流水作用痕迹, 是庐山-鄱阳湖周边地区颇具代表性的加积型红土剖面之一, 沉积厚度 9.10 m, 未见底。如图 1b 所示, 剖面自下而上分为网纹红土、网纹黄棕色土、黄棕色土三个沉积时段共 6 个地层单元, 分别标记为①~⑥层, 沿剖面按 5 cm 间距采集理化分析样品 159 个, 并按地层倾斜度(受庐山抬升影响)进行深度校正, 同时在各地层单元内采集 9 个典型土壤微形态样品。

网纹红土时段(第①层, 9.10~3.57 m)位于剖面下部, 红黏土中镶嵌大量浅色不规则斑纹, 斑纹粗大, 呈白或灰白色。土体紧实, 具棱块状结构, 可见一定数量的铁锰胶膜。时段内基质色(Munsell 体系, 以下同)可呈红棕(2.5YR 4/6)、棕(5YR 4/6)和浊橙(5YR 4/6)等色, 土层上下铁锰胶膜含量也略有差异, 以 4.59 m 以上偏多。

网纹黄棕色土时段(第②~④层, 3.57~1.75 m), 由两层棕色粉质亚黏土(第②、第④层, 7.5YR 4/6)和其间夹有的一层暗红棕古土壤(第③层, 5YR 3/4)构成。可见铁锰胶膜和网纹结构, 但

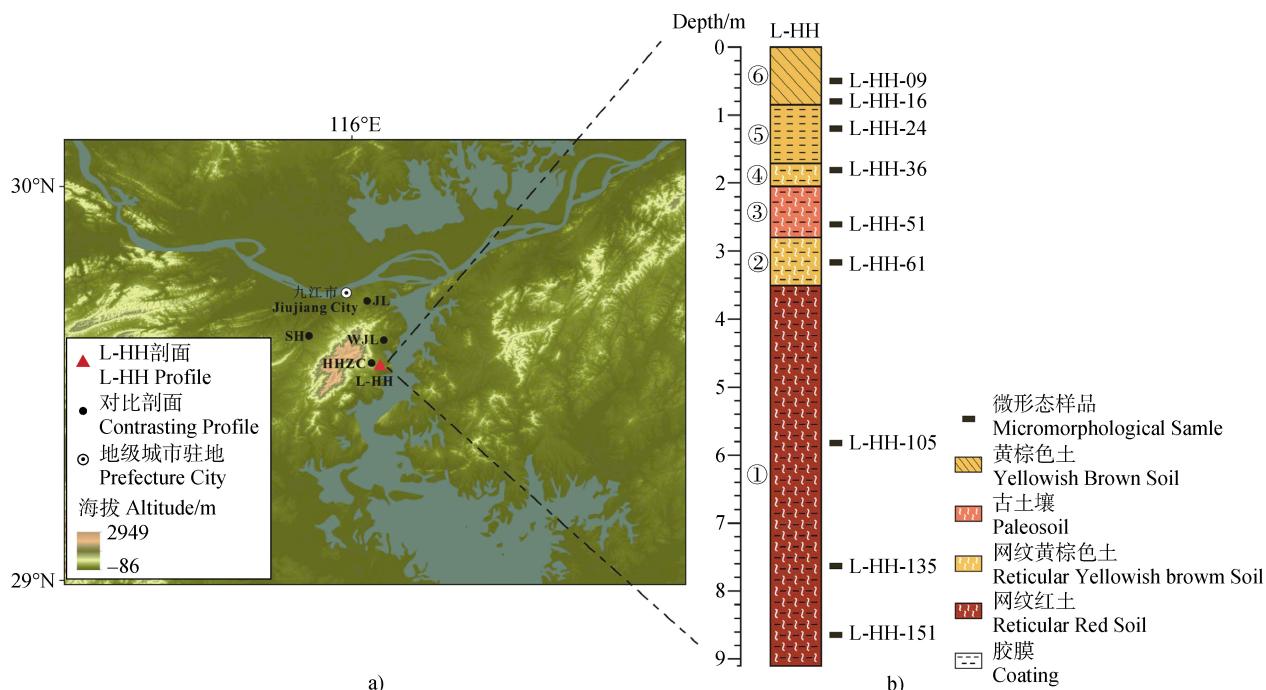


图 1 研究区地理位置、对比剖面及 L-HH 剖面岩性地层图

Fig. 1 The location, contrasting profiles and lithostratigraphic map of L-HH profile

自第②层向第④层, 斑纹(浅灰黄)渐渐细小稀疏, 铁锰胶膜亦略有减少。

黄棕色土层段(第⑤~⑥层, 1.75 m以上)位于剖面最上部, 以0.85 m为界分为2个岩性单元, 第⑤层(1.75~0.85 m)为含铁锰胶膜的黄棕色土(7.5YR 4/6), 裂隙发育, 呈棱块状; 第⑥层为质地疏松的黄土状沉积, 浊红棕(5YR 4/4)至红棕(5YR 4/6), 团粒状, 不含铁锰胶膜, 有植物根系。

1.2 研究方法

所有样品的粒度、色度、磁化率测试均完成于浙江师范大学地理过程实验室。粒度采用激光粒度法, 测试仪器为英国 Malvern 仪器公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪, 测量量程 0.02~2 000 μm 。色度采用 CIELAB 法, 测试仪器为日本柯尼卡美能达公司生产的 CR-400 色彩色差计。高频磁化率(χ_{hf})和低频磁化率(χ_{lf})采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪, 测量频率为 4.7 kHz 和 0.47 kHz, 上述指标每个样品测试三次后取平均值。土壤微形态样品的制备和矿物鉴定由廊坊尚艺岩矿鉴定有限公司完成, 鉴定设备为 OLYMPUS-BX53。土壤微形态物象鉴定完成于浙江师范大学地理过程实验室, 鉴定设备为 Zeiss Axio Lab. A1 型偏光显微镜。主量元素测定采用 X 射线荧光光谱法完成, 分析仪器为 PHLIPS 公司生产的 PW2440 型 X 射线荧光光谱仪, 分析误差<2%。

1.3 数据处理

使用 Lap scope 软件对微形态图片进行处理, 微形态术语参考《土壤微形态学发展及应用》^[17]。粒度、色度、磁化率及地球化学数据在 Microsoft

Excel2016 软件中进行整理、计算、分析, 使用 ArcGIS10.6、Origin2018 及 CorelDRAW X7 进行图表绘制。

2 结 果

2.1 加积型红土风化背景

中国南方各种类型的红土常合称为红色风化壳^[18]。然而加积型红土的风化序列不同于风化壳, 其风化序列往往不连续, 体现边沉积边风化特征。沉积作用显著的阶段风化作用较弱, 相反气候越湿热化学风化作用越强盛。许多剖面风化程度出现强弱变化, 且自网纹红土至黄棕色土风化强度逐渐减弱, 较好地反映了古气候变化的阶段性和晚更新世以来古气候渐趋干凉的过程^[13]。结合课题组前期研究, 与 L-HH 邻近的九庐大道(JL)^[13]、沙河(SH)^[13]、海会猪场(HHZC)、汪家垄(WJL)^[19]等加积型红土剖面的粒度和地球化学证据也印证了相似的趋势。各剖面黏粒(<4 μm)含量以网纹红土层最高(28.19%~36.82%), 网纹黄棕色土次之(25.23%~31.33%), 黄棕色土最低(20.06%~25.56%), 且自下而上呈减少趋势。加积型红土中盐基淋失比较彻底, K_2O 、 CaO 、 Na_2O 和 MgO 含量很低, 分别为 1.59%~2.76%、0.27%~0.41%、0.19%~0.55% 和 0.46%~0.99%; 淋溶系数 ba 值以网纹红土层最小(0.16~0.19), 网纹黄棕色土次之(0.20~0.26), 黄棕色土最高(0.23~0.31); Al_2O_3 、 Fe_2O_3 较 UCC (Taylor 标准) 偏高, 体现脱硅富铝铁化特征。如 A-CN-K 图(图 2a)及 CIA-Na/K 图(图 2b)所示,

