

DOI: 10.11766/trxb201711200459

淳化黄土—古土壤序列黏土矿物分布特征及古环境意义*

张青青^{1, 3} 黄菁华^{1, 2} 姚 军⁴ 胡斐南^{1, 2} 霍 娜⁴ 尚应妮⁴ 常闻谦⁴
赵世伟^{1, 2†}

(1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要 黄土-古土壤序列是记录第四纪气候环境变化的良好信息载体之一。以黄土高原南缘陕西省淳化黄土-古土壤序列为研究对象, 通过X射线衍射法对黄土-古土壤剖面黏土矿物进行定性与半定量分析, 调查不同土层黏土矿物相对含量及伊利石/绿泥石比值(I/C值)的变化规律, 并结合伊利石结晶度的变化特征, 探讨不同土层黏土矿物特征所对应的气候变化规律, 揭示黄土高原南部地区在更新世时期的气候环境演变规律。结果表明: (1) 淳化剖面黏土矿物的相对含量、I/C值以及伊利石结晶度IC值在反演古气候方面具有较好的指示性。(2) 淳化剖面不同土层的黏土矿物类型基本相同, 但其相对含量存在差异。在WL-3~S5阶段, 即早更新世至中更新世中期, 黏土矿物的组合类型为伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石-蛭石, 其中早更新世至中更新世早期(WL-3~L11阶段), 伊利石相对含量相对偏低, 气候以温凉为主, 而中更新世中期(S10~S5阶段), 伊利石相对含量上升, 但蒙脱石、绿泥石含量均降低, 气候相对温湿; 在中更新世晚期(L5~S1阶段), 黏土矿物的组合类型改变为伊利石-绿泥石-蛭石-高岭石-蒙脱石, 以伊利石和绿泥石为主, 气候较为干冷。黏土矿物类型及含量表明淳化地区从早更新世早期到中更新世晚期气候环境总体干冷化, 并经历了温凉-温湿-干冷的变化过程。(3) I/C值以及伊利石结晶度IC值从剖面底部到顶部均经历了由小到大再到小的过程, 它们与黏土矿物的含量所反映的气候变化规律一致。本研究有助于探索黄土高原南部地区在更新世时期的气候环境变化, 为全面了解更新世黄土高原不同地区第四纪气候环境演变提供依据。

关键词 淳化黄土-古土壤序列; 黏土矿物; 伊利石结晶度; 古气候

中图分类号 S153 **文献标识码** A

黄土高原完整的黄土-古土壤序列是记录第四纪生物气候环境变化的良好信息载体之一, 常用来探讨黄土高原第四纪季风气候与成壤环境的变化

规律, 揭示该地区古气候环境的演化模式^[1-2]。目前, 科学工作者已通过分析黄土-古土壤地层中的粒度、磁化率、分子化石、颜色、氮稳定同位素等

* 国家自然科学基金项目(31500449)、中国科学院西部之光项目(XAB2015B05)和中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1515)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31500449), West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No. XAB2015B05) and Open Fund of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences (No. A314021402-1515)

† 通讯作者Corresponding author, E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 张青青(1992—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学与环境研究。E-mail: qqzhang19921119@163.com

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-12-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-04-11

的分布特征,对黄土-古土壤序列中蕴含的古气候环境信息进行了一系列研究^[3-7]。而近年来,有关黏土矿物在沉积物中的分布特征及其对古环境气候的指示意义也得到了日益广泛的关注。黏土矿物作为地表风化作用中的产物,广泛存在于第四纪沉积物中,且其形成和转化与气候条件等因素密切相关^[8]。气候(主要是温度和降雨量)对黏土矿物的类型与含量起决定性作用。在不同气候条件下,由于风化作用的类型和强度不同,从而沉积物的发育程度不同,进而导致形成的黏土矿物类型及结构特征也有所差异^[9]。与其他古气候替代指标,例如孢粉等相比,黏土矿物不仅可以指示较长时间尺度气候环境的演变,也可作为短时间尺度(几十年)的气候变化指标^[10],并因其可以剔除后期沉积、成壤的影响,以及其亚结构对环境变化非常敏感等优点,已被广泛地应用于古气候方面的研究^[11]。

已有研究发现我国不同气候带黄土中的黏土矿物组合具有明显的地带性特征^[12]。黄土中的黏土矿物组合特征及其含量不仅可反映物源的古环境信息,也可指示黄土堆积期后的生物气候环境。殷科等^[13]通过研究临夏地区黄土-古土壤沉积物的黏土矿物相对含量变化特征,推测出末次间冰期以来临夏地区可能经历相对暖湿-冷干-相对暖湿-冷干的气候转变。孙仲秀^[14]对东北风成黄土-古土壤黏土矿物的变化特征进行分析,研究表明:夏季风强烈时期古土壤层的伊利石的含量、I/C值较高,冬季风强烈时期黄土层的伊利石的含量、I/C值较低,且黏土矿物所反映的气候变化特征与古气候指标深海氧同位素曲线反映的冰期-间冰期的交替特征相一致。因此研究黄土沉积物中黏土矿物的组成、含量及晶型结构特征,对于推测黄土形成时期不同地区的气候环境具有重要意义。但目前有关黄土-古土壤中黏土矿物与第四纪气候环境的研究区仍以黄土高原的中部以及北部为主,对水热条件相对较好的黄土高原南缘区域研究较少。已有少数关于黄土高原南部地区黄土沉积物的研究,包括地磁学、古生物学等方面特征的研究,也多集中于探索全新世时期古气候的演变规律^[15-16],而较少有关于更新世时期古气候环境的报道。

因此,本文以黄土高原南缘的陕西淳化黄土-古土壤剖面为研究对象,通过分析剖面上不同黄土层与古土壤层中黏土矿物的含量与组合类型、伊

利石与绿泥石的比值(I/C值)以及伊利石结晶度(IC值)的变化,探讨不同土层黏土矿物特征所对应的气候变化规律,揭示早更新世至中更新世淳化黄土-古土壤序列形成与该地区古气候环境演变的对应关系,为全面认识更新世黄土高原不同地区的气候环境演变提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与样品采集

供试土壤采自淳化黄土-古土壤剖面,该剖面位于陕西咸阳北部的淳化县秦庄沟(34° 48' 07" N, 108° 41' 28" E),属于黄土高原南部地区(图1)。剖面总厚度约82 m,自下而上包括:早更新世午城黄土、中更新世离石黄土、晚更新世马兰黄土以及全新世黄土(即WL-3~S0),属于发育连续且完整的黄土-古土壤地层序列。该区主要受东亚季风影响,属于暖温带半湿润气候,年平均气温10.4℃,年均降水量为610 mm,降雨多集中在7—9月份且多以暴雨形式出现。

本研究选取淳化剖面形成于早更新世早期至中更新世的黄土与古土壤层的土壤样品(WL-3~S1)进行分析。其中复合古土壤层S5依据土层特征划分为上、中、下三层采样,分别标记为S5-1、S5-2、S5-3,除S9与L10每层采集6个样品外,其余土层均按厚度每层均匀采集3个样品作为重复,共采集土样114个。将采集到的土壤样品自然风干,去除根系和石砾过2 mm孔筛,磨细待用。

