

doi: 10.12097/gbc.2023.07.008

支钰, 卞惠瑛, 宋飞, 李浩然. 2025. 陕西洛南盆地黄土剖面色度参数及古气候变化[J]. 地质通报, 44(6): 1151–1163.

Zhi Yu, Bian Huiying, Song Fei, Li Haoran. 2025. The chromaticity parameters and paleoclimate changes of loess profile in Luonan Basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1151–1163(in Chinese with English abstract).

陕西洛南盆地黄土剖面色度参数及古气候变化

支钰¹, 卞惠瑛², 宋飞^{1*}, 李浩然³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安 710054; 3. 陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要:【研究目的】以陕西洛南典型剖面(LN剖面)为研究对象, 分析色度指标和其他气候替代性指标沿剖面的变化, 探究LN剖面色度指标的古环境意义及洛南盆地中更新世中期—末期的古气候变化情况。【研究方法】通过对LN剖面不同深度色度参数、粒度、磁化率及Rb/Sr值进行综合分析, 【研究结果】结果表明: ①色度参数沿剖面不同地层单元呈有规律的变化, 亮度(L^*)和色调角(h^*)表现为黄土层大于古土壤层, 其高值指示了相对干冷的气候条件; 而红度(a^*)、红度/黄度(a^*/b^*)表现为古土壤层(S1~S6)大于黄土层(L1~L7), 其高值指示了相对温暖湿润的环境。 L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 、 h^* 均可以作为良好的气候替代指标指示该地区气候的变化情况。②色度及其他气候替代性指标共同揭示了洛南盆地中更新世中期—末期的气候变化, 对应黄土层堆积时期, 气候条件寒冷湿润; 古土壤层堆积时期, 气候条件温暖潮湿。【结论】不同于黄土高原地区干冷—温湿的变化, 洛南地区呈现寒冷湿润—温暖潮湿的气候旋回, 总体沉积环境湿润, 风化成壤作用强烈, 整体上经历了冷湿—暖湿—冷湿的气候变化。该研究结果对于正确认识东秦岭及周边地区中更新世古人类的生存环境和气候变化具有借鉴意义。

关键词: 洛南盆地; 黄土-古土壤序列; 色度参数; 中更新世; 气候变化; 环境地质调查工程

创新点: L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 、 h^* 指标均可以作为良好的气候替代指标指示洛南地区的气候变化情况, 研究区总体沉积环境湿润, 风化成壤作用强烈, 整体上经历了冷湿—暖湿—冷湿的气候变化。

中图分类号: P532; P534.63^{±1} 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1151-13

The chromaticity parameters and paleoclimate changes of loess profile in Luonan Basin, Shaanxi Province

ZHI Yu¹, BIAN Huiying², SONG Fei^{1*}, LI Haoran³

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: 【Objective】Taking the typical Luonan profile (LN profile) as the research object, this study analyzes the variations of chromaticity indices and other climatic proxy indices along the profile, and explores the paleoenvironmental significance of the chromaticity indices of the LN profile and the paleoclimatic changes in the Luonan Basin during the mid-to-late Middle Pleistocene. 【Methods】Comprehensive analysis was conducted on chromaticity parameters, grain size, magnetic susceptibility, and Rb/Sr values at different depths of the LN profile. 【Results】The results show that: ①The chromaticity parameters exhibit regular variations across different stratigraphic units in the profile. Luminance (L^*) and hue angle (h^*) are higher in loess layers than in paleosol layers, with high

收稿日期: 2023-07-04; 修订日期: 2023-09-15

资助项目: 国家自然科学基金项目《黄土边坡的地质结构界面效应及其促滑机制研究》(批准号: 41877247)、《榆林市地质灾害成灾规律与风险管控研究项目》(批准号: SQZB2021-135)

作者简介: 支钰(1999-), 女, 在读硕士生, 地质资源与地质工程专业。E-mail: 2622146526@qq.com

* 通信作者: 宋飞(1976-), 男, 博士, 副教授, 从事黄土工程地质、地质灾害等方面的研究。E-mail: 250846105@qq.com

values indicating relatively dry and cold climatic conditions. In contrast, redness (a^*) and the redness/yellowness ratio (a^*/b^*) are higher in paleosol layers (S1–S6) than in loess layers (L1–L7), with high values indicating relatively warm and humid environments. L^* , a^* , a^*/b^* , and h^* can all serve as good climatic proxy indices to indicate climate changes in this region. ② Chromaticity and other climatic proxy indices collectively reveal the climatic changes in the Luonan Basin during the mid-to-late Middle Pleistocene. The accumulation period of loess layers corresponds to cold and humid climatic conditions, while the accumulation period of paleosol layers corresponds to warm and humid conditions. [Conclusions] Unlike the dry-cold to warm-wet climate cycles in the Loess Plateau, the Luonan region exhibits a climate cycle of cold-humid to warm-humid. The overall sedimentary environment was humid, with strong weathering and pedogenesis, experiencing a climatic change pattern of cold-wet $\rightarrow$ warm-wet $\rightarrow$ cold-wet. The research results provide insights for correctly understanding the living environment and climatic changes of paleohumans in the East Qinling and surrounding areas during the Middle Pleistocene.

Key words: Luonan Basin; loess-paleosol sequence; chromaticity parameters; Middle Pleistocene; climate change; environment geological survey engineering

Highlights: The indices of L^* , a^* , a^*/b^* , and h^* can all serve as good climate proxy indicators to reflect the climate changes in the Luonan area. The study area generally has a humid sedimentary environment with strong weathering and soil-forming processes, and has overall experienced a climate change pattern of cold-wet $\rightarrow$ warm-wet $\rightarrow$ cold-wet.

About the first author: ZHI Yu, female, born in 1999, M.S. candidate, mainly engaged in geological resources and geological engineering; E-mail: 2622146526@qq.com

About the corresponding author: SONG Fei, male, born in 1976, Ph.D., associate professor, engaged in research on loess engineering geology, geological disasters; E-mail: 250846105@qq.com

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41877247, SQZB2021-135).