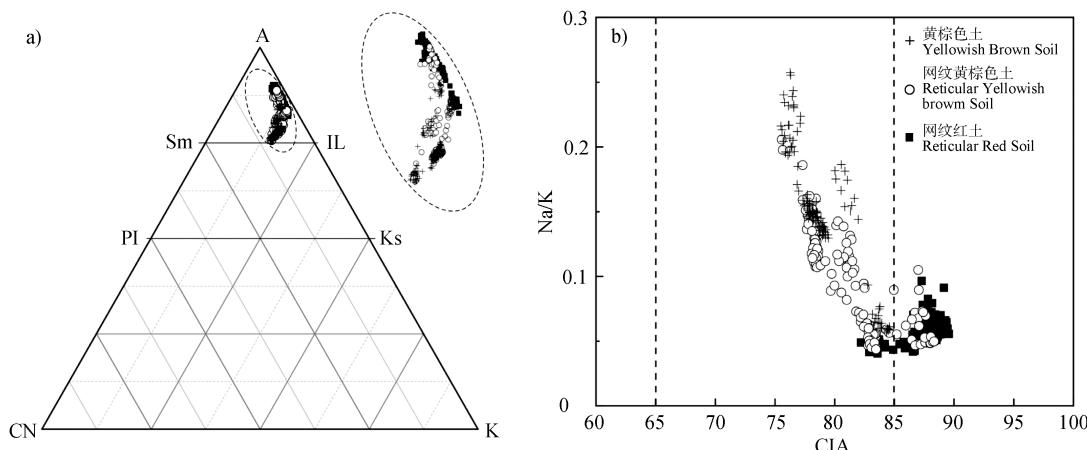


图 2 A-CN-K 化学风化趋势、加积型红土 CIA 与 Na/K 关系散点图

Fig. 2 A-CN-K diagram and scatter diagram of CIA vs. Na/k molar ratio of aggradation red earth

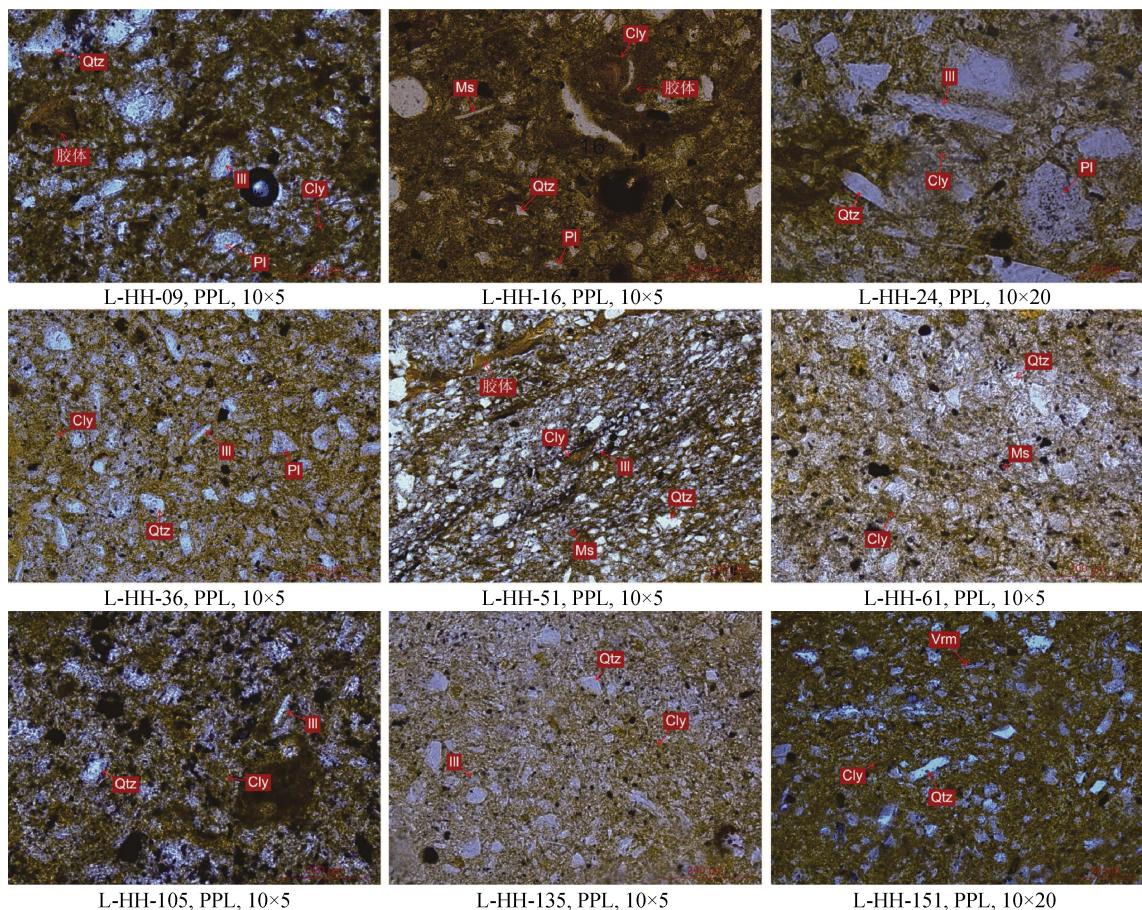
样品远离 PI-Ks 基线落在 Sm-IL 线内。黄棕色土、网纹黄棕色土样点大致与 A-CN 线平行且接近 A-K 线一侧；网纹红土样点紧靠 A-K 线，向 A 逼近（图 2a）。CIA 值分别达中等（ $75.49\% \sim 85\%$ ）或强烈（ $85\% \sim 89.06\%$ ）风化水平，中等风化区段样品间仍存在 Na/K 值分异（图 2b）。就同一剖面而言，样品间 MnO₂ 和 Fe₂O₃ 含量的变异系数较高（分别达 $16.6\% \sim 113\%$ 和 $11.6\% \sim 60.2\%$ ），表明有必要在此框架下开展成壤过程细节研究，微形态研究应该是比较好的视角。

2.2 土壤微形态特征

2.2.1 土壤基质 土壤基质由粗细颗粒物质、孔隙以及外来侵入物构成。是成壤过程中各类物质迁移、淋失、聚集、组配的结果。其中原生、次生矿物为基本矿质组分，按颗粒大小划分为粗、细物质。前者指可辨别的单个矿质粒子，后者则以集合体形式出现^[20]。加积型红土（除近地表）是人为干预极

少的古土壤，外来侵入物对土壤基质及其结构影响不大，但长期经历湿热风化，裂隙发育，所以本文忽略对外来侵入物的讨论，并在另一节讨论土壤孔隙发育特征，本节主要讨论土壤基质中基本矿质组分特征。

L-HH 剖面 9 个土壤微形态样品的镜下鉴定有相似性（图 3）。由图 3 可见：（1）碎屑部分矿物组合基本一致，原生矿物以石英、斜长石和白云母为主，占土壤基质总量的 $20\% \sim 35\%$ 。石英丰度最高，占 $15\% \sim 28\%$ ，粒径 $10 \sim 700 \mu\text{m}$ 之间，以 $10 \sim 150 \mu\text{m}$ 粒级为多，呈它形粒状、棱角状、次棱角状。斜长石丰度 $4\% \sim 5\%$ ，粒径 $10 \sim 110 \mu\text{m}$ ，半自形板状、它形粒状，具有聚片双晶，晶面浑浊。白云母丰度为 $1\% \sim 5\%$ ，无色、片状，一组解理极为发育，大小 $30 \sim 200 \mu\text{m}$ 。黑云母仅在黄棕色土中有出现，丰度为 $3\% \sim 5\%$ 。样品还普遍含有磷灰石、锆石、金红石等副矿物。（2）次生矿物组成相似。黏土矿



Clay: 黏土；Colloid: 土壤胶体；Qtz: 石英；Pl: 斜长石；III: 伊利石；Vrm: 蝇石；Ms: 白云母

图 3 L-HH 剖面加积型红土土壤基质矿物组分
Fig. 3 Mineral composition of L-HH profile under the polarized microscope