本研究剖面所取样各层的特征自上而下描述如下:

(1) 离石黄土上部:

S1: 10YR 5/6,棱柱状结构,黏粒胶膜和次生碳酸盐随裂隙和生物孔隙发育,厚0.91 m。

L2: 7.5YR 7/4,疏松,多孔,碳酸盐呈白色小点分布,厚6.50 m。

S2: 7.5YR 6/4,黏化层团粒结构明显,碳酸盐呈白色斑点,底部钙结核稀疏分布,厚2.00 m。

L3: 10YR 6.5/4,疏松,多孔,有少量碳酸钙小结核,厚3.92 m。

S3: 7.5YR 6/6,底部钙结核稀疏分布,厚1.90 m。

L4: 10YR 7/4,多虫孔,碳酸钙结核分布于

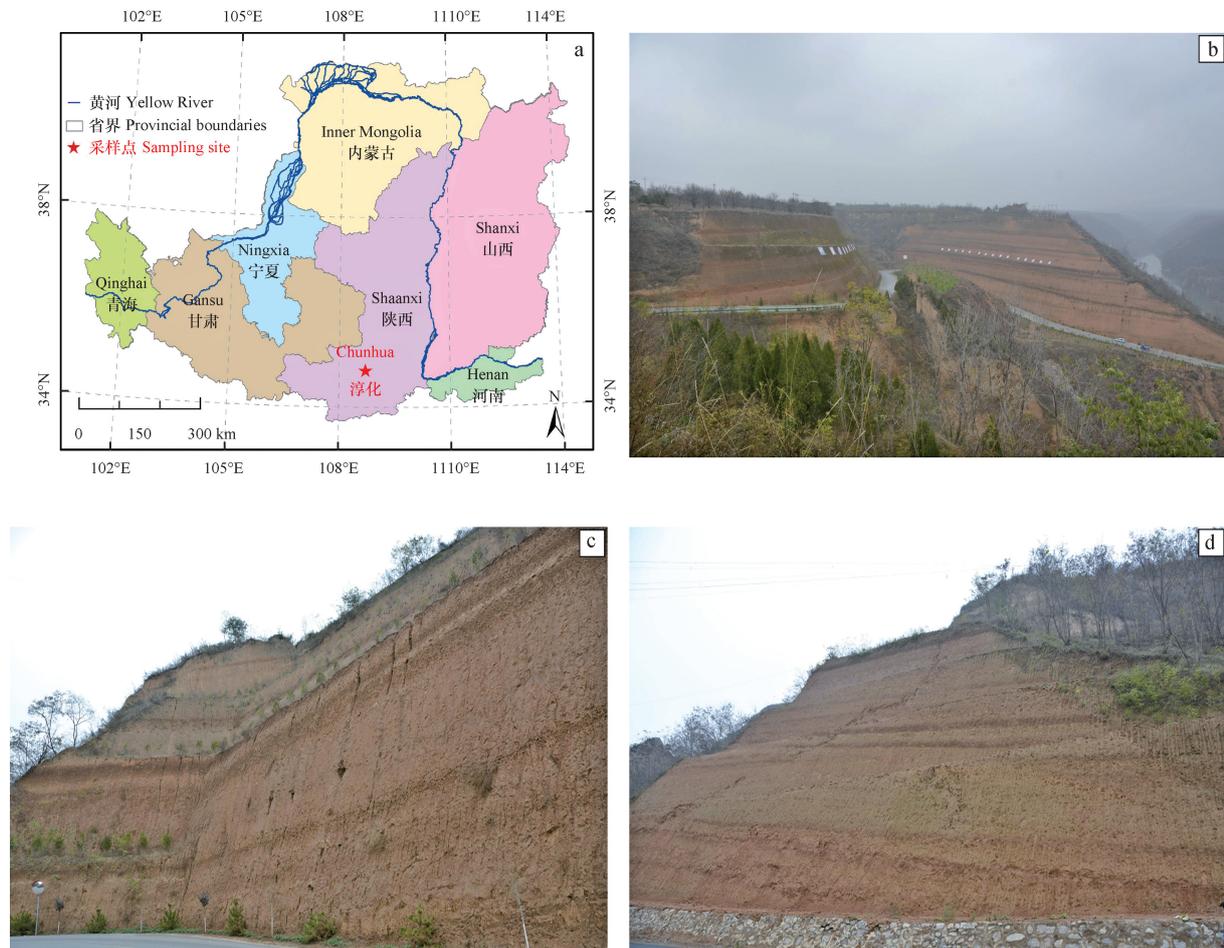


图1 淳化黄土-古土壤剖面地理位置及照片

Fig. 1 Location and photographs of the Chunhua loess-paleosol profile

顶部，底部有少量的蜗牛化石，厚3.30 m。

S4: 10YR 5.5/6, 可见蚯蚓孔道和昆虫形成的丸粒，零星分布有菌丝状和管状碳酸盐，厚2.30 m。

L5: 7.5YR 7/4, 顶部有浅白色渗透状的钙结核，底部含疏松的碳酸盐渗透物，厚4.20 m。

离石黄土下部:

S5-1: S5复合古土壤层第一层，10YR 5.5/6, 红黑色铁锰胶膜沿节理、裂隙分布，厚2.33 m。

S5-2: S5复合古土壤层第二层，10YR 6/6, 有铁锰物质分布，厚2.08 m。

S5-3: S5复合古土壤层第三层，7.5YR 6/6, 未见白色碳酸钙分布，厚1.97 m。

L6: 7.5YR 7/4, 有黑色铁锰质斑点分布，厚4.50 m。

S6: 7.5YR 6/6, 黏粒胶膜较少，底部有少量钙质结核，厚1.05 m。

L7: 7.5YR 7/3, 致密结实，碳酸盐呈斑状或

沿孔分布，厚1.93 m。

S7: 7.5YR 6/4, 白色钙膜呈网脉和薄膜状分布，未见黏粒胶膜，厚1.08 m。

L8: 7.5YR 7/4, 白色碳酸盐呈细网状分布，厚1.94 m。

S8: 7.5YR 6/6, 白色碳酸盐沿裂隙、孔洞分布，厚1.50 m。

L9: 上砂质黄土层，10YR 7/3, 具有少量大孔和大量黑褐色小斑点，底部有红色黏质丸粒，少量钙质小结核零星分布，厚5.75 m。

S9: 7.5YR 6/6, 有大孔、根孔和虫孔分布，厚1.55 m。

L10: 7.5YR 6.5/4, 有少量斑状白色碳酸盐、菌丝及零星小结核，厚1.15 m。

S10: 7.5YR 6/6, 根孔、虫孔发育，碳酸盐沿根孔或呈白点状分布，厚1.55 m。

L11: 7.5YR 7/4, 白色碳酸盐沿根孔分布，含

少量黑褐色锰质斑点, 厚4.00 m。

S11: 7.5YR 6/4, 少量碳酸盐沿根孔分布, 厚0.70 m。

L12: 10YR 7/4, 有碳酸盐菌丝分布, 厚1.25 m。

S12: 7.5YR 7/4, 碳酸盐以假菌丝状分布, 厚0.80 m。

L13: 7.5YR 7/4, 底部近古土壤处有红色黏土质掺杂, 厚1.10 m。

S13: 7.5YR 6/6, 有花瓣结构, 厚0.70 m。

L14: 7.5YR 7/4, 有红色黏土质混杂现象, 厚1.50 m。

S14: 7.5YR 6/6, 碳酸盐呈菌丝状分布, 厚0.80 m。

L15: 下砂质黄土层, 7.5YR 7/4, 具有大量黑色小点, 碳酸盐呈斑点和菌丝状分布, 含零星小结核, 厚7.60 m。

(2) 午城黄土:

WS-1: 7.5YR 6/6, 厚0.60 m。WL-1: 7.5YR 7/4, 厚1.00 m。WS-2: 7.5YR 7/4, 厚0.70 m。WL-2: 7.5YR 7/4, 厚1.90 m。WS-3: 7.5YR 6/6, 厚0.70 m。WL-3: 7.5YR 7/3, 厚1.40 m。

1.2 实验与测试方法

取10 g过2 mm孔筛的土壤样品, 分别用 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的稀盐酸和10%的双氧水去除碳酸盐和有机质, 用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠调节土壤悬液pH为7.3, 经过超声波分散, 根据Stokes自由沉降法提取小于 $2 \mu\text{m}$ 黏粒。将黏粒分别制成镁饱和甘油定向片(Mg-glycerol)、钾饱和定向片(K-25°C), 以及钾饱和定向片加热300°C和500°C(2h)(K-300°C、K-500°C)共四种处理进行分析。黏土矿物的分析测试均在中国科学院南京土壤研究所进行, 应用日本理学Ultima IV射线衍射仪进行测试分析, 仪器参数设置为X光管: Cu靶, 管压40 kV, 管流40 mA, 滤波: 石墨单色器, 扫描步长 0.02° , 扫描速度 $2^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ 。

分析土壤样品的四种处理的X射线衍射图谱特征峰, 根据所得的衍射数据(晶面间距d值和相对强度)与矿物的标准数据(国际衍射数据中心ICDD, 粉末衍射文件PDF)进行对比鉴定矿物种类, 并通过分析Mg-glycerol处理样品中矿物的最强衍射峰与标准矿物最强衍射峰比值求得各矿物的相对百分含量。

伊利石结晶度用Kübler指数来表征, 即用Mg-glycerol图谱1.0 nm衍射峰处的半高宽表征^[17](IC, 单位为 $^\circ\Delta 2\theta$)。根据Diekmann等^[18]分类标准, $\text{IC} < 0.4^\circ\Delta 2\theta$, 表示伊利石结晶度非常好, $0.4^\circ\Delta 2\theta < \text{IC} < 0.6^\circ\Delta 2\theta$, 表示伊利石结晶度好, $0.6^\circ\Delta 2\theta < \text{IC} < 0.8^\circ\Delta 2\theta$, 表示伊利石结晶度中等, $\text{IC} > 0.8^\circ\Delta 2\theta$, 表示伊利石结晶度差。

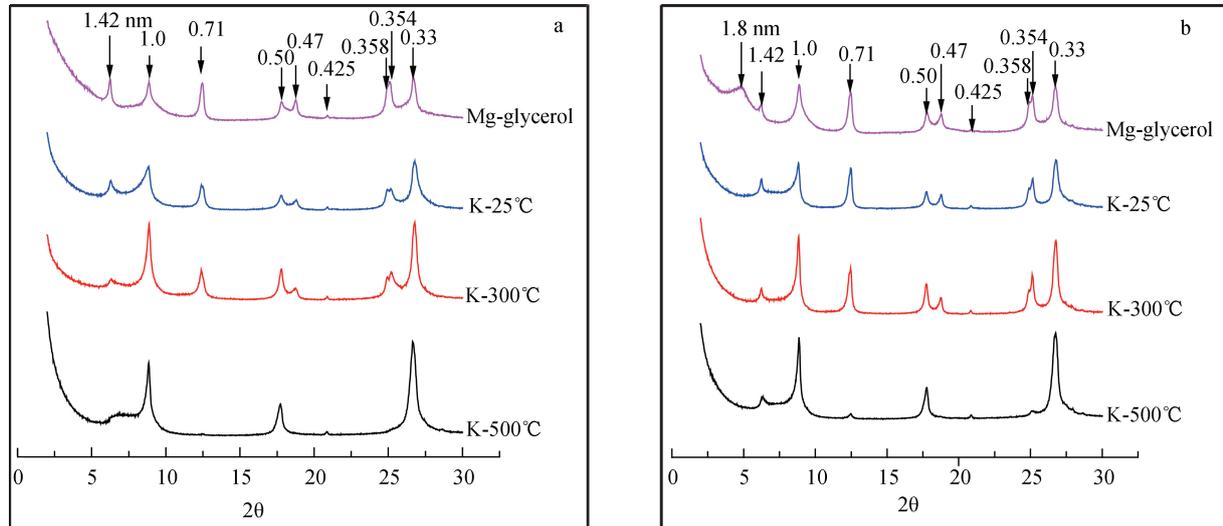
2 结果

2.1 黏土矿物定性特征

本研究中, 依据土壤样品X衍射图谱衍射峰的位置变化来对黏土矿物进行定性分析。结果表明, 淳化黄土-古土壤剖面不同土层间的黏土矿物种类较为相似, 除S3和WL-1土层中不存在蒙脱石或含有极少量检测不出来的蒙脱石, 其余黄土与古土壤层均含有伊利石、蒙脱石、高岭石、绿泥石、蛭石。本文以古土壤S3和黄土L4为例描述黏土矿物的定性分析结果(图2)。在这两个土层的四种图谱中均存在1.0 nm、0.5 nm、0.33 nm的衍射峰, 且位置未发生变动, 表明黏土矿物中伊利石的存在。在图2b中, Mg-glycerol图谱1.8 nm处有弱的宽峰及较高的背景基台值, K-25°C饱和处理后的1.8 nm衍射峰收缩至1.0 nm, 这说明黄土层L4中含有少量的弱晶型蒙脱石和(或)伊/蒙混层矿物^[19]。而在图2a中, Mg-glycerol图谱中1.8 nm衍射峰不存在, 表明S3不含或含有极少量检测不出来的蒙脱石。相对于Mg-glycerol图谱, K-25°C图谱中1.4 nm峰的峰强减弱, 并向低d值偏移, 使得1.0 nm峰峰强相对增强, K-300°C图谱中1.0 nm处出现了一个强峰, 这说明该土层同时含有蛭石类矿物和绿泥石, 在K-500°C图谱中仍有1.4 nm峰的存在表明黏土矿物中含有绿泥石。Mg-glycerol图谱中0.71 nm的峰在K-500°C处理的图谱中消失, 这意味着存在一定量的高岭石。0.425 nm处微弱峰的存在说明含有少量的石英。