随着全球变暖问题的日益加剧,气候变化问题受到了国内外学者的广泛关注,也成为近些年研究的重点之一(张文桐等,2017),而研究区域古气候的变化规律将对预测未来气候的变化情况产生极大帮助。目前国内外分析古气候环境变化主要围绕极地冰芯(Grimm,1987; Dansgaard et al., 1993; Petit et al., 1999)、湖泊沉积物(王苏民等,1993; Fujinaga, 2003; 刘博华等, 2024)、黄土-古土壤序列等技术手段。在黄土高原地区,黄土-古土壤序列作为记录古气候变化的良好载体,记录了自剖面沉积以来的古气候及环境演变过程(刘东生, 1985; 赵彩萍等, 2012; 吴小力等, 2023)。土壤颜色是其最显著的特征之一,受到多种因素的影响,土壤颜色与其沉积过程中环境的变化紧密相关。土壤的颜色特征可以直接反映黄土-古土壤形成时期的气候特征及沉积环境(杨胜利, 2001; 杨胜利等, 2001),目前土壤颜色作为气候的替代指标,已被广泛应用于黄土-古土壤序列研究(胡梦珺等, 2020, 2022; 杜兰等, 2021; 马永法等, 2021)。

洛南盆地是发育在华北板块南缘东秦岭地区的山间盆地(余尚江等, 2020),盆地内堆积数米到数十米厚度不等的风成黄土,黄土中记录着本区域中更新世不同时期的沉积环境及气候变化过程。前人对洛南盆地剖面地层及气候变化的研究大多集中在岩

石磁学、古地磁测年、孢粉分析等方面(鹿化煜等, 2007; 赵军等, 2008; 张文超, 2013)。其中,鹿化煜等(2007)通过上白川和刘湾2个剖面光释光测年及磁化率测定结果,推测黄土堆积可能开始于110万年前,剖面中存在明显的黄土-古土壤旋回,可以指示气候和环境的变化;张普等(2009)则对上白川和刘湾剖面进行了有机碳同位素测定,并与黄土高原典型剖面进行对比分析,认为洛南黄土相对于黄土高原北部地区,气候更加暖湿;张文超(2017)利用多个剖面的孢粉数据重建了早更新世以来秦岭地区的植被和季风气候变化,但受孢粉保存环境影响,仅在表层1.5 m深度内进行了研究。综上,目前采用色度指标揭示洛南盆地古气候变化方面的研究鲜有报道。

本文通过对LN剖面色度指标的分析,探究色度参数在该区域的古气候意义,并结合粒度、磁化率、Rb/Sr值等其他指标,探讨了洛南盆地中更新世中期—末期(550~95 ka)的古环境特征。该研究结果对于正确认识东秦岭及周边地区中更新世古人类的生存环境及气候变化具有借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洛南盆地地处黄土高原南部边缘地带的东秦岭

地区,位于陕西省商洛市洛南县中部(吴承英, 1999),是一个新生代断陷盆地。该区域属于温带季风性湿润山地气候,气候温和、雨量充沛,年均降水量为 754.8 mm,主要集中在 7—9 月,具有明显的季节性特征,多年平均蒸发量 779.5 mm,年均气温 11.1℃。研究区海拔 910~1050 m,现代植被发育,以乔木为主,多为暖温带落叶阔叶林。

1.2 剖面选择与样品采集

本次选择 LN 剖面(北纬 34°6'4.305"、经度 110°7'58.378")作为研究对象,剖面顶部高程为 980 m。该处由于工程建设开挖形成了一处近直立的新鲜黄土-古土壤剖面,剖面相对完整(图 1),根据野外调查发现黄土中夹有 5~6 层黄白色土层,土层中含有铁锰结膜,剖面自上而下分层较明显,各层厚度不大,整体高度为 8.5 m,坡脚可见中更新世早期洪积砾石层。研究剖面在地理位置及土层厚度上具有很强的区域代表性和典型性。

将剖面表层植被清理后,从顶部向下按固定垂直间距 10 cm 进行连续采样,共采粉末状样品 85 个,并在深度 32~36 cm、50~55 cm、143~148 cm、230~234 cm 处采集光释光测年样品共 4 个,样品采集时间为 2022 年 4 月。采样过程中同时对黄土剖面进行现场编录,并结合野外观察及室内测得的色度参数、粒度、磁化率、Rb/Sr 值等理化指标进行层

位划分(表 1)。

1.3 实验与分析方法

光释光测年:实验所采用仪器为 Risø TL/OSL-DA-20 释光测量仪。辐照源采用⁹⁰Sr/⁹⁰Y β 源,照射剂量率约为 0.126 Gy/Sec。选用波长为 470±30 nm 的蓝光激发,发光强度为 90%。该实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。对样品进行去除有机质、去除碳酸盐类物质、清洗至中性等一系列前处理后采用单片再生剂量法(SAR)测量样品的等效剂量,并对样品环境剂量率进行测定。样品年龄的计算公式如下:

$$\text{年代(Age)} = \frac{\text{等效剂量(De)}}{\text{环境剂量率(D)}} \quad (1)$$

色度参数和磁化率:①将烘干后的土样研碎,过 200 目的筛子筛除杂质,以消除湿度及粒径对实验结果的影响;②将研碎后的粉末样品压入规格为 20 mm*20 mm*2 mm 的透明玻璃板中,将表面压平,刮除周围多余散土,表面平铺透明塑料薄膜,将样品按编号依次排列,使用英国 Geotek 公司生产的多参数岩心扫描仪进行色度和磁化率的测量。磁化率测得指标为质量磁化率,单位 m³/kg。