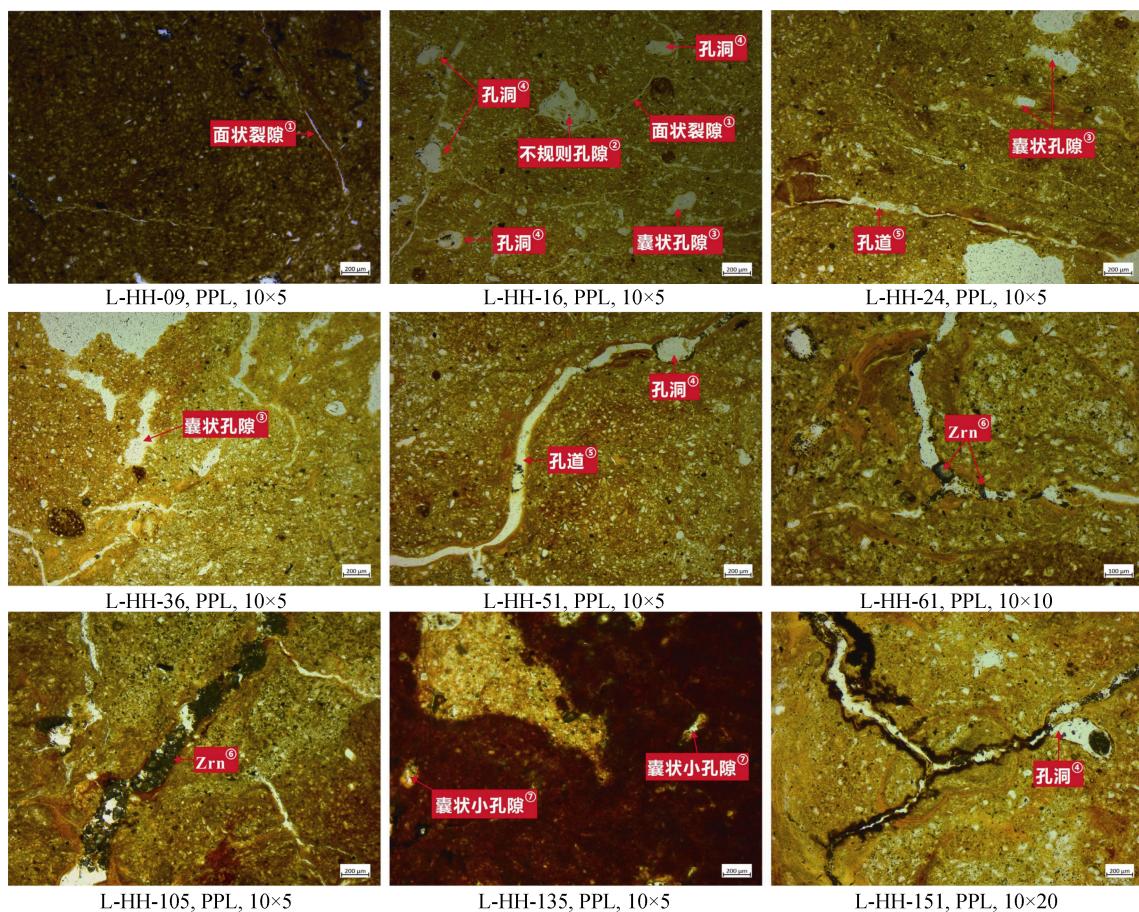
物以伊利石和蛭石为主; 铁氧化物以针铁矿和赤铁矿为主。伊利石丰度为4%~12%, 呈鳞片状, 颗粒大小为10~50 μm; 蛭石丰度为1%~5%, 呈黄褐色、浅褐色, 鳞片状, 杂乱分布; XRD衍射还表明有高岭石、绿泥石的存在。针铁矿、赤铁矿等组成土壤基质中的铁质, 丰度为2%~5%, 黄褐、红褐色, 呈胶状、粉尘状、针状、纤状。(3) 土壤基质中存在大量胶体, 浅褐色, 分散状, 集合体呈团粒状, 充填在碎屑或团粒间, 胶体占基质总量的50%~70%。铁质团粒或团块大小不一, 因铁质染色程度不同, 呈黄棕或红棕色。基质中还散布有炭屑。这些都充分表明加积型红土经历了中强程度的化学风化, 高温氧化条件比较充分, 且土壤水分存在干湿变化。

综上所述, 剖面9个样品土壤基质总体呈现黏

土胶体为主并有一定铁质侵染的特征。样品中黏土胶体占比65%~80%, 胶体含量高达50%~70%; 碎屑矿物则分散式镶嵌分布于黏土基质中, 以粉砂粒级为主。黏土胶体与碎屑部分的配比关系以网纹红土最高(8:2或7.5:2.5), 网纹黄棕色土次之(7:3), 黄棕色土最低(6.5:3.5); 胶体含量以网纹红土最高(60%~70%), 网纹黄棕色土次之(55%), 黄棕色土最低(50%)。此外, 黄棕色土和网纹红土因风化程度差异而在黑云母、铁电气石等含量方面有差异。上述结果表明, 土壤基质矿物组分能够有效解译风化程度。

2.2.2 土壤孔隙

加积型红土土壤团聚体内及不同团聚体之间存在大量孔隙。按镜下特征可分为面状裂隙、囊状或不规则孔隙、孔洞、孔道等类型(图4)。面状裂隙是发育在土壤团聚体内部、



①面状裂隙: Plane voids; ②不规则孔隙: Irregular voids; ③囊状孔隙: Chamber voids; ④孔洞: Vughs; ⑤孔道: Channels;
⑥锆石(Zrn): Zircon; ⑦囊状小孔隙: Small chamber voids

图4 L-HH剖面中的孔隙类型
Fig. 4 Voids types of L-HH profile under the polarized microscope

宽度小于10 μm的窄型空隙，两侧孔隙壁粗糙，呈基本平行状延伸，延伸距离较短，有向一端尖灭之趋势，与压实过程中土体受到挤压以及干湿变化导致的土体胀缩有关。囊状孔隙或不规则孔隙是发育在土壤团聚体内部，孔隙壁粗糙、孔隙横截面边界呈闭合状的孔隙。长条形、似囊状的为囊状孔隙，边界似不规则多边形的为不规则孔隙。孔洞是发育在团聚体内部，孔隙横切面边界呈较规则圆形或椭圆形的孔隙，多是植物根系穿插或虫体活动遗留的孔迹。孔道是不同团聚体之间或能够切穿团聚体的、宽度在几十微米到几毫米不等的、以两条平行孔隙壁为界线的空隙。孔道可向两端延伸，延伸距离较长，起到分隔或分割团聚体的作用。孔道两侧团聚体边缘轮廓的弯曲形状呈现可以吻合拼接的高匹配度特征，沿孔隙壁淀积有大量黏粒胶膜、铁质胶膜和锰胶膜。推测是长期淋溶作用及土体干湿胀缩条件下，面状裂隙横向扩展、纵向延伸、交互连通的结果。土壤优先流可将一些粗物质带入孔道，各类胶膜也会不断地淀积于孔道内壁，因而孔道并不完全随时间的推进而无限扩大，随着孔道内进入物的增多，水流作用减弱，孔道可以被充填。

从土壤孔隙类型在剖面上的分布来看，黄棕色土（第⑥、第⑤层）以面状裂隙为主，并可见囊状及不规则孔隙、孔洞、孔道等，孔隙类型丰富但面积较小，约占整个薄片面积的2%~15%。面状裂隙呈近垂向或近水平向线状延伸，囊状孔隙、不规则孔隙、孔洞等呈随机分布，孔洞内留有炭化植物残屑；仅在部分面状裂隙和孔道壁附近见到单薄的黏粒胶膜，裂隙壁粗糙呈微锯齿状。面状裂隙宽度多在6~8 μm之间，孔道直径多在10~30 μm之间。第⑥层上部45 cm处的L-HH-09样品以面状裂隙为主，稀疏、线状、互不连通，裂隙长度10~15 mm。第⑥层底部80 cm处的L-HH-16样品，孔隙类型多样，面状裂隙丰度增加，且有一定连通性。近垂向和近水平向线形面状裂隙交汇处发育有囊状和不规则状孔隙，还可见随机分布的囊状孔隙和孔洞。位于第⑤层120 cm处的L-HH-24样品，部分面状裂隙向孔道转化，孔道粗细不均，孔道壁附近有比较明显的铁质黏粒胶膜。网纹黄棕色土（第②、第③、第④层）以孔洞、囊状孔隙和孔道常见，多呈随机