2.2 黏土矿物的相对含量分布特征

淳化黄土-古土壤剖面不同土层黏土矿物半定量的分析结果(图3)表明, 剖面不同土层的黏土矿物组合类型和数量存在差异。在整个黄土-古土壤剖面上, 黏土矿物以伊利石为主



注: a: 古土壤层S3; b: 黄土层L4 Note: a: Paleosol layer S3; b: Loess layer L4

图2 淳化剖面代表性土壤样品黏土矿物X射线衍射图

Fig. 2 XRD patterns of the clay minerals in representative soil samples of the Chunhua profile

(26%~63%), 其次是蒙脱石(0~39%), 绿泥石(2%~21%)与高岭石(1%~19%)含量相近, 蛭石含量相对较少。总体上, 古土壤层中的蒙脱石和绿泥石含量低于下伏黄土层, 而伊利石、蛭石含量高于下伏黄土层, 高岭石含量虽在古土壤层中含量略高, 但总体差别不明显。整个剖面从下往上蒙脱石含量总体呈减少趋势, 伊利石含量经历了由小(WL-3~L11)-大(S10~S5-1)-小(L5~S1)的变化, 蛭石含量则表现出相反的趋势: 由大(WL-3~L11)-小(S10~S6)-大(L6~S1)。高岭石含量在剖面不同土层中随时间尺度的变化趋势与绿泥石基本相同, 呈增高趋势。根据剖面垂向黏土矿物含量变化特征, 可将剖面上所有土层分为3个阶段进行分析:

阶段 I: WL-3~L11, 形成于早更新世至中更新世早期, 此时各黏土矿物的相对含量波动幅度较小, 特别是绿泥石、高岭石和蛭石。伊利石的变化范围为26%~46%, 平均含量为37.3%; 蒙脱石的变化范围为0~39%, 平均为25.7%; 绿泥石的变化范围为11%~18%, 平均值为12.9%; 高岭石的变化范围为10%~17%, 平均为11.3%; 蛭石的变化范围为7%~10%, 平均为8.3%。总体上, 阶段I的黏土矿物组合类型为伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石-蛭石。

阶段 II: S10~S5-1, 形成于中更新世的中

期, 此时各黏土矿物的相对含量波动幅度仍较小, 黏土矿物组合类型仍为伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石-蛭石, 相较于阶段I, 伊利石的含量变高, 蒙脱石、绿泥石、高岭石以及蛭石的含量降低。主要表现为: 伊利石相对含量变化范围为40%~63%, 蒙脱石为12%~34%, 绿泥石为2%~12%, 高岭石为1%~16%, 蛭石为2%~11%。

阶段 III: L5~S1, 形成于中更新世的晚期, 各黏土矿物的相对含量在不同土层间波动强烈。该阶段土壤中黏土矿物仍以伊利石为主, 相对含量变化范围为35%~56%。蒙脱石为0~29%, 绿泥石为11%~21%, 高岭石为9%~19%, 蛭石为5%~24%。相较于阶段 I 和阶段 II, 此阶段的绿泥石、高岭石以及蛭石含量增加, 蒙脱石含量降低。至于伊利石, 其含量介于阶段 I 和阶段 II 之间。此时的黏土矿物组合类型为伊利石-绿泥石-蛭石-高岭石-蒙脱石。

2.3 伊利石/绿泥石(I/C)的分布特征

图4表明, 淳化黄土-古土壤剖面上古土壤层伊利石/绿泥石(I/C值)在1.55~7.29之间, 黄土层变化幅度则更为显著, 为1.86~31.50。在整体趋势上, 古土壤层的I/C值高于其下伏黄土层。同黏土矿物的相对含量划分阶段一样, I/C值在剖面上的变化也可以划分为同样的3个阶段: 在I阶段, I/

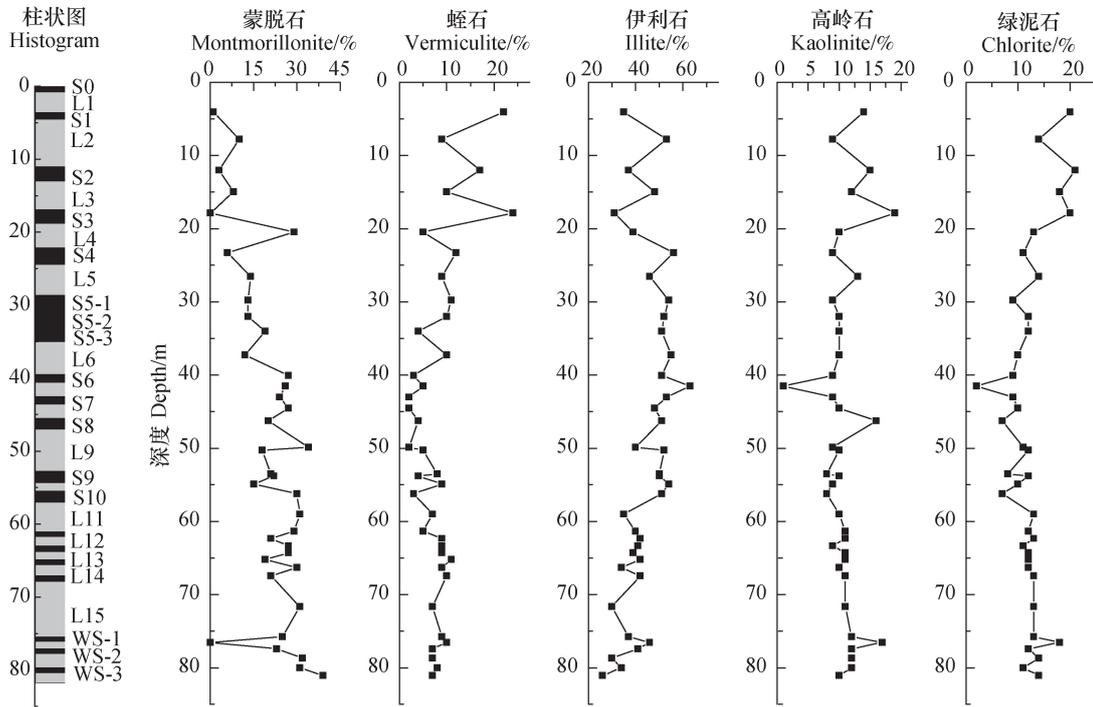
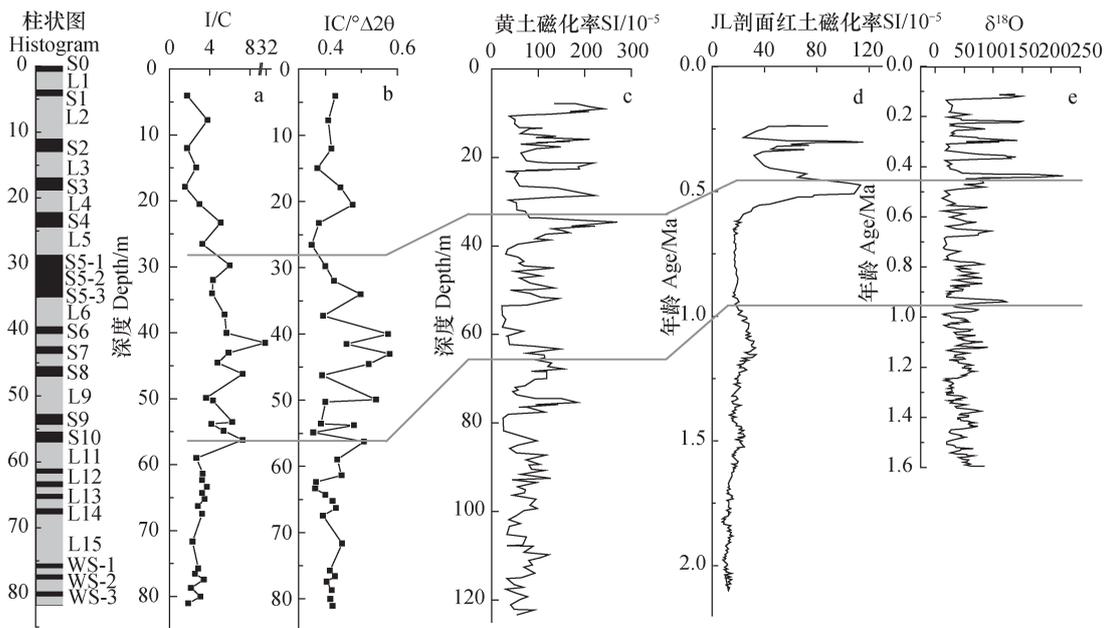