地球化学元素:样品制备过程与上述相同,使用荷兰 Avaatech BV 公司生产的高分辨率 XRF 元素扫描仪进行土壤地球化学元素测量,测定土壤中的

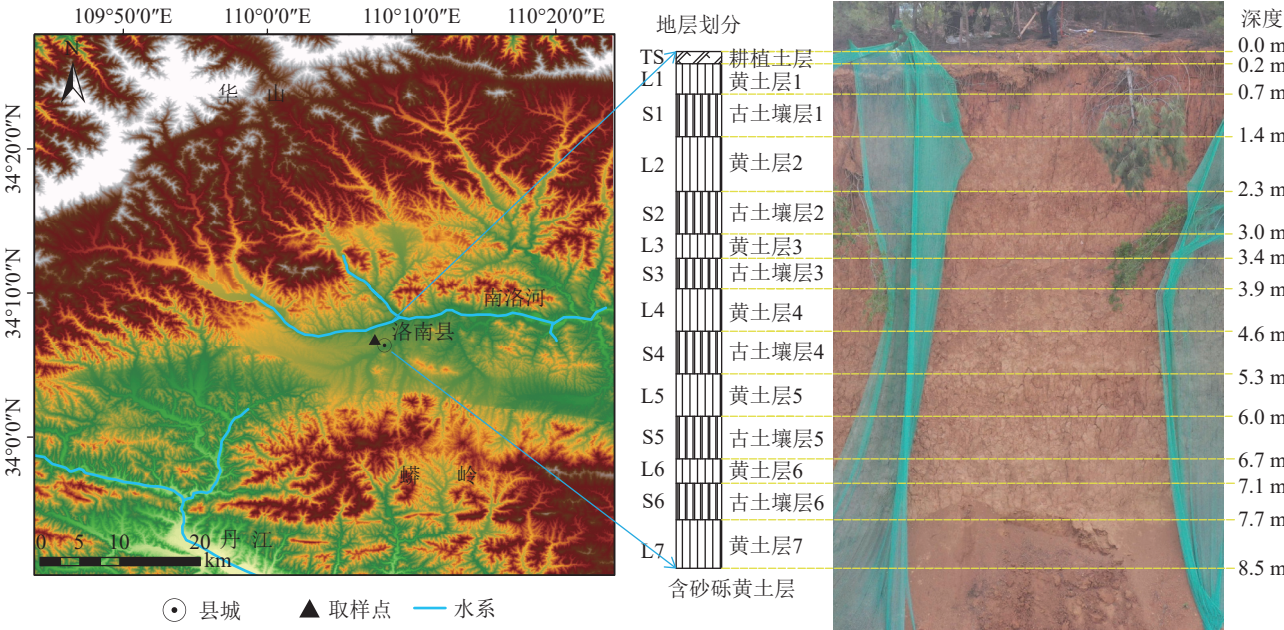


图 1 LN 剖面位置图

Fig. 1 The location map of LN profile

表 1 LN 剖面地层特征
Table 1 The stratigraphic characteristics of the LN profile

地层	深度/m	地层特征
TS	0~0.2	耕植土, 橙棕色, 干燥, 硬塑, 疏松多孔, 根系发育
L1	0.2~0.7	黄土, 苍白棕色—米黄棕色, 稍湿、硬塑, 致密
S1	0.7~1.4	古土壤, 泥土棕色, 稍湿, 硬塑, 孔洞发育, 局部有黑色有机质残留
L2	1.4~2.3	黄土, 米黄色—沙黄色, 稍湿, 硬塑, 有针状孔隙发育
S2	2.3~3.0	古土壤, 泥土棕色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育
L3	3.0~3.4	黄土, 沙黄色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育, 局部有红棕色碳酸盐盐膜
S3	3.4~3.9	古土壤, 泥土棕色, 表层风化干燥后呈黄白色, 稍湿, 硬塑, 偶见白色钙质斑点和钙膜
L4	3.9~4.6	黄土, 泥土棕色—赭石棕色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育, 偶见白色钙质斑点
S4	4.6~5.3	古土壤, 棕米色—泥土棕色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育
L5	5.3~6.0	黄土, 赭石棕色, 表层风化干燥后呈黄白色, 稍湿, 硬塑, 偶见白色钙质斑点
S5	6.0~6.7	古土壤, 泥土棕色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育
L6	6.7~7.1	黄土, 沙黄色, 表层风化干燥后呈黄白色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育, 偶见白色钙质斑点
S6	7.1~7.7	古土壤, 泥土棕色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育
L7	7.7~8.5	黄土, 沙黄色, 稍湿, 硬塑, 孔隙发育, 偶见白色钙质斑点

Rb、Sr 元素, 进而分析 Rb/Sr 值。以上实验均在中国科学院地球环境研究所岩心扫描实验室完成。

粒度测量方法: ①将干燥后的样品放入研钵中研碎, 过 2 mm 筛, 除去杂质; ②称取 0.3 g 样品放入烧杯中, 按取样深度编号, 向烧杯中加入 10 mL 浓度为 10% 的 H₂O₂ 溶液和 10% 的 HCL 溶液, 水浴加热充分反应后静置 24 h, 去除有机质和碳酸盐物质; ③加水直至样品溶液呈中性, 加入六偏磷酸钠分散剂使颗粒分散; ④采用丹东百特仪器有限公司生产的 Bettersize2000 型粒度激光分布仪进行测量。该实验在长安大学自然资源部岩土工程开放研究实验室完成。

色度参数采用 1976 年国际照明委员会(Commission Internationale De L'Eclairage, CIE)提出的 CIELAB 色彩空间系统(即 L^* , a^* , b^* 表色系统)。其中, L^* 值代表亮度, 变化于 0~100 之间(0 表示黑色, 100 表示白色); a^* 值代表红度, 变化于 -60~60 之间(-60 代表绿色, 60 代表红色); b^* 值代表黄度, 变化于 -60~60 之间(-60 代表蓝色, 60 代表黄色)(胡梦珺等, 2020; 杜兰等, 2021), 另外本文还采用了 a^*/b^* 和色调角(h^*) 2 个参数来补充色度的研究结论, a^*/b^* 可以反映红度值及黄度值的差异大小(王海燕等, 2017; 李星耀等, 2023), 而色调角 h^* 指从色彩空间中正横坐标开始, 沿逆时

针方向偏转的角度, 与 a^* 、 b^* 直接相关, h^* 越大表示颜色越黄, h^* 越小则颜色越红, h^* 的计算公式(胡梦珺等, 2022) 如下:

$$h^* = \arctan \frac{b^*}{a^*} \tag{2}$$

1.4 地层年代

将剖面与相近的刘湾剖面(鹿化煜等, 2012; 杨宇哲等, 2023)、西安刘家坡剖面(孙建中, 2005) 及洛川黑木沟典型黄土高原黄土剖面(刘东生, 1985) 进行对比, 结合光释光测年结果(表 2), 使用内插法, 综合确定 LN 剖面黄土大约自 55 万年前开始堆积成壤, 参照中国典型黄土地层划分办法, 推测剖面底部 S5-L6-S6-L7 地层属离石黄土下部, L1~L5 地层属离石黄土上部, 表层耕植土为第四系堆积物。洛南黄土成壤时期为中更新世中期—末期(550~95 ka)。

2 结果与分析

2.1 色度参数

2.1.1 亮度 L^* 变化特征

L^* 沿剖面整体波动较强烈, 与 a^* 呈明显相反的变化趋势(图 2), 其变化范围在 60.46~66.23 之间, 平均值为 63.22, 变化幅度为 9.5%。除古土壤层 S3 的 L^* 值(63.28)较高外, 整体在黄土层中表现为明显高值,

表 2 LN 剖面光释光测年结果统计

Table 2 The statistical table of LN profile luminescence dating results

样品编号	深度/cm	含水率/ ω	宇宙射线/(Gy·ka ⁻¹)	K/%	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	年剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	测片数量	总剂量/Gy	年龄/ka
CN-1	32	9.5	0.22	1.67	13.6	2.82	4.3	6	415±30	96.5±7.0
CN-2	50	9.4	0.22	2.11	13.6	2.82	4.1	6	471±35	114.9±8.5
CN-3	143	8.9	0.22	2.36	13.6	2.82	4.2	6	541±63	128.8±14.9
CN-4	230	10.1	0.22	2.27	14.4	2.84	4.3	6	699±80	162.5±18.5