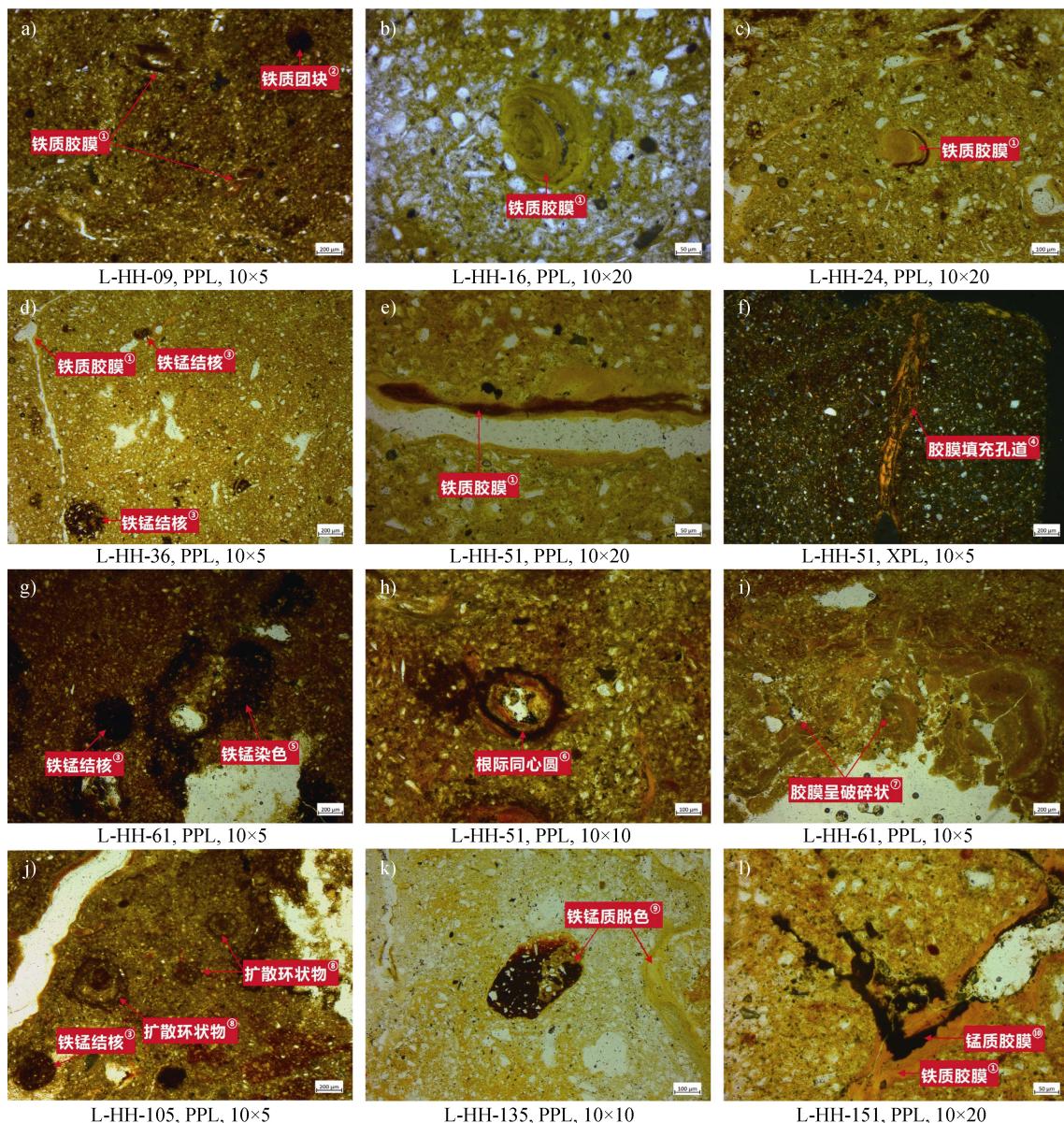
分布，孔道呈“L”、“S”等弯曲条型，面状裂隙少。各类孔隙面积占整个薄片面积的20%左右，孔道直径多在30~200 μm之间，孔道两侧的团聚体边界凹凸轮廓匹配度较高，孔隙壁淀积胶膜增厚，呈多层次叠置分布特征。位于第④层180 cm附近的L-HH-36样品囊状孔隙较孔道发育，孔道直径偏细；位于第③层263 cm处的L-HH-51样品孔道发育，直径增粗，孔道、孔洞内见炭化植物残屑，孔道壁光滑，铁质黏粒胶膜发育；位于第②层318 cm处的L-HH-61样品孔道发育，并见随机分布的囊状孔隙，孔道周边铁质黏粒胶膜富集，孔道内见锆石等矿物颗粒，指示孔道内较强的水动力。网纹红土（第①层）以孔道占绝对优势，面状裂隙不明显，孔洞、囊状孔隙零星分布。孔道表现为个体增大、直径加宽、连通性增强等特征，孔隙面积约占整个薄片面积的15%~20%，孔道直径多为200~300 μm，其延伸路径上多连结有孔洞，所以孔道时而变细时而加粗，两侧团聚体边缘轮廓匹配度变差。孔隙壁光滑，淀积胶膜增厚，多层次叠压，具微层理特征，淋溶-淀积过程多次交替，孔道甚至被碎屑矿物和淀积胶膜所填充。如581 cm处的L-HH-105、764 cm处的L-HH-135和862 cm处的L-HH-151样品的孔道内均见锆石、石英等矿物颗粒充填，铁质黏粒胶膜和锰胶膜均十分发育，暗示成土时期孔道内水分运移活跃，不仅能携带黏粒下行侧移，同时还可推动粗矿物颗粒移动。特别是L-HH-135样品孔洞周围的棕红色胶膜与大量黏土集合体所构成的基底式胶结结构是温暖湿润条件下强烈风化成壤的直接证据^[20]。因而，土壤孔隙的类型、组合、微结构等沿剖面的差异，一定程度上反映成壤条件和成土过程的差异，对理解红土中网纹形成也是一个重要的视角。

2.2.3 土壤形成物

土壤形成物是成壤过程中形成的次生物相的总称，通常包括胶膜、浓聚物、结核、次生矿物等。鉴于加积型红土是风积物上发育的埋藏古土壤，且达到中强风化水平，故而与现代土壤的有机层(O)-腐殖质层(A)-淋溶层(E)-淀积层(B)-风化层(C)构型有所不同，只表现为明显的淀积层B。因此，加积型红土中淀积物类型非常丰富，有淀积黏粒胶膜、铁质团块(粒)、铁锰结核及典型的假潜育化形成物。淀积黏粒胶膜是细粒组分随土壤溶液向下运移或侧渗，随后失水并

在团聚体内或孔隙壁沉积的膜状物^[21], 表面光滑明亮或具蜡质光泽。加积型红土中沉积黏粒胶膜发育充分, 且因 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的加入及氧化过程呈棕色、红棕色和黑色。铁质胶膜通常呈黄色、棕色和红棕色, 主要由针铁矿或赤铁矿等铁氧化物与黏粒组成, 呈环状和团粒状(图 5a、图 5b、图 5c)或片状(图 5e、图 5f、图 5l)分布于土壤基质及土壤裂隙中; 锰质胶膜则呈黑色、灰黑色, 由锰氧化物与黏粒组

成, 包膜状或片状附着于土壤团块外侧或土壤裂隙壁。胶膜间有叠置关系, 呈现微层理构造(图 5b、图 5e、图 5h), 土壤水动力较强时, 胶膜可呈碎片状(图 5i)。铁质团块(粒)是铁质在土体中迁移再聚积的形成物, 镜下多表现为红褐色至棕色、团粒状, 浓度由核心向边缘逐渐扩散减小, 直径十几微米至二百微米不等, 分散分布于土壤基质中, L-HH 剖面各层位样品中均有出现。铁锰结核是铁锰氧化



①铁质胶膜: Fe-coating; ②铁质团块: Fe-mass; ③铁锰结核: Ferromanganese nodules; ④胶膜填充孔道: The channel is filled with coating; ⑤铁锰染色: Fe-Mn impregnation; ⑥根际同心圆: Rhizospheric concentric iron-rings; ⑦胶膜呈破碎状: Coating is broken; ⑧扩散环状物: Diffuse concentric rings; ⑨铁锰质脱色: Decolorization; ⑩锰质胶膜: Mn-coating

图 5 L-HH 剖面中的土壤形成物
Fig. 5 Pedological features of L-HH profile under the polarized microscope

物聚集体，与周围土体的成分、结构、颜色有明显区别，呈圆、椭圆或不规则状，大小1mm以下至1cm以上不等，褐色至黑色，内部可呈同心圆状微层理互层结构。结核体镜下边界清晰，内见大小不同和含量不一的浅色矿物（图5d、图5g、图5j、图5k），L-HH剖面第④层铁锰结核分布相对密集，其形成类似于水稻土中结核的成因^[22]。此外，加积型红土样品中还可见到扩散环状物及根际同心圆等典型的假潜育化作用形成物（图5h、图5j）。扩散环状物是土壤基质中形成的铁锰质闭合环带，呈同心圆状，与铁锰质胶膜不同的是正交偏光下无消光特性。已有研究表明^[1]，当土壤水由湿润处向周围干燥处浸润时，铁锰质颗粒或浓聚物被活化进入土壤溶液，经一段距离的扩散浸润后，又因水分不足和溶液浓度增大，部分铁锰质氧化再度集聚，形成暗棕红或黑褐色环带，该过程反复交替，则形成扩散环状物。根际同心圆则是扩散环状物的特殊形式，因根孔反复渍水-干燥导致四周土体pH交替变化，在根际周围留有的闭合环带状形成物^[23]，且常与黏粒胶膜共存（图5h）。不难判定，加积型红土土壤形成物多与铁锰离子的氧化还原机制有关。