图3 淳化黄土-古土壤黏土矿物相对含量变化曲线

Fig. 3 Variation curves of relative contents of the clay mineral in the Chunhua loess-paleosol profile



注：a.伊利石/绿泥石（I/C）； b.伊利石结晶度IC值； c.洛川黄土-古土壤磁化率^[20]； d.庐山JL剖面红土磁化^[21]； e.北印度洋深海氧同位素^[22] Note: a. Ratio of illite to chlorite (I/C); b. Illite crystallinity (IC value); c. Magnetic susceptibility of the Luochuan loess-paleosol profile^[20]; d. Magnetic susceptibility of the JL Red Earth profile in Lushan area^[21]; e. Oxygen-isotope in the deep sea of North Indian Ocean^[22]

图4 淳化黄土-古土壤伊利石/绿泥石（I/C）及伊利石结晶度特征（IC值）与其他气候指标的对比

Fig. 4 Comparison of I/C ratios and IC value in the Chunhua loess-paleosol profile with other climate indexes

C值波动不大，介于1.86~3.73之间；在II阶段I/C I/C值有所增加且在L7时期，I/C达到了最大；在III
 波动幅度较大，介于3.64~35.10之间，相对I阶段 I/C逐渐降低，介于1.55~5.09之间，波动幅

度介于I阶段和II阶段之间。

2.4 伊利石结晶度的分布特征

图4表明, 淳化剖面古土壤层的IC值在 $0.37^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.58^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间, 黄土层为 $0.36^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.54^{\circ}\Delta 2\theta$, 且古土壤层的伊利石结晶度IC值明显低于其下伏黄土层。淳化剖面黄土及古土壤层的伊利石结晶度均属于非常好与好之间的过渡类型。与黏土矿物的相对含量以及I/C值相似, 在整个剖面上IC值也划分为同样的3个阶段。在I阶段, IC值较低, 且波动幅度较小, 介于 $0.37^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.45^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间; 在II阶段, IC值逐渐变大, 且波动幅度变大, 介于 $0.37^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.58^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间; 至III阶段, IC值又开始变小, 介于 $0.36^{\circ}\Delta 2\theta \sim 0.48^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间, 且平均值低于阶段I。

3 讨论

3.1 淳化剖面黏土矿物相对含量分布特征及其古环境意义

黏土矿物广泛存在于第四纪沉积物中, 在沉积和埋藏作用过程中可发生转变, 其形成和转化与所处环境变化密切相关。近年来, 黏土矿物已成为研究古环境变化的一类重要指标, 科研工作者通过调查沉积物中黏土矿物的成分、组合特征、含量变化以及结晶度来研究古气候环境, 取得了一系列成果^[23-24]。在黏土矿物中, 伊利石是一种较稳定的矿物, 由母质中硅酸盐矿物在弱碱性、气温较低及少雨的环境条件下风化形成, 因此, 气候寒冷干燥、淋滤作用弱有利于伊利石的形成和保存^[25]。而如果气候转为湿热, 伊利石晶格混层中的 K^+ 不断淋失时可导致其向蛭石及蒙脱石发生转化。如果湿热气候进一步持续或加剧, 化学风化将进行的更加彻底, 层间碱金属(主要为 K^+)继续流失, 伊利石可进一步转变为高岭石。蒙脱石形成于富盐基、碱性介质条件下, 由云母类矿物脱钾或由辉石、角闪石转化而成, 气候温凉有利于蒙脱石的积累^[26], 但相比伊利石的累积环境则要温暖湿润一些。绿泥石的形成环境与伊利石相似, 在风化作用过程中, 水镁片内的二价铁易被氧化, 因此绿泥石只在化学风化作用受到抑制的地区(如冰川或干旱的地表)保存下来^[27]。绿泥石同伊利石一样指示寒冷干旱的

气候环境。高岭石是由长石、云母和辉石在潮湿气候环境和酸性介质中强烈淋滤而成, 常指示高温多雨、强烈风化的环境, 其主要分布于热带和亚热带土壤^[28]。蛭石是在微酸性环境中淋滤而形成的, 大多产生于云母和水云母的进一步脱钾, 也可以由蒙脱石或绿泥石转变而来, 属于中等风化强度的产物, 主要分布于温带和亚热带地区土壤中^[29]。

本研究发现, 淳化黄土-古土壤剖面上不同土层黏土矿物类型相似, 但矿物相对含量变化特征在三个阶段差异显著, 这也指示了黄土高原淳化地区从早更新世以来古气候的阶段变化。在阶段I, 黏土矿物以伊利石和蒙脱石为主, 绿泥石和高岭石为辅, 反映了淳化早更新世到中更新世早期持续性的温凉的气候。阶段II, 黏土矿物仍以伊利石和蒙脱石为主, 绿泥石与高岭石相差不大。但与I阶段相比, 阶段II含有较少的蒙脱石与绿泥石, 较高的伊利石, 表明降雨量增加, 化学淋滤作用增强^[30], 淳化在中更新世的中期气候相对早更新世阶段更为温湿。阶段III黏土矿物以伊利石和绿泥石为主, 与阶段I相比, 所受的化学风化程度较弱, 表明淳化在中更新世的晚期气候相对早更新世及中更新世早期更趋于干冷。总体上, 黏土矿物的组合影响因素较多, 在一定程度上影响其对古气候事件的分辨率, 因此, 在分析黏土矿物类型与相对含量基础上, 需进一步分析伊利石与绿泥石的比值(I/C值)和伊利石结晶度IC值。