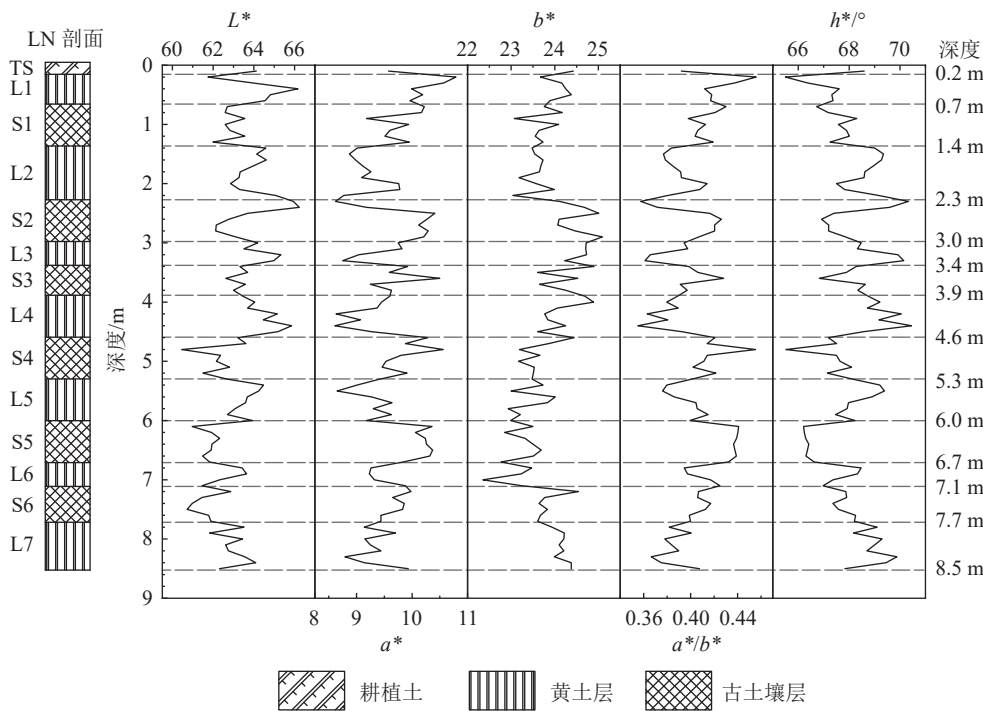


图 2 色度参数的变化曲线

Fig. 2 The change curves of chromaticity parameters

平均值为 64.03, 在古土壤层中表现为明显低值, 平均值为 62.43(表 3)。

2.1.2 红度 a^* 变化特征

a^* 在各地层单元中呈现有规律的变化(图 2), 变化范围为 8.61~10.79, 平均值为 9.61, 变化幅度为 25.3%, 从整个剖面看, 整体呈现较强的波动趋势, 除黄土层 L1 的 a^* 值(10.18)较高外, a^* 在黄土层中表现为明显低值, 平均值为 9.35, 在古土壤层中表现为明显高值, 平均值为 9.94(表 3)。

2.1.3 黄度 b^* 的变化特征

黄度 b^* 值随黄土-古土壤序列变化不明显, 但总体呈现与 L^* 相近的变化趋势(图 2), 整体波动变化较 L^* 和 a^* 弱。变化范围为 22.35~25.09, 平均值为 23.85, 变化幅度为 12.3%。古土壤层中平均值为 23.87, 黄土层平均值为 23.87(表 3)。

2.1.4 a^*/b^* 和色调角 h^* 变化特征

a^*/b^* 的变化范围为 0.36~0.46, 平均值为 0.40, 变化幅度为 25.45%, $S5(0.44)>L1(0.423)>S4(0.417)>S2(0.408)>L6(0.408)>S6(0.407)>S1(0.406)>S3(0.402)>L5(0.395)>L2(0.387)>L7(0.385)>L4(0.383)>L3(0.381)$, 黄土中平均值为 0.40, 古土壤中平均值为 0.41。 a^*/b^* 与色调角 h^* 呈明显相反的变化趋势, 与 a^* 的变化趋势相同。剖面中 h^* 的变化范围为 65.50°~70.45°, 平均值为 68.05°, 变化幅度为 7.57%, 黄土层中表现为高值, 平均值为 68.47, 颜色更黄, 古土壤层表现为明显低值, 平均值为 67.56°, 颜色更红, h^* 与 L^* 变化趋势较一致。

2.2 粒度组成

本文采用刘东生(1985)的粒径分组方法对 LN 剖面黄土粒径进行划分(表 4)。总体看, 洛南黄

表 3 LN 剖面色度参数的垂直变化特征

Table 3 Vertical changes of chromaticity parameters at LN profile

层位		L^*	a^*	b^*	a^*/b^*	$h^*/^\circ$
L1	范围	62.69~66.17	9.96~10.57	23.76~24.38	0.412~0.438	66.371~67.610
	均值	64.87	10.18	24.17	0.42	67.08
S1	范围	61.99~64.59	9.01~10.17	23.07~24.17	0.384~0.421	67.180~69.007
	均值	62.83	9.80	23.72	0.41	67.89
L2	范围	62.85~65.94	8.62~9.78	23.04~24.11	0.358~0.414	67.506~70.327
	均值	64.30	9.13	23.70	0.39	68.85
S2	范围	62.12~66.23	9.18~10.41	24.07~25.09	0.372~0.426	66.919~69.597
	均值	62.77	10.26	24.55	0.41	67.81
L3	范围	63.31~65.33	9.04~9.92	24.23~24.9	0.361~0.398	68.278~70.144
	均值	64.50	9.34	24.60	0.38	69.17
S3	范围	62.62~63.69	9.25~10.5	23.61~24.69	0.389~0.428	66.827~68.753
	均值	63.28	9.75	24.27	0.40	68.09
L4	范围	63.21~65.85	8.61~10.28	23.61~24.89	0.355~0.421	67.187~70.453
	均值	64.73	9.01	24.07	0.38	69.05
S4	范围	60.46~63.61	9.42~10.56	23.17~23.86	0.401~0.455	65.517~68.140
	均值	62.35	9.89	23.61	0.42	67.36
L5	范围	62.7~64.47	8.65~9.64	23.93~24.01	0.376~0.415	67.466~69.389
	均值	63.67	9.24	23.39	0.40	68.44
S5	范围	60.97~62.32	9.84~10.37	22.77~23.69	0.432~0.441	66.210~66.629
	均值	61.76	10.21	23.31	0.44	66.35
L6	范围	61.45~63.64	9.23~9.88	23.61~24.54	0.395~0.425	66.977~68.468
	均值	63.13	9.27	23.02	0.41	67.79
S6	范围	60.72~62.87	9.44~9.98	23.93~24.01	0.399~0.417	67.359~68.257
	均值	61.59	9.73	23.76	0.41	67.86
L7	范围	61.82~64.09	8.79~9.93	23.94~24.38	0.366~0.407	67.839~69.877
	均值	63.01	9.32	24.18	0.39	68.93