土壤形成物沿剖面的分布来看，黄棕色土层段（第⑤~⑥层）以扩散黏粒胶膜为主，基质中零散分布团粒状铁质黏粒胶膜和铁质团块（图5a、图5b、图5c），部分孔隙壁上见单薄铁质淀积黏粒胶膜。团粒状铁质黏粒胶膜在正交偏光下呈现强消光特征，具环带结构，直径150~300μm，呈黄色或棕色，有时包裹有炭化植物碎屑。铁质团块大小50~200μm，暗棕色，分散于基质中。片状铁质黏粒胶膜常附着于孔隙壁，黄色或黄棕色，第⑤层显然较第⑥层增多。网纹黄棕色土层段（第②~④层）土壤形成物类型丰富（图5d~图5i），基质内散布铁质团块、铁锰结核和根际同心圆，孔隙壁片状铁质胶膜发育，淀积厚度明显增加。如，第④层L-HH-36样品铁质胶膜薄，但铁锰结核较多，结核直径多10~500μm，大者达1mm以上（图5d）。第③层L-HH-51样品铁质胶膜发育，孔隙壁两侧多层铁质胶膜叠置，表现为红棕与黄色交替的互层，厚度40~200μm，且有向两侧基质浸润扩散迹象（图5e）。这足以印证孔隙中土壤溶液经历着多次运移淀积，且淀积环境存在细微差异。部分孔道还因土壤溶液反复运移淀积而被充实，在正交偏光下呈现不规则的消光特

征（图5f）。第②层L-HH-61基质中存在大面积铁锰质染色以及铁锰结核（图5g），并可见到零散分布的根际同心圆（图5h），直径约400μm，根际周围铁锰胶膜交互叠置，由内而外进行，根孔内见炭化植物碎屑，推测成壤中存在假潜育化过程。此外受强淋溶作用影响，胶膜产生破碎变形现象（图4i），这是红壤发育早期阶段的表现^[24]。网纹红土层段（第①层）土壤形成物多为淀积胶膜、铁锰结核与扩散环状物，细节上看不同深度微形态特征不同。5.81m处L-HH-105样品中存在大量铁质扩散环状物（图5j），环状物呈棕色，最外环直径250~600μm，从内核至外环有多个同心圆，是多次干湿交替的产物。样品中扩散型和淀积型铁质胶膜也十分发育，呈蜡质光泽。7.64m处L-HH-135样品中铁锰结核及铁质胶膜存在脱色现象（图5k），可能与网纹化有关。8.61m处L-HH-151样品，淋溶通道丰富，沿孔隙壁淀积大量红棕色铁质及黑色锰质胶膜，锰胶膜多叠置在铁胶膜之上，某些孔道被胶膜填充（图5l），基质中团粒状铁质胶膜也非常发育。可见，沿L-HH剖面土壤形成物类型、丰度、成熟度存在一定的垂向变化。总体上网纹红土土壤形成物类型更加丰富，成熟度高，成壤作用强。各类土壤形成物及其叠置关系也暗示红土中存在干湿交替、淋溶淀积和氧化还原过程。

3 讨 论

3.1 土壤微形态与加积型红土成土环境

成壤作用与环境变化密不可分。特定环境下的物理、化学、生物作用不断导致土壤性状发生变化，反之土壤微形态物相也记录了大量环境信息，可作为成壤特征及土壤发育阶段的重要判别依据^[25~26]。结合159个样品粒度、色度、磁化率等环境指标的垂向变化，L-HH剖面环境变化大致可以分为四个阶段（图6）。

阶段I，对应于网纹红土层下段。如图6所示，该阶段除磁化率数值为稳定低值外，其他环境指标均有明显的数值波动，自下而上黏粒含量减少、红度值降低。根据吕厚远等^[27]的研究，当温度超过15℃、年降水量超过1100mm时，磁化率值会随成壤强度的增强而降低。 $<4\text{ }\mu\text{m}$ 特别是 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的细粒组

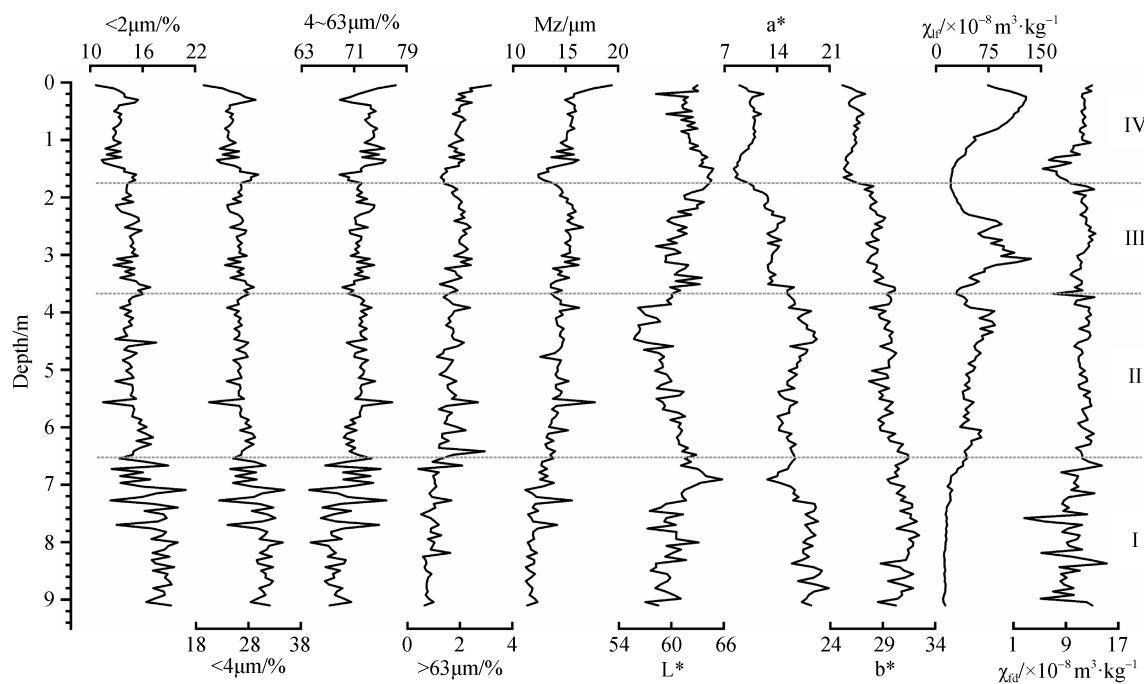


图 6 L-HH 剖面环境指标垂向变化

Fig. 6 The environmental indicator variations for the L-HH profile along depth

分通常被视为风化成壤作用的产物, 该阶段黏粒含量($<4 \mu\text{m}$)为全剖面最高(30.05%), 磁化率值($17.34 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)却为全剖面最低, 恰好显示成壤强度与磁化率的反相关关系。推测该时期年降水量超过1100 mm, 土壤水分条件优越。土壤微形态证据也表明, I阶段孔道孔洞发育, 连通性好, 与水有关的溶解、淋溶、物质迁移过程活跃, 土壤形成物类型丰富, 尤其是铁质淀积胶膜极为发育, 从而导致该阶段红度(a^*)、黄度(b^*)值较高(分别为17.51和30.93)、亮度(L^*)值较低(均值60.45)。然而, 已有研究表明, 铁质胶膜发育必须依赖于土壤水分的干湿交替^[28]。土壤孔道为优先流通道, 也是土壤水分的滞留地带, 孔道滞水时 Fe^{2+} 为主, 土体脱色, 而土壤失水时 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 并以铁质胶膜的形式淀积于孔道壁或周边基质, 表明网纹红土中存在周期性滞水的假潜育化环境。至于粒度、色度、频率磁化率等数据的波动也与微形态观察结果不谋而合, 很多孔道中充填的石英、锆石等粗粒物质会影响粒度参数的波动, 加之从孔道外壁向内物质颜色变浅, 浅色物质外围常有锰胶膜包裹, 样品间红基质、浅色物质、锰胶膜含量配比关系的差异会导致色度参数值不够稳定。

阶段II, 对应于网纹红土层上段。该段各环境

参数变化幅度较小, 环境较网纹红土层下段(阶段I)稳定。该阶段黏粒含量继续减少, 含量为26.54%, 红度 a^* (16.29)和黄度 b^* (29.44)值仍然较高, 微形态中铁质胶膜、铁质团块等淀积物和根际同心圆均十分发育。磁化率值与黏粒含量仍然表现为反相关关系, 但与阶段I不同的是, 磁化率值呈升高趋势(均值 $52.41 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), 黏粒含量则降低, 同时磁化率值的波动及变化趋势与红度值变化相吻合。推测该时段土壤水分有所减少, 干湿变化和氧化还原交替过程仍然显著。此时段的年降水量可能接近1100 mm。