3.2 淳化剖面伊利石/绿泥石(I/C值)的古环境意义

除了可以通过分析黏土矿物含量及组合类型来判断土壤风化程度外, 各黏土矿物含量比值也可作为判断气候环境变化的指标。Zhao等^[31]根据在风化成土过程的早期阶段, 绿泥石易被风化为蛭石、蒙脱石、蛭石/绿泥石混层矿物等黏土矿物, 而伊利石由于抗风化程度较高容易被保存下来, 且绿泥石的风化速率大于伊利石, 故用伊利石/绿泥石(I/C)判别黏土矿物的风化强度及成壤环境。I/C越大, 则气候温暖湿润。本研究结果表明, 在淳化剖面上黏土矿物的I/C值从阶段I到阶段III, 经历了由小到大再到小的过程, 且阶段I的I/C值小于阶段III。在I阶段I/C值波动不大, 说明此阶段风化作用较弱, 降雨量少, 气温较低, 气候较为温凉; 而在II阶段I/C波动幅度变大, 说明此阶段风化作用增

强,降雨量增加,气温升高,气候相对温湿;而在III阶段 I/C逐渐降低,风化作用强度变弱,气候相比阶段I更为干冷。这与黏土矿物的相对含量变化所反映的气候状况相一致。

3.3 淳化剖面伊利石结晶度的古环境意义

伊利石结晶度(IC)主要反映了伊利石晶体的大小、膨胀晶层矿物的多少,并指示黏土矿物在沉积过程中的水解能力^[32]。当环境处于高温和强降雨量的状态,伊利石晶层中的 K^+ 淋失, K^+ 淋失程度越强,结晶度越差;而在化学风化程度低的干冷气候条件下,伊利石易于保存、其结晶度较高^[33]。故较高的伊利石结晶度指示低温、干燥的气候环境,而较低的结晶度值反映沉积物中的伊利石形成于高温和强降雨量的湿热气候条件下。贾伟丽等^[34]采用X射线衍射法分析了环县、长武和渭南3个剖面末次间冰期以来黄土-古土壤样品中黏粒($<2\mu m$)的伊利石结晶度,结果表明黄土高原中南部的长武与渭南剖面能很好地反映冰期与间冰期轮回特征,且伊利石结晶度能记录黄土高原东亚夏季风环流演化信息。彭淑贞和郭正堂^[35]分析比较西峰赵家川第四纪黄土与古土壤样品的伊利石结晶度,表明黄土中的伊利石结晶度IC值低于古土壤,并验证了黄土沉积物中的伊利石结晶度变化能很好地反映气候环境差异。在本研究中,从阶段I到阶段III,IC值经历了由小到大再到小的过程,且阶段I的IC值小于阶段III。根据IC值越低,伊利石结晶度越高,气候越为干冷的规律,可以推断出自早更新世至中更新世晚期,淳化地区经历了温凉-温湿-干冷的气候变化。这仍同黏土矿物的含量变化以及I/C值所反映的气候条件一致。

综上所述,淳化剖面各土层黏土矿物的相对含量、I/C值以及伊利石结晶度IC值均反映了从早更新世至中更新世晚期气候总体干冷化,并经历了温凉-温湿-干冷的气候变化。通过与洛川剖面250万年以来磁化率的变化^[20]进行对比(图4c),发现淳化剖面伊利石结晶度与洛川剖面磁化率的变化趋势相一致,均表现为在古土壤层的峰值较高,在黄土层的峰值较低,反映了黄土-古土壤序列的形成经历了多次冷暖干湿交替的气候变化,且指示了更新世时期古气候的阶段变化。赵璐璐等^[36]对成都盆地红土的黏土矿物进行测定,结果表明自早更新世中晚期以来经历了湿热

(1.2Ma~1.0Ma)-温凉(1.0Ma~0.7Ma)-温湿(0.7Ma~0.4Ma)-干冷(0.4Ma B.P.)的变化过程。朱丽东等^[21]根据庐山JL剖面红土磁化率的高低变化(图4d),将早更新世以来的气候划分为以下几个阶段:2.1Ma~0.9Ma气候温暖湿润,0.9Ma~0.59Ma时期夏季风异常强烈,0.59Ma~0.4Ma气候干湿交替明显,而0.4Ma~0.24Ma期间气候逐渐趋于干冷。Kawagata等^[22]通过对北印度洋722钻孔处海水温度变化的研究,其深海氧同位素含量指示了在距今1.6Ma以来海水变冷的趋势(图4e)。这些研究结果均与淳化剖面黏土矿物相对含量变化、I/C值和伊利石结晶度IC值所反映的早更新世到中更新世晚期的气候变化规律相一致。

再对比分析黄土高原中北部的兰州、洛川等黄土-古土壤剖面黏土矿物的相对含量及类型组合^[12],不难发现:兰州剖面的黏土矿物组合类型与淳化剖面在中更新世晚期相一致,而洛川剖面的黏土矿物类型与淳化剖面早更新世至中更新世的中期相一致,但由兰州剖面到洛川剖面,再至淳化剖面,伊利石以及绿泥石的含量逐渐降低,而蒙脱石、高岭石与蛭石的含量均增加。季俊峰等^[37]对洛川剖面的伊利石结晶度进行测定,结果表明黄土样品的IC值相差不大,在 $0.24^\circ\Delta 2\theta \sim 0.25^\circ\Delta 2\theta$ 之间,平均为 $0.25^\circ\Delta 2\theta$,而古土壤样品的IC值大于 $0.27^\circ\Delta 2\theta$ 。与此相比,淳化剖面无论黄土层还是古土壤层,其伊利石结晶度IC值均大于洛川剖面。根据黏土矿物的相对含量、组合类型与IC值对气候的指示性,可以判断出早更新世至中更新世时期,从黄土高原北部至南部黄土沉积物遭受的风化作用逐渐增强,黏土矿物均发生不同程度的转变,总体上,黄土高原南部淳化剖面黏土矿物特征所反映的气候相较黄土高原中北部,更为温暖,降雨量更多。

4 结 论

淳化剖面黏土矿物的相对含量、I/C值以及伊利石结晶度IC值在反演古气候方面具有较好的指示性。淳化剖面在WL-3~S5阶段,即早更新世至中更新世的中期,其沉积物中黏土矿物组成类型为伊利石-蒙脱石-绿泥石-高岭石-蛭石,但相比

WL-3 ~ L11阶段, S10 ~ S5阶段具有较高的伊利石和较少的绿泥石与蒙脱石;而在L5 ~ S1阶段,即中更新世的晚期,沉积物的黏土矿物组合类型发生改变,表现为:伊利石-绿泥石-蛭石-高岭石-蒙脱石。这些黏土矿物含量的变化揭示了从早更新世至中更新世以来,淳化地区气候总体干冷化,并经历了温凉-温湿-干冷的气候环境。I/C值同IC值一致,在剖面上从下到上均经历了由小到大再到小的过程,这与黏土矿物的含量变化所反映的气候环境演变规律相一致。