土颗粒组成偏细,其中<10 μm 的颗粒含量总占比超过 50%。黄土与古土壤在粒度组分上存在一定差异,具体表现在古土壤层中的粘粒组分总是高于下伏黄土层,且古土壤层中粘粒平均占比为 38.17%,而黄土中粘粒组分平均占比为 36.22%。但经显著性检验,这种差异并不显著(表 4)。如图 3 所示,粘粒组分占比和砂粒组分占比沿剖面呈现明显的波动变化,粘粒占比自下而上表现为先增大后减小的变化趋势,而砂粒表现为先减小后增大。

2.3 磁化率

LN 剖面磁化率值随深度增加呈现出明显的波动变化,变化范围在 $8.4\times10^{-8}\sim35.5\times10^{-8}$ m³/kg 之间,其整体变化与 a^* 的变化趋势基本一致(图 3)。此

外,研究结果显示,黄土层中磁化率平均值为 16.51×10^{-8} m³/kg,而古土壤层中平均值为 17.52×10^{-8} m³/kg,总体表现为古土壤层总是大于下伏黄土层磁化率值,该结果(表 4)与上白川剖面(赵军等, 2008)磁化率值相近。另外,该区域磁化率并非都是古土壤层大于黄土层,这也说明磁化率的变化规律与黄土-古土壤层不能完全对应。

2.4 Rb/Sr 值

Rb/Sr 值是风成黄土中表征土壤化学风化程度的指标, Sr 元素在成壤过程中易随水流发生元素迁移,而 Rb 元素相对稳定,土壤中 Rb/Sr 值的大小记录了黄土成壤过程中受淋滤情况和降水量的差异(张华等, 2011; 吴帅虎等, 2015; 羊俊敏等, 2020)。

表 4 LN 剖面粒度、磁化率、Rb/Sr 值的垂直变化

Table 4 Vertical changes of grain-size, magnetic susceptibility and Rb/Sr at LN profile

地层	粘粒<5 μm/%	细粉砂5~10 μm/%	粗粉砂10~50 μm/%	砂粒>50 μm/%	磁化率/(10 ⁻⁸ m ³ ·kg ⁻¹)	Rb/Sr值
L1	36.30	19.29	43.46	0.94	24.83	1.01
S1	36.18	17.72	45.27	0.83	25.19	0.88
L2	37.39	18.74	43.65	0.23	24.52	0.87
S2	42.35	19.83	37.63	0.19	15.72	0.97
L3	40.13	19.60	40.04	0.23	10.93	0.89
S3	40.19	19.37	40.13	0.32	16.02	0.92
L4	38.16	19.28	42.14	0.42	15.87	0.88
S4	38.77	19.17	41.82	0.38	19.23	0.91
L5	37.90	20.51	41.54	0.19	12.07	0.91
S5	38.17	15.28	44.62	1.93	15.36	0.92
L6	33.66	16.67	47.51	2.17	14.1	0.82
S6	33.36	16.60	48.54	1.50	13.61	0.85
L7	30.02	19.35	49.22	1.42	13.22	0.84
黄土层	36.22±3.4a	19.06±1.2a	43.94±3.3a	0.80±0.8a	16.51±5.8a	0.89±0.1a
古土壤层	38.17±3.1a	18.00±1.8a	43.00±3.9a	0.86±0.7a	17.52±4.2a	0.91±0.1a

注: 同一列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上有显著差异

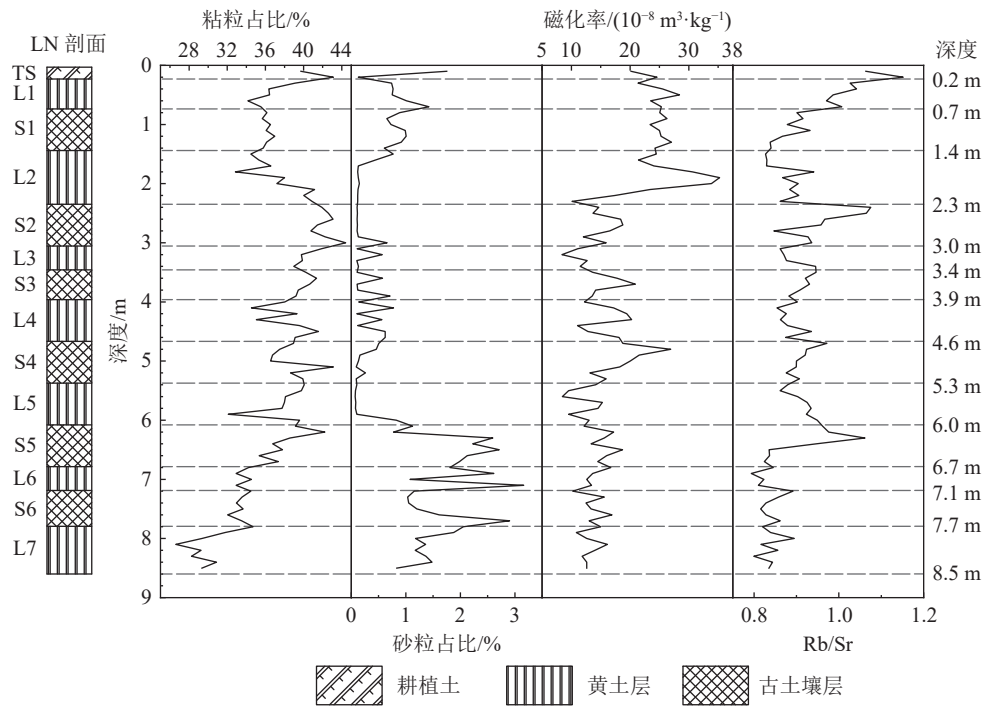


图 3 LN 剖面粒度、磁化率及 Rb/Sr 值分布曲线

Fig. 3 The distribution curves of grain-size, magnetic susceptibility and Rb/Sr at LN profile