阶段III, 对应于网纹黄棕色土层段(剖面第②、③、④层)。该段黏粒含量继续减少, 均值为25.89%, 以②、④两层略低(25.95%, 25.36%), 第③层略高(26.23%)。红度 a^* 、黄度 b^* 值波动下降(均值分别为11.96和27.45)呈两谷一峰变化, ②、④两层略低于第③层, 亮度值则波动升高(均值62.00)呈两峰一谷变化, ②、④两层高于第③层。这种波动磁化率值也有表现, 两谷一峰波动增加, 与黏粒含量和 a^* 、 b^* 值波动吻合。推测此阶段年降水量已低于1100 mm, 与土壤水分相关的溶解、淋溶、物质迁移能力有所减弱, 孔隙及连通性变差, 片状铁、锰质胶膜有所减少, 基质中常见团粒状铁锰质胶膜、

甚至出现数量较多的铁锰质结核。锰的淀积相对于铁质淀积需要更干的环境^[29], 这也进一步证明该阶段降水减少, 土壤水分条件变差。进而磁化率高值具备了成壤强度和夏季风增强的指示意义。

阶段IV, 对应黄棕色土层段(剖面第⑤、⑥层)。黏粒含量24.78%, 全剖面最低, 平均粒径(Mz)全剖面最粗, 磁化率值继续升高, 至地表附近达最高值, 均值为 $106.92 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。红度 a^* 、黄度 b^* 值全剖面最低, 均值仅为10.75和26.39。微形态结构来看, 孔隙减少特别是面状裂隙少, 未完全风化的矿物碎屑较多, 团粒状淀积胶膜和扩散型黏粒胶膜为主。各环境指标和土壤微形态特征一致显示该阶段成壤强度变弱, 古气候趋于干凉, 网纹化终止。

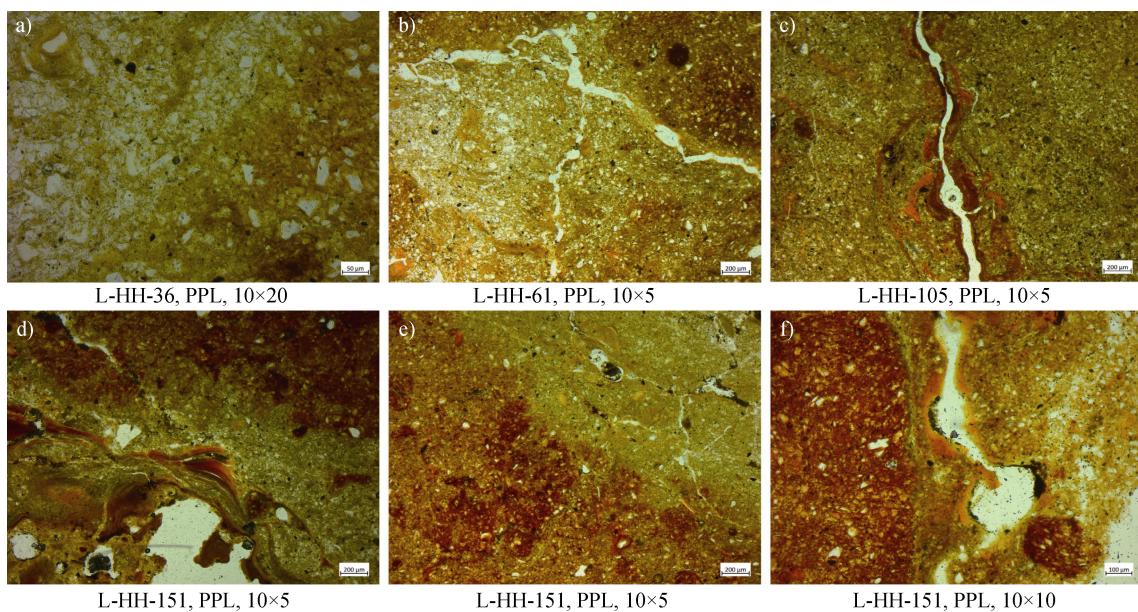
综上所述, 土壤微形态特征与粒度、色度、磁化率等环境指标间具有良好的对应关系, 蕴含丰富的土壤发育环境、成土因素和成土过程信息, 是解读红土形成环境、季风演化乃至网纹化机制的重要土壤学指标。

3.2 土壤微形态与网纹化

关于红土网纹化机制已有广泛讨论, 如岩性差异风化、地下水位变化、植物根系穿插等^[30-32], 但实质应该是铁的迁移与脱色机制^[33-35], 这无疑是化学过程, 然而土壤微形态证据显示, 这一化学过程

还需要有物理、生物等过程的配合。

加积型红土沉积母质均^[13], 因此本文暂不考虑岩性差异对网纹化过程的影响。如图7所示, 加积型红土中可以观察到两种铁质分异模式。一是铁质黏粒胶膜扩散-团聚模式, 向外扩散的区域铁质淋失, 淀积的区域铁质集聚(图7a、图7e)。反复扩散-集聚, 一些区域颜色变浅, 另一些区域红色加深, 成为非均匀分布的团状铁质, 与浅色铁质淋失区之间呈过渡边界。但随着土壤水分活跃程度的加剧, 铁质淀积与脱色区之间的色差会进一步加大(图7e)。二是“通道型”铁质淋溶-淀积模式(图7b、图7c、图7f)。铁质沿孔道淋溶沿裂隙壁淀积, 水分充足且活跃时, 周边基质铁质淋失; 相反水分不足时, 铁质直接淀积于孔道外壁, 或从孔道向外渗染, 淋溶-淀积过程反复进行, 孔道内物质颜色变浅, 孔道壁外基质的红色加深, 孔道壁则成为两者间比较明确的分界线, 可由多层叠压的胶膜组成。孔隙越宽, 铁质淋溶就越活跃, 孔隙壁内外物质的色差就越显著(图7f)。当然, 扩散-团聚模式下形成的铁质脱色区内, 还可因孔道穿插而叠置“通道型”铁质淀积(图7d)。所以, 土壤水分状况和土壤孔隙及其发育程度与网纹化程度有较好的对应关系。L-HH剖面网纹层6个样品的土壤微形态特征表明, 网纹越



注: a)、b)、e) 扩散-团聚型铁质分异; c)、d)、f) 通道型淋溶-淀积铁质分异。Note: a)、b)、e) Diffusion-agglomeration iron differentiation; c)、d)、f) Channel dominated eluvial-deposited iron differentiation.

图7 网纹红土铁质分异模式

Fig.7 Reticulated red earth iron differentiation pattern

典型的地段, 脱色区面积大、脱色显著、边界清晰, 土壤孔隙也越发育, 铁质分异以第二种模式为主; 网纹弱的地段, 脱色区面积小、脱色程度低、边界模糊, 面状裂隙及孔道亦较少, 铁质分异以第一种模式为主, 这也是弱网纹层网纹轮廓不清晰的主要原因。反过来讲, 孔隙能够更好地控制铁质分异, 也更有利于网纹化。因此, 面状裂隙的出现、加宽、连通过程应该是网纹化化学机制的物理学基础。Rosolen 等^[36]认为亚马孙盆地新世中期-更新世晚期沉积母质上发育的网纹红土, 也与土壤微结构及铁质运输模式有关。

空隙在土壤持水和“呼吸”方面起着重要作用。最初的土壤裂隙多由土壤水分蒸发造成^[37], 即土壤失水的收缩力超过土壤颗粒间拉伸应力, 就有可能出现干燥裂纹。之后, 干燥裂纹会在温度、湿度、生物活动、物质淋失、黏土矿物类型及含量变化等因素影响下扩张和连通^[38], 进而成为水分和淋溶物质运移的通道。Vepraskas^[39]认为, 植物根系对土壤裂隙扩张及铁质迁移起重要作用, 该过程始于植物腐根, 进而通过氧化还原作用导致土壤团粒表面质地和铁质发生改变。如图 8a 所示, 植物根系死亡后, 腐根周围的酸性还原环境使部分 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 。腐根渐渐被分解之后, 更多的水分充填根孔并开始向邻近基质侧渗, 邻近基质中更多的 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , 紧贴孔道的部位形成铁质淋失区而脱