参考文献

- [1] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
Liu D S. Loess and environment (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [2] 龚子同, 陈鸿昭, 刘良梧. 中国古土壤与第四纪环境. 土壤学报, 1989, 26 (4): 379—387
Gong Z T, Chen H Z, Liu L W. Paleosols and quaternary environment in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1989, 26 (4): 379—387
- [3] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years. Quaternary Research, 1991, 36 (1): 29—36
- [4] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6 - Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}O$ record. Paleoclimatology, 2002, 17 (3): 5-1-5-21
- [5] 刘卫国, 张普, 孙有斌, 等. 黄土高原中部7~2Ma期间古植被变化的分子化石证据——以赵家川剖面为例. 第四纪研究, 2008, 28 (5): 806—811
Liu W G, Zhang P, Sun Y B, et al. Molecule fossil evidence for paleovegetation changes in the central of Chinese Loess Plateau during 7~2Ma—Zhaojiachuan profiles as an example (In Chinese). Quaternary Sciences, 2008, 28 (5): 806—811
- [6] Wang Q S, Song Y G, Zhao Z J, et al. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last glacial-interglacial cycle. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 116: 132—138
- [7] Liu J C, Liu W G. Soil nitrogen isotopic composition of the Xifeng loess-paleosol sequence and its potential for use as a paleoenvironmental proxy. Quaternary International, 2017, 440: 35—41
- [8] 张乃娴, 万国江, 马玉光. 威宁草海沉积物中的黏土矿物及其环境记录. 地质科学, 2000, 35 (2): 206—211
Zhang N X, Wan G J, Ma Y G. The clay mineral and its environmental record in the sediment core of Caohai, Weining (In Chinese). Scientia Geologica Sinica, 2000, 35 (2): 206—211
- [9] 贾相岳. 黄土高原不同水热条件下黄土母质土壤矿物演化特征. 华中农业大学, 2013
Jia X Y. Mineralogy characteristics of soil evolution on the loess parent materials under different hydrothermic conditions on the Loess Plateau (In Chinese). Central China Agricultural University, 2013
- [10] 孙庆峰, 陈发虎, Christophe Colin, 等. 黏土矿物在气候环境变化研究中的应用进展. 矿物学报, 2011, 31 (1): 146—152
Sun Q F, Chen F H, Colin C, et al. Application progress of clay minerals in the researches of climate and environment (In Chinese). Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31 (1): 146—152
- [11] 黄传琴. 黄土剖面粘粒矿物的组成特征及其环境意义. 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011
Huang C Q. Clay minerals in loess on the Loess Plateau and its environmental significance (In Chinese). Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011
- [12] 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 等. 我国不同气候带黄土中黏土矿物组合特征分析. 沉积学报, 2005, 23 (4): 690—695
Shi Y X, Dai X R, Song Z G, et al. Characteristics of Clay Mineral Assemblages and Their Spatial Distribution of Chinese Loess in Different Climatic Zones (In Chinese). Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23 (4): 690—695
- [13] 殷科, 洪汉烈, 高文鹏, 等. 末次间冰期以来临夏地区气候变化的黏土矿物学及地球化学记录. 土壤学报, 2012, 49 (2): 246—259
Yin K, Hong H L, Gao W P, et al. Clay mineralogical and geochemical records of paleoclimate in Linxia since the last interglacial (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (2): 246—259
- [14] 孙仲秀. 中国东北典型风成黄土—古土壤序列发生学特征研究. 沈阳农业大学, 2016
Sun Z X. Pedogenesis of a typical aeolian loess-paleosol sequence in Northeast China (In Chinese). Shenyang Agricultural University, 2016
- [15] 庞奖励, 黄春长, 刘安娜, 等. 黄土高原南部全新世黄土-古土壤序列若干元素分布特征及意义. 第四纪研

- 究, 2007, 27 (3): 357—364
- Pang J L, Huang C C, Liu A N, et al. Ba/Sr and Rb/Sr ratio of Holocene loess-paleosol sequences and its significance in South Loess Plateau, China (In Chinese). *Quaternary Research*, 2007, 27 (3): 357—364
- [16] 董吉宝, 安芷生, 卢凤艳, 等. 黄土-古土壤中蜗牛化石总数古气候意义探讨. *地球环境学报*, 2015, 6 (5): 291—298
- Dong J B, An Z S, Lu F Y, et al. Discussion on the paleoclimatic implications of total fossil snail counts in loess-paleosol sequences (In Chinese). *Journal of Earth Environment*, 2015, 6 (5): 291—298
- [17] 杨献忠. 伊利石的结晶度及其地质意义综述. *沉积学报*, 1993, 11 (4): 92—98
- Yang X Z. Illite crystallinity and its geological significances (In Chinese). *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11 (4): 92—98
- [18] Diekmann B, Petschick R, Gingele F X, et al. Clay mineral fluctuations in Late Quaternary sediments of the southeastern South Atlantic: implications for past changes of deep water advection//Springer, 1996: 621—644
- [19] Territo C, Vieillard P, Righi D, et al. A new simple approach to evaluate pedogenic clay transformation in a Vertic Calcisol. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88 (1): 345—349
- [20] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义. *第四纪研究*, 1999, 19 (4): 350—356
- Chen J, Wang Y J, Ji J F, et al. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 1999, 19 (4): 350—356
- [21] 朱丽东, 姜永见, 张明强, 等. 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录. *山地学报*, 2011, 29 (4): 385—394
- Zhu L D, Jiang Y J, Zhang M Q, et al. Characteristics of magnetic susceptibility and its paleoenvironmental records from JL red earth section, Lushan Area (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2011, 29 (4): 385—394
- [22] Kawagata S, Hayward B W, Gupta A K. Benthic foraminiferal extinctions linked to late Pliocene—Pleistocene deep-sea circulation changes in the northern Indian Ocean (ODP Sites 722 and 758). *Marine Micropaleontology*, 2006, 58 (3): 219—242
- [23] 张磊, 何付兵, 蔡向民, 等. 内蒙古二连盆地西南部第四纪沉积物中粘土矿物特征与古气候指示意义. *第四纪研究*, 2011, 31 (5): 780—790
- Zhang L, He F B, Cai X M, et al. Clay mineralogy and its paleoclimatic indicator of the quaternary sediments in the southwest of erlian basin, Inner Mongolia (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2011, 31 (5): 780—790
- [24] 程峰, 洪汉烈, 顾延生, 等. 广西百色盆地更新世沉积物中粘土矿物特征及其古气候指示意义. *第四纪研究*, 2014, 34 (3): 560—569
- Cheng F, Hong H L, Gu Y S, et al. Clay mineralogy and its paleoclimate interpretation of the Pleistocene sediments in Baise Basin, Southern China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (3): 560—569
- [25] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义. *地学前缘*, 2002, 9 (2): 337—344
- Tang Y J, Jia J Y, Xie X D. Environment significance of clay minerals (In Chinese). *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2002, 9 (2): 337—344
- [26] Keller W D. Environmental aspects of clay minerals. *Journal of Sedimentary Research*, 1970, 40 (3): 788—859
- [27] Gingele F X, De Deckker P, Hillenbrand C D. Late Quaternary fluctuations of the Leeuwin Current and palaeoclimates on the adjacent land masses: clay mineral evidence. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48 (6): 867—874
- [28] Singer A. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments — a review. *Earth-Science Reviews*, 1984, 21 (4): 251—293
- [29] Bronger A, Winter R, Sedov S. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried paleosols in Tadjikistan: towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia. *Catena*, 1998, 34 (1): 19—34
- [30] 郑洪汉, 顾雄飞, 韩家懋, 等. 中国黄土中的粘土矿物及其在地层剖面中的变化趋势—洛川和陇西黄土剖面的初步研究. *第四纪研究*, 1985, 6 (1): 158—165
- Zheng H H, Gu X F, Han J M, et al. Clay minerals in loess of China and their tendency in loess section (In Chinese). *Quaternary Research*, 1985, 6 (1): 158—165
- [31] Zhao L, Ji J F, Chen J, et al. Variations of illite/chlorite ratio in Chinese loess sections during the last glacial and interglacial cycle: Implications for monsoon reconstruction. *Geophysical Research*