LN 剖面中 Rb/Sr 值的平均值为 0.90, 其中黄土层 Rb/Sr 值的平均值为 0.89, 变化范围为 0.79~1.04, 而古土壤层 Rb/Sr 值的平均值为 0.91, 变化范围为 0.78~1.08。总体表现为古土壤层 Rb/Sr 值总是

大于下伏黄土层, 但两者差异并不显著(表 4)。Rb/Sr 值沿剖面自下而上呈现先增大后减小的变化趋势, 具体为 S5~L7 表现为较低值, S2~L5 表现为高值, S1~L2 表现为较低值。其中, L1 为异常高值, 这可能

由于其距地表较近,受到了植被发育的影响(表 3)。

2.5 各指标的相关性分析

表 5 为不同指标之间的相关性分析。结果表明,不同色度参数之间存在一定相关性。其中, a^* 与 L^* 呈极显著负相关($r=-0.59$),当 a^* 增大时, L^* 会相应地减小; L^* 和 b^* 呈明显正相关关系,相关系数 $r=0.3$,表明 b^* 的变化对 L^* 的影响较弱, a^* 可能是影响 L^* 的主要因素。此外, L^* 与 h^* 呈显著正相关,与 a^*/b^* 呈显著负相关,相关系数分别为 $r=0.71$, -0.71 ,而 a^* 与 h^* 和 a^*/b^* 的关系同样显著,相关系数分别为 -0.91 和 0.91 。色度与其他指标的相关性分析结果表明,磁化率与 L^* 无明显相关性,与 a^* 有一定的正相关性,但相关性不明显,相关系数仅为 0.17 。Rb/Sr 值与 a^* 有较强的相关性, $r=0.43$,表明二者可能指示相同的变化;与 L^* 相关性较弱,表明两者可能受控于不同的影响因素;而色度指标与磁化率的相关性都不显著。Rb/Sr 值与粘粒含量成明显的正相关,相关系数为 0.51 ,表明两者可能具有相同的指示作用。

3 讨 论

3.1 色度参数的古环境意义

土壤沉积过程中,不同的气候条件和沉积环境都会对色度指标产生影响。 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度)的变化特征与土壤中矿物成分、沉积环境的冷暖、干湿变化及冬夏季风的强弱变化密切相关(杜兰等,2021)。

L^* 指土壤的明暗程度。已有研究表明, L^* 主要受土壤的有机质含量、湿度、粗糙度、碳酸盐含量等多

种因素影响(杨胜利等,2001;刘峰等,2015)。本次研究在采样过程中即对 LN 剖面做了通体碳酸盐试验(试剂为 10% 的稀盐酸),发现各黄土层和古土壤层产生气泡的强度基本相同,因而推测碳酸盐含量不是影响土壤 L^* 的主要因素。此外,在测试前已对样品进行了烘干与研磨处理,尽可能减小了湿度及粗糙度对 L^* 的影响。有学者(陈一萌等,2006;刘峰等,2015)研究表明,有机质含量是导致土壤变暗的主要原因。值得注意的是,古土壤一般被认为形成于降雨量多、气候温暖的时期(任少芳,2010;冯力威等,2015)。充沛的降雨和温暖的气候使地表植被较发育,土壤有机质含量升高,因而 L^* 可以用来推断区域降雨量和地表植被的发育情况(王海燕等,2017)。由图 2 可知,洛南盆地黄土剖面中 L^* 值变化波动较大,且在各个地层中存在明显差异,整体上表现为黄土层(L1~L7)中 L^* 值高于古土壤层(S1~S6),它的高值反映了相对寒冷干燥的气候条件。另外,对比 LN 剖面与黄土高原其他地区(石培宏等,2012;沈曼丽等,2021;杨宇哲等,2023),其 L^* 值较低,表明该区域整体更湿润,夏季风作用强烈。

a^* 指土壤颜色的红绿程度,前人研究表明,影响 a^* 变化的主要因素是土壤中氧化物的含量,主要包括赤铁矿、磁铁矿、针铁矿等,其含量越高,土壤颜色越深, a^* 值越大(刘峰等,2015)。在本次研究中, LN 剖面古土壤层(S1~S6) a^* 呈现高值(9.94),黄土层(L1~L7)中呈现相对低值(9.35),说明 LN 剖面古土壤层形成时期,气候更加暖湿,使风化成壤作用强烈,大量易分解、易溶的矿物及组分发生淋失,使难

表 5 各指标的相关性分析结果
Table 5 Correlation analysis results of the indexes

指标	L^*	a^*	b^*	a^*/b^*	h^*	粘粒	砂粒	磁化率	Rb/Sr
L^*	1								
a^*	-0.59***	1							
b^*	0.3**	0.18	1						
a^*/b^*	-0.71***	0.91***	-0.25	1					
h^*	0.71***	-0.91***	0.25	-0.99***	1				
粘粒	0.23***	0.20***	0.15	0.13	-0.13	1			
砂粒	-0.36	0.17***	0.20	0.25	-0.25	-0.5	1		
磁化率	-0.01	0.17***	-0.2	0.25	-0.25	0.01	-0.14	1	
Rb/Sr	0.17***	0.43	0.17***	0.36***	-0.36	0.51	-0.25	0.20	1

注: **表示相关性在0.01水平(双侧)上显著相关; ***表示相关性在0.001水平(双侧)上显著相关

以迁移的铁氧化物富集在土壤表面,使土壤颜色加深, a^* 值升高;而在黄土层沉积过程中,气候相对干冷,不利于矿物的分解,铁氧化物较分散, a^* 较低 (Sun et al., 2011; 高鹏坤等, 2015)。综上,该区域中 a^* 的高值,指示了温暖湿润的气候,风化成壤作用愈强烈; a^* 的低值,则指示相对干冷的气候,成壤作用稍弱。 b^* 主要反映土壤颜色的黄蓝程度。有研究表明, b^* 会随气温升高和降水增加而增大,其高值指示温暖湿润的气候条件 (Tang et al., 2023)。但本次研究中,洛南黄土剖面上 b^* 值未呈现出明显的规律性,表明其对气候变化的响应较差,其具体原因有待进一步探究。