色变浅, 随水扩散的 Fe^{2+} 在离孔道较远的部位因土壤溶液浓度增加或水分减少再被氧化为 Fe^{3+} , 形成铁质聚积区, 难以移动 Fe^{3+} 化合物则不同程度地富集为团粒状铁质胶膜、铁质凝团、铁结核或铁盘, 呈红色至深红色。相应地, 铁质淋失区因失去铁质胶结而质地变松, 部分黏粒会移至下层土壤孔隙中再沉淀, 灰黄至灰白色。若土壤水动力较强, 黏粒中可裹入粗粒碎屑并再有铁、锰离子加入形成铁锰质黏粒胶膜。渐渐地, 部分孔隙被加宽, 部分孔隙被充填。如图 8b 所示, 网纹红土中的浅色不规则斑纹即为脱色区, 脱色区中央留有中空的孔柱, 孔柱壁明显见有红棕色铁质淀积胶膜。已有研究表明, 孔道中普遍存在的棕红色淀积胶膜通常被认为是常绿阔叶林植被下土壤中的常见次生产物^[40]。网纹红土孔道发育, 且对应脱色区的孔道形态与森林植物根系结构存在相似性, 从而形成网纹化过程的植物根系说^[32]。由此看来, 植物根系推进了网纹化化学机制。

网纹化化学机制, 其实质就是铁质分异与脱色, 主要表现为铁量、铁价态、铁游离度与活化度、铁晶胶率等方面的分异, 涉及氧化还原、矿物转化、假潜育化等化学及成壤过程, 大量文献^[33, 41-42]均已给出了详尽讨论。朱丽东等^[43]、李凤全等^[44]还基于物质平衡原理讨论了网纹红土铁质迁移模型及脱色区铁的淋失量。可见铁质淋失需要充足的水分, 多

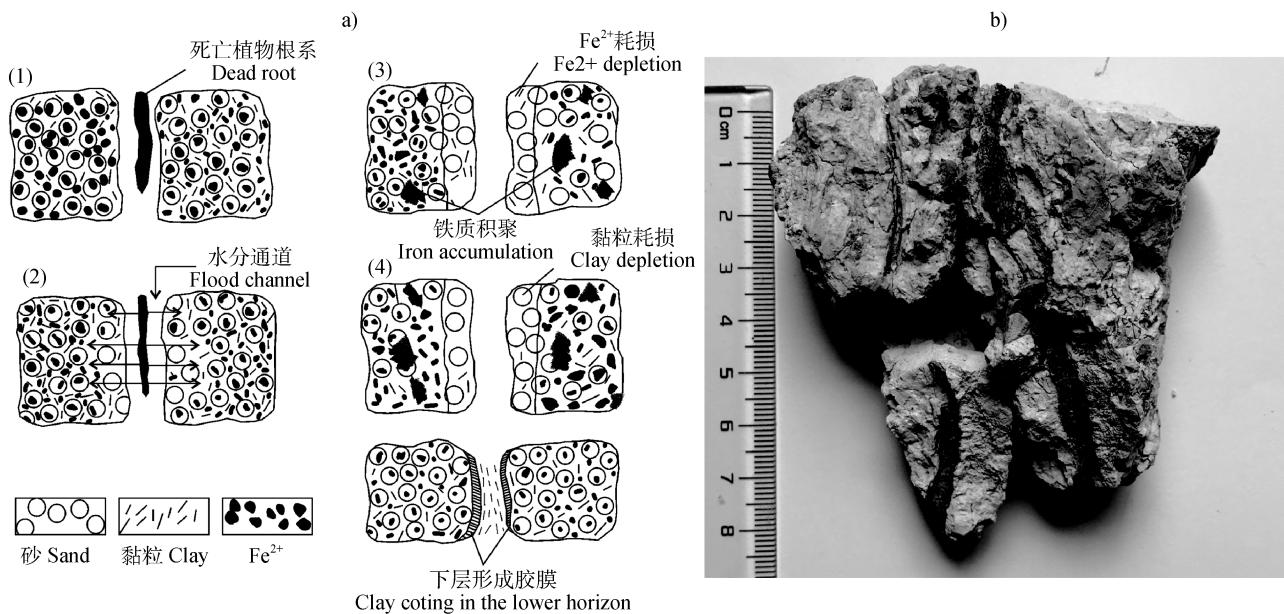


图 8 a) 铁质迁移与质地变化模型^[39]; b) 网纹红土脱色区及中空孔柱

Fig. 8 a) Model of iron migration and texture change^[39]; b) Decolorization area and hollow root hole

孔隙也是必然的。有学者认为网纹发育对应于夏季风异常强盛时期,极端湿润的气候条件及良好的排水条件缺一不可^[11]。然而,微形态证据表明,网纹层内铁、锰质胶膜共存,锰胶膜或叠置于铁质胶膜之上(图51)或与铁胶膜交互淀积(图5h),加之Mn的淋溶-淀积过程与Fe类似,只是前者所需的水分条件相对更差一些,这足以判定网纹层内存在周期性干湿变化,这也是导致土体伸缩、裂隙发育、局部周期性滞水等过程的基础。由此可以推断,网纹化现象应该是物理过程(裂隙及扩张)、生物过程(根系腐烂)、化学过程(铁质分异)综合作用的产物。

4 结 论

加积型红土质地均一,土壤基质以黏土、胶体为主,并具一定铁质侵染,原生矿物碎屑以石英、斜长石和白云母为主,次生矿物多为伊利石和蛭石,呈中强程度化学风化,沿L-HH剖面自下而上,胶体含量逐渐降低,黏土胶体与碎屑配比逐渐升高,成壤强度逐渐减弱。土壤孔隙及形成物类型的剖面分布差异较好地记录了红土形成时期土壤的水分及其干湿变化。土壤孔隙及其发育程度与网纹化程度有较好的对应关系。裂隙产生、加宽、连通是网纹化的物理学基础。L-HH剖面土壤微形态特征与粒度、色度、磁化率等环境指标间有良好对应关系,总体记录了从湿热至干凉的气候变化过程,是解读红土形成环境、季风演化信号乃至网纹化机制的主要土壤学指标。

参考文献 (References)