- Letters, 2005, 32 (20) : L20718
- [32] Eberl D D, Velde B. Beyond the Kübler index. *Clay Minerals*, 1989, 24 (4) : 571—577
- [33] 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. *土壤学报*, 2015, 52 (5) : 991—1001
Liu L H, Hu X F, Ye W, et al. Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of quaternary red clay in southern Anhui Province, Southeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5) : 991—1001
- [34] 贾伟丽, 彭淑贞, 张伟, 等. 末次间冰期以来黄土中伊利石结晶度的变化与古环境. *第四纪研究*, 2014, 34 (3) : 553—559
Jia W L, Peng S Z, Zhang W, et al. Variations of illite crystallinity in the Chinese loess deposits since the last interglacial periods and paleoclimatic significance (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2014, 34 (3) : 553—559
- [35] 彭淑贞, 郭正堂. 风成三趾马红土与第四纪黄土的粘土矿物组成异同及其环境意义. *第四纪研究*, 2007, 27 (2) : 277—285
Peng S Z, Guo Z T. Clay mineral composition of the tertiary red clay and the quaternary loess-paleosols as well as its environmental implication (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (2) : 277—285
- [36] 赵璐璐, 洪汉烈, 殷科, 等. 成都盆地红土沉积物中黏土矿物的特征及其古气候指示意义. *地质科技情报*, 2015, 34 (3) : 80—86
Zhao L L, Hong H L, Yin K, et al. Characteristics and palaeoclimate significance of clay minerals in the red earth sediment in Chengdu Basin (In Chinese). *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34 (3) : 80—86
- [37] 季俊峰, 陈骏, 王洪涛. 陕西洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度——黄土物质来源和古气候环境的指示. *地质论评*, 1997, 43 (2) : 181—185
Ji J F, Chen J, Wang H T. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi Province-Indicators origin and paleoclimate of loess (In Chinese). *Geological Review*, 1997, 43 (2) : 181—185

Distribution of Clay Minerals in the Chunhua Loess-paleosol Sequence and Its Palaeoenvironmental Significance

ZHANG Qingqing^{1,3} HUANG Jinghua^{1,2} YAO Jun⁴ HU Feinan^{1,2} HUO Na⁴ SHANG Yingni⁴
CHANG Wenqian⁴ ZHAO Shiwei^{1,2†}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 The loess-paleosol sequence on the Loess Plateau of China has been considered as an important information carrier recording changes in the global environment and climate of the Quaternary period. As weathering products of land surface, clay minerals are widely found in Quaternary sediments, and their paleoenvironmental significance has also attracted more and more attention. It has been documented that the formation and transformation of clay minerals is closely related to climatic conditions. However, so far, few studies have been reported on characteristics of the clay mineral in loess-paleosol profiles in the southern part of the Loess Plateau. Besides, previous researches about paleoclimate evolution in the south Loess Plateau focused mainly on Holocene, with little attention to climate changes in the Pleistocene. 【Method】 In this paper, a typical loess-paleosol profile of the Loess Plateau was selected in Chunhua County, Shaanxi Province, south of the Loess Plateau as research object. With the

aid of the X-ray diffraction method, qualitative and semi-quantitative analyses of the soil samples from different layers of the Chunhua loess-paleosol profile were carried out for analyzing relative contents of clay minerals, illite/chlorite ratio (I/C value) and illite crystallinity (IC value), as well as regularities of their evolutions, and further for relationships of the characteristics of the clay minerals in the profile with changes in paleoclimate and eventually, for regularities of the evolution of the paleoclimate and paleo-environment in the Pleistocene in the south Loess Plateau. 【Result】 Results show: (1) The three indices, i.e. relative content of clay minerals, ratio of illite to chlorite (I/C values) and illite crystallinity (IC value) of the Chunhua loess-paleosol profile are good indicators to be used in reversion of paleoclimate changes in the Pleistocene. (2) All the soil layers of the profile had the same clay minerals, but relative contents of the clay minerals varied significantly from layer to layer. During the period from the early Pleistocene to the mid-middle Pleistocene (WL-3 ~ S5), the clay minerals were composed mainly of illite – montmorillonite – chlorite – kaolinite – vermiculite, and this period could be divided into two stages according to the changes in relative contents of the clay minerals. From the early Pleistocene to the early middle Pleistocene (WL-3 ~ L11), the relative content of illite was comparatively low while the relative content of chlorite was quite high, which indicates that a cool temperate climate prevailed in this period. However, in the mid-middle Pleistocene (S10 ~ S5), the relative content of illite increased, while the relative content of montmorillonite and chlorite decreased, which indicates that the climate was relatively warmer and more humid in this period. In the late middle Pleistocene (L5 ~ S1), the composition of clay minerals turned to be of illite – chlorite – vermiculite – kaolinite – montmorillonite, and the relative contents of illite and chlorite increased, implying a dry-cold climate dominated this period. Therefore, the changes in relative contents of the clay minerals in the Chunhua loess-paleosol profile indicate that from the early Pleistocene to the late middle Pleistocene, the climate generally became dry and cold, and experienced changes from cool temperate to warm wet and to cold dry. (3) The ratio of illite to chlorite (I/C value) and illite crystallinity (IC value) also exhibited phased variations from the bottom to the top of the Chunhua profile, that is increasing first and then decreasing. The distribution of I/C ratio and illite crystallinity indicates that the climate in the Pleistocene underwent an evolution process similar to that of the clay minerals in relative content. 【Conclusion】 All the findings in this research are found to be conducive to the exploration of changes in the climate and environment of the south loess-paleosol during the Pleistocene, and may serve a scientific basis for comprehensive exploration of changes in climate and environment of various regions of the Loess Plateau during the Quaternary period of the Pleistocene.

Key words Chunhua loess-paleosol sequence; Clay minerals; Illite crystallinity; Paleoclimate

(责任编辑：檀满枝)