本次研究发现, h^* (色调角) 与 L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 对应关系良好,具有一定的相关性,其相关系数分别为 0.71、-0.91、-0.99。由图 2 可知,在剖面上 h^* 与 L^* 的变化趋势相同,与 a^* 、 a^*/b^* 变化趋势相反。此外, a^*/b^* 越大,说明其红度值与黄度值差异越大且红度值占主导,即 a^*/b^* 越大,则土壤颜色越红, a^*/b^* 越小,则土壤颜色越黄;由 h^* 定义可知, h^* 对应的值越大,即角度越大,土壤颜色越黄;角度越小,土壤颜色越红 (杜兰等, 2021; 杨宇哲等, 2023)。本次研究中 LN 剖面 S1~S6(67.6) 的色调角值明显低于 L1~L7 (68.5),这是由于温暖湿润的气候条件使铁氧化物在古土壤层表面聚集,加之风化成壤程度较高,导致其颜色明显较黄土层更红,这符合野外编录的结果,同时与前人研究结果一致 (王海燕等, 2017)。综合分析表明, h^* 的低值和 a^*/b^* 的高值均反映了较温暖湿润的气候条件,两者可以辅助 L^* 、 a^* 和 b^* 指示气候的冷暖干湿变化。

3.2 LN 剖面黄土的风化成壤特性

粒度、磁化率、Rb/Sr 值等气候替代性指标在黄土-古土壤剖面中的变化与其风化成壤特性密切相关,进而可以反映古气候的变化 (赵艳雷等, 2014; 张文桐等, 2017)。黄土的粒度特征可以指示冬季风的强弱变化,其中细粒组分的含量与粉尘堆积后的成壤强度关系密切 (鹿化煜等, 1997; 王晶, 2019)。而磁化率的大小主要受土壤中铁磁性矿物的含量、种类及其粒径大小的影响,可以反映气候的干湿变化 (王喜生等, 2006; 曾永耀等, 2020)。Rb/Sr 值是风成黄土中表征土壤化学风化程度的重要指标,记录了成壤过程中土壤受淋滤情况及环境降水量的差异 (贾耀锋等, 2010; 杨丹, 2017)。

通过对比表 6 发现,洛南黄土中细粒组分含量

明显高于其他区域黄土 (曹宏伟, 2019),说明该区域黄土在成壤过程中可能发生了强烈的物理、化学等风化作用,使土壤中的粗颗粒大量分解成细粒物质,整体成壤作用强烈,受冬季风影响较弱。而整体上 S1~S6(古土壤层) 的粘粒含量较 L1~L7(黄土层) 更高,表明成壤作用更强烈,沉积环境也更湿热。研究中还发现,粘粒含量和 Rb/Sr 值沿剖面自下而上均呈现先增大后减小的变化趋势,说明 S5~L7 时期成壤作用较强烈,而 S2~L5 时期成壤作用加剧,且在 S2 达到峰值, L1~L2 沉积过程风化成壤有所减弱。此外,由表 3 可知,磁化率与 L^* 、 a^* 、 b^* 的相关系数分别为 -0.01、0.17、-0.2,可以看出磁化率与各色度指标的相关程度较低。已有研究表明 (王勇等, 2008; 刘大齐等, 2018; 马永法等, 2021),磁化率可以作为有效的气候替代指标反演古气候的前提是其磁化率曲线的波峰、波谷与黄土-古土壤地层具有良好的对应关系,进而反映气候的干湿变化情况,但结合文中图 2、图 3 分析可知,磁化率比色度指标与各地层的对应关系明显较差,因此在本区域通过色度指标进行古气候的反演更有效。这种情况产生的主要原因可能是由于洛南盆地整体上都处于相对湿润的演替过程中,磁赤铁矿等磁性矿物被大量分解,使各地层单元的磁学性质发生改变,导致磁化率的指示作用减弱,这与前人的研究结果一致 (赵军等, 2008; 刘峰等, 2015)。综上所述,洛南黄土整体成壤作用强烈,不同于黄土高原地区干冷—暖湿交替的气候变化,而是整体较湿润,呈现冷暖震荡的气候变化。且古土壤较黄土成壤强度更高,气候更湿热。

3.3 色度参数及其他气候替代性指标反应的气候变化情况

LN 剖面中色度参数作为良好的气候替代指标,与粒度、Rb/Sr 值等其他气候替代指标在黄土-古土

表 6 洛南黄土与其他典型黄土粒度组成对比

Table 6 Comparison of grain size compositions between Luonan Loess and other typical loess

地区	粘粒 ϕ ($<5\ \mu\text{m}$)	细粉砂 ($5\sim10\ \mu\text{m}$)	粗粉砂 ($10\sim50\ \mu\text{m}$)	砂粒 ϕ ($>50\ \mu\text{m}$)
洛川	27.4	12.5	53.3	6.8
豫南	15.8	15.04	57.97	11.19
镇江下蜀	19.13	14.82	55.97	10.07
洛南	37.15	18.62	43.45	0.78

壤序列中的变化特征共同记录了中更新世中期—末期(550~95 ka)的气候变化特征。总体看,黄土层(L1~L7)中表现为高的 L^* 、 h^* 值和低的 a^* 、 a^*/b^* 值,表明在黄土层形成时期气候相对干燥,降水有所减少,植被减少,土壤有机质含量降低,同时也对应粘粒含量及 Rb/Sr 值呈现低值,表明此时期成壤作用较弱。而古土壤层(S1~S6)相较黄土层(L1~L7) L^* 、 h^* 值降低,表明在该时期降水增加,植被茂盛,有机质增多,处于更暖湿的气候条件,此外,粘粒含量及 Rb/Sr 值在该时期均有升高,表明在该时期风化成壤作用更强烈,有部分粗颗粒被分解为细颗粒或粘粒。值得注意的是,洛南黄土自 L7 黄土层(约 550 ka)开始沉积,至 S5 沉积时期,其粘粒含量及 Rb/Sr 值均较小,表明风化成壤作用稍弱,气候处于寒冷湿润状态;而在距今约 410 ka, LN 剖面进入 L5 黄土沉积时期,粘粒含量及 Rb/Sr 值呈现明显的增大趋势,在 S2 沉积时期(约 170 ka 前)达到明显峰值,说明其成壤作用增强,气候由寒冷湿润转变为温暖湿润,此过程中冬季风相应减弱。L1~L2 形成时期(170~95.5 ka),剖面中粘粒含量及 Rb/Sr 值减小,砂粒含量增加,成壤作用相应减弱,指示气候也由温暖湿润再次转为寒冷湿润,冬季风影响增强。

综上所述,将洛南盆地中更新世中期—末期(550~95 ka)的气候变化情况与 LN 剖面的黄土-古土壤序列相对应,主要表现为:黄土层堆积时期,区内植被发育一般,降水较丰富,土壤中溶滤作用较强烈,对应的气候条件为寒冷湿润;古土壤层堆积时期,区内植被发育良好,降水丰富,土壤中溶滤作用强烈,蒸发量较高,对应的气候条件为温暖潮湿,总体呈现寒冷湿润—温暖潮湿的多个小的气候旋回。整体上,洛南盆地中更新世中期—末期呈现冷湿(S5~L7)-暖湿(S2~L5)—冷湿(L1~L2)的交替变化。