- [1] He Y R, Zhang D. Theory and practice of soil micromorphology research[M]. Beijing : Geological Publishing House, 2015. [何毓蓉, 张丹. 土壤微形态研究理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2015.]
- [2] Pan M H, Song C H, Li J J, et al. Micromorphological characteristics of miocene palaeosol and their paleoenvironment significances in Tianshui, Gansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (4): 578—585. [潘美慧, 宋春晖, 李吉均, 等. 甘肃天水地区中新世古土壤的微形态特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2009, 46 (4): 578—585.]
- [3] Guo Z T, Liu D S, Fedoroff N. Micromorphology of the loess-paleosol sequence of the last 130ka in China and paleoclimatic events [J]. Science in China (Series D), 1996, 26 (5): 392—398. [郭正堂, 刘东生, N.Fedoroff. 130ka来黄土-古土壤序列的典型微形态特征与古气候事件[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1996, 26 (5): 392—398.]
- [4] Taheri M, Khormali F, Wang X, et al. Micromorphology of the lower Pleistocene loess in the Iranian Loess Plateau and its paleoclimatic implications[J]. Quaternary International, 2017, 429: 31—40.
- [5] Srivastava P, Singh A K, Parkash B, et al. Paleoceanographic implications of micromorphic features of Quaternary paleosols of NW Himalayas and polygenetic soils of the Gangetic Plains-A comparative study[J]. Catena, 2007, 70 (2): 169—184.
- [6] Srivastava P. Paleoceanographic implications of pedogenic carbonates in Holocene soils of the Gangetic Plains, India[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 172 (3/4): 207—222.
- [7] Liu L W, Mao A J, Hu X F. Magnetic susceptibility—an indicator of depositional and soil-forming environment [J]. Soils, 2001, 33 (2): 98—101. [刘良梧, 茅昂江, 胡雪峰. 磁化率-沉积、成土作用环境的指示剂[J]. 土壤, 2001, 33 (2): 98—101.]
- [8] Hu X F, Gong Z T, Xia Y F, et al. Comparative study of yellow-brown earth and quaternary red clay in Xuanzhou, Anhui Province and its palaeo-climate significance[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36 (3): 301—307. [胡雪峰, 龚子同, 夏应菲, 等. 安徽宣州黄棕色土和第四纪红土的比较研究及其古气候意义[J]. 土壤学报, 1999, 36 (3): 301—307.]
- [9] Gong Z T, Chen H Z, Liu L W. Paleosols and quaternary environment in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26 (4): 379—387. [龚子同, 陈鸿昭, 刘良梧. 中国古土壤与第四纪环境[J]. 土壤学报, 1989, 26 (4): 379—387.]
- [10] Huang Z G, Zhang W Q. Coupling relationship between the red earth evolution, climate change and tectonic movement in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (2): 200—208. [黄镇国, 张伟强. 中国红土期气候期构造期的耦合[J]. 地理学报, 2000, 55 (2): 200—208.]
- [11] Yin Q Z, Guo Z T, Fang X M. Micromorphology of latosols in Hainan and differences between vermiculated red soils and latosols in environmental significance in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (3): 353—361. [尹秋珍, 郭正堂, 方小敏. 海南砖红壤的微形态特征以及南方网纹红土与砖红壤环境意义的差异[J]. 土壤学报, 2006, 43 (3): 353—361.]
- [12] Yin Q Z, Guo Z T. Mid-Pleistocene vermiculated red soils in Southern China as an indication of unusually strengthened East Asian monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (2): 186—193. [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.]
- [13] Zhu L D. Aggradation red earth sediments in mid-subtropics of China and their recorded environmental changes during quaternary[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. [朱丽东. 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, 2007.]
- [14] Huang Y, Zhu L D, Zhang X, et al. Geochemical characteristics and their provenance implications of the silt fraction from JL red earth section in Lushan region, Jiujiang, South China[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39 (5): 1092—1102. [黄颖, 朱丽东, 张晓, 等. 庐山北麓 JL 红土剖面砂粒级元素地球化学特征及其物源意义[J]. 第四纪研究, 2019, 39 (5): 1092—1102.]
- [15] Xiong S F, Liu D S, Ding Z L. The weathering sequence of the red earth over Southern China[J]. Mountain Research, 2000, 18 (1): 7—12. [熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 南方红土的剖面风化特征[J]. 山地学报, 2000, 18 (1): 7—12.]
- [16] Yang S, Zhang G L, et al. Deep nitrate accumulation in a highly weathered subtropical critical zone depends on the regolith structure and planting year[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 50 (21): 13739—13747.
- [17] Huang R C. Development and application of soil micromorphology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. [黄瑞采. 土壤微形态学发展及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.]
- [18] Zhu X M. Red clay and red residuum in South China[J]. Quaternary Sciences, 1993, 13 (1): 75—84. [朱显漠. 中国南方的红土与红色风化壳[J]. 第四纪研究, 1993, 13 (1): 75—84.]
- [19] He J J. Study on the clay minerals and weathering characteristics of aggradated red earth[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2019. [何俊杰. 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, 2019.]
- [20] Pang J L, Huang C C, Chen B Q. Genetic and micromorphological studies of the Holocene soil complex on the southern Loess Plateau[J]. Geographical Research, 2002, 21 (4): 487—494. [庞奖励, 黄春长, 陈宝群. 黄土高原南部全新世土壤微结构形成机理探讨[J]. 地理研究, 2002, 21 (4): 487—494.]
- [21] An Z S, Wei L Y. The character and formative cause of the deposited iron clay[J]. Chinese Science Bulletin, 1979, 24 (8): 356—359. [安芷生, 魏兰英. 淀积铁质黏粒胶膜及其成因意义[J]. 科学通报, 1979, 24 (8): 356—359.]
- [22] Ye W, Zheng W X, Li F Q, et al. The composition and depositing condition of Ferro-manganese nodules developed in Quaternary red earth and paddy soil in Mid-subtropical zone, China[J]. Mountain Research, 2008, 26 (3): 293—299. [叶玮, 郑万乡, 李凤全, 等. 中亚热带红土与水稻土铁锰结核理化特性与形成环境对比[J]. 山地学报, 2008, 26 (3): 293—299.]
- [23] Zhang G L, Gong Z T. Micro-structure and formation mechanism of typical redoxi-orphic features of hydric anthrosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (1): 10—16. [张甘霖, 龚子同. 水耕人为土某些氧化还原形态特征的微结构和形成机理[J]. 土壤学报, 2001, 38 (1): 10—16.]
- [24] Cai C F. The micromorphological features of soils derived from Mid-late Pleistocene Deposits (Q₂₋₃) in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural, 1989, 8 (S1): 25—28. [蔡崇法. 湖北省几个发育于中晚更新世沉积物母质上的土壤微形态特征[J]. 华中农业大学学报, 1989, 8 (S1): 25—28.]
- [25] Hopkins D G, Franzen D W. Argillic horizons in stratified drift[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67 (6): 1790—1796.
- [26] Jongmans A G, Groenesteijn K, Buurman P, et al. Soil surface coatings at Costa rican recently active volcanoes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60 (6): 1871—1880.
- [27] Lü H Y, Han J M, Wu N Q, et al. Analysis of the susceptibility and its paleoclimate significance of modern soil in China[J]. Chinese Science: Series (B), 1994, 24 (12): 1290—1297. [吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学 (B辑), 1994, 24 (12): 1290—1297.]
- [28] Huang L, Liu F, Tan W F, et al. The progress of soil cutan study[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34 (2): 143—147. [黄丽, 刘凡, 谭文峰, 等. 土壤胶膜的研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34 (2): 143—147.]
- [29] Huang L, Liu F, Tan W F, et al. Geochemical characteristics of some elements in iron manganese cutan and matrix of some soils in the central China[J]. Geochimica, 2002, 31 (5): 487—494. [黄丽, 刘凡, 谭文峰, 等. 华中地区几种土壤铁锰胶膜及其基质中某些元素的地球化学特点[J]. 地球化学, 2002, 31 (5): 487—494.]
- [30] Gu Y S, Huang X Y, Zhang W G, et al. Red palaeosols development in response to the enhanced east Asia summer monsoon since the mid-Pleistocene in South China: Evidence derived from magnetic properties and molecular fossil records[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24 (3): 382—396.
- [31] Wang C L. On the origin of Quaternary worm-like net-veinedred (laterite) soil in Hunan Province and its significance in neotectonic studies[J]. Natural Sciences Journal of Hunan Normal University, 1986, 9 (1): 100—106. [王春林. 湖南第四系蠕虫状网纹红土的成因及其对新构造运动研究的意义[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1986, 9 (1): 100—106.]

- [32] Xiong S F, Ding Z L, Liu D S. Southern vermiculated red earth: Soil evidence for roots of ancient forest plants[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (12): 1317—1321. [熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 南方红土网纹: 古森林植物根系的土壤学证据[J]. 科学通报, 2000, 45 (12): 1317—1321.]
- [33] Zhang X, Zhu L D, Huang Y, et al. The reticulated mechanism and its climatic implication of aggradational red earth[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40 (1): 214—228. [张晓, 朱丽东, 黄颖, 等. 加积型网纹红土网纹化机制及形成环境[J]. 第四纪研究, 2020, 40 (1): 214—228.]
- [34] Lu S G. Characterization of magnetism and iron oxide minerals of quaternary red earth and its paleoenvironmental implications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (2): 182—191. [卢升高. 第四纪红土的磁性与氧化铁矿物学特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2000, 37 (2): 182—191.]
- [35] Li F Q, Ye W, Zhu L D, et al. The types and formation of quaternary plinthitic red earth[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28 (2): 346—355. [李凤全, 叶玮, 朱丽东, 等. 第四纪网纹红土的类型与网纹化作用[J]. 沉积学报, 2010, 28 (2): 346—355.]
- [36] Rosolen V, Lamotte M, Boulet R, et al. Genesis of a mottled horizon by Fe-depletion within a laterite cover in the Amazon Basin[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2002, 334 (3): 187—195.
- [37] Wang L L, Tang C S, Shi B, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks[J]. Engineering Geology, 2018, 238: 27—35.
- [38] Zhang Z B, Peng X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 477—488. [张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 477—488.]
- [39] Vepraskas M J. Redoximorphic features for identifying aquic conditions[J]. North Carolina Agricultural Research Service. Technical Bulletin, 1994, 64: 301.
- [40] Fedoroff N. Clay illuviation in Red Mediterranean soils[J]. Catena, 1997, 28 (3/4): 189.
- [41] Yuan S. Iron features and formation environment of vermicular red earth[D]. Jinhua : Zhejiang Normal University, 2010. [袁双. 网纹红土铁形态特征与网纹红土形成环境[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.]
- [42] Hong Y J. Research on the formation mechanism of reticulated red clay and growth of reticulated mottles[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2015. [洪祎君. 中国南方网纹红土的形成机制及网纹成熟度研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2015.]
- [43] Zhu L D, Zhou S Z, Li F Q, et al. The elemental transport features of red earth from TX-section and its paleo-climatic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27 (1): 117—123. [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.]
- [44] Li F Q, Ye W, Wang T Y, et al. The model for iron migration between white reticulated mottles and red matrix[J]. Quaternary Sciences, 2018, 38 (2): 306—313. [李凤全, 叶玮, 王天阳, 等. 网纹红土红色基质与白色条纹铁迁移模型[J]. 第四纪研究, 2018, 38 (2): 306—313.]

(责任编辑: 檀满枝)