4 结 论

通过对 LN 剖面不同深度色度参数、粒度、磁化率及 Rb/Sr 值综合分析,揭示了陕西洛南盆地中更新世中期—末期(550~95 ka)的古环境古气候特征,得到以下结论。

(1)相较其他气候指代指标, L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 和 h^* 值沿剖面变化与黄土—古土壤各地层对应良好,对该地区气候变化响应也更敏感。色度指标沿剖面上不

同地层单元呈有规律的变化, L^* 与 h^* 在黄土层中表现为高值,在古土壤层中表现为低值,其高值指示了相对干冷的气候条件;而 a^* 、 a^*/b^* 的变化规律与 L^* 、 h^* 相反,表现为在古土壤层中高值,黄土层中低值,其高值指示了温暖湿润的气候条件。

(2)洛南黄土在堆积成壤过程中整体成壤作用强烈,其沉积环境发生了多次寒冷湿润—温暖潮湿小的气候旋回,与黄土-古土壤序列对应,表现为:黄土层堆积时期降水较丰富,土壤中溶滤作用强烈,气候条件为寒冷湿润;古土壤层堆积时期,区内降水丰富,蒸发量较高,对应的气候条件为温暖潮湿,成壤作用更强烈。洛南盆地中更新世中期—末期(550~95 ka)整体经历了冷湿(S5~L7)—暖湿(S2~L5)—冷湿(L1~L2)的气候变化。

References

- Cao H W. 2019. Physicochemical Characteristics of the Loess in Southern Henan Province and Its Paleoenvironmental Significance [D]. Master Thesis of East China Normal University(in Chinese with English abstract).
- Chen Y M, Chen X S, Gong H L, et al. 2006. Soil Color: A Reliable Proxy Indicator of Climate Change[J]. *Arid Land Geography*, (3): 309–313(in Chinese with English abstract).
- Du L, Li Z W, Du D D, et al. 2021. Chromaticity Characteristics of the Sediments from the Zhifu Loess Profile in Yantai During the Last Interglacial Period and Their Paleoenvironmental Significance[J]. *Tropical Geography*, 41(2): 423–430(in Chinese with English abstract).
- Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 364(6434): 218–220.
- Feng L W, Wu K N, Zha L S, et al. 2015. Chromaticity Characteristics of Paleosols in Yangshao Cultural Site Area and Their Climatic Significance[J]. *Ecological Environment Sciences*, 24(5): 892–897(in Chinese with English abstract).
- Fujinaga N. 2003. Reconstruction of Quaternary Paleovegetation and Paleoclimate Based on the Pollen Data from the Deep Wells in Lake Biwa, Central Japan, and Comparison with the Global Paleoclimate[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, (1): 138–147.
- Gao P K, Pang J L, Huang C Z, et al. 2015. Characteristics of Chromaticity Parameters of the Loess-Paleosol Profile in Chafang Village, Danfeng, Southern Shaanxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 537–542(in Chinese with English abstract).
- Grimm E. 1987. CONISS: A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares[J]. *Computers & Geosciences*, 13: 13–35.
- Hu M J, Li N N, Zhang Y Y, et al. 2020. Characteristics of Chromaticity

- Parameter Changes and Environmental Evolution of the Ancient Aeolian Sand-Paleosol Sequence in Qinghai Lake since the Last 32 ka[J]. *Quaternary Sciences*, 40(5): 1105–1117(in Chinese with English abstract).
- Hu M J, Ji T Q, Zheng D Y, et al. 2022. Characteristics of Chromaticity Parameter Changes of Aeolian Sediments in the Northeastern Tibetan Plateau since 9.4 ka and Its Environmental Evolution[J]. *Geoscience*, 36(2): 439–448(in Chinese with English abstract).
- Jia Y F, Mao L J. 2010. New Progress in Geochemical Research of Rb and Sr in Loess[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 41(6): 1501–1504(in Chinese with English abstract).
- Li X Y, Li Z W, Zhu Z J, et al. 2023. Chromaticity Characteristics of the Last Glacial Sediments in the Houtian Section of Nanchang City and Their Paleo-environmental Significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 43(1): 170–179(in Chinese with English abstract).
- Liu D S. 1985. *Loess and Environment* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Liu F, Wang H, Qin Y F, et al. 2015. Chromaticity Characteristics and Significance of Xiashu Loess in Zhoujiashan, Nanjing[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(5): 143–151(in Chinese with English abstract).
- Liu D Q, Li Y H, Wei D L. 2018. Characteristics of Magnetic Susceptibility of Loess Profiles in Changxingdao Area of Dalian City and Its Paleoclimatic Significance[J]. *Territory & Natural Resources Study*, (3): 51–53(in Chinese with English abstract).
- Liu B H, Wu F, Zhang X J, et al. 2024. Elemental Geochemical Characteristics of the Late Pleistocene Sediments in the Hongsibu Basin on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau and Their Environmental Indications[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(1): 33–45(in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, An Z S. 1997. The Paleoclimatic Significance of the Grain-Size Composition of the Luochuan Loess[J]. *Chinese Science Bulletin*, (1): 66–69(in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, Zhang H Y, Wang S J, et al. 2007. Preliminary Study on the Age of the Loess Strata in the Upper Reaches of the Nanluo River in the Eastern Qinling Mountains and Its Significance in Paleolithic Archaeology[J]. *Quaternary Sciences*, (4): 559–567(in Chinese with English abstract).
- Lu H Y, Zhang H Y, Sun X F, et al. 2012. Geomorphology, Loess Deposition and Pleistocene Paleo-human Living Environment in the South Luohe River Basin, Central China[J]. *Quaternary Sciences*, 32(2): 167–177(in Chinese with English abstract).
- Ma Y F, Zhan T, Yang Y, et al. 2021. Characteristics of Chromaticity Changes in the Tianhengshan Borehole in the Eastern Northeast Plain: Paleoclimatic Significance and Implications for the Evolution of the Songnen Paleolake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3519–3531(in Chinese with English abstract).
- Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 399(6735): 429–436.
- Ren S F. 2010. Research on the Chromaticity Characteristics and Environmental Information of Xiashu Loess Strata [D]. Master Thesis of East China Normal University(in Chinese with English abstract).
- Shen M L, Zhang J, Hui Z C. 2021. Quaternary Climate Evolution Recorded by Chromaticity Index of Xijin Loess in Lanzhou[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(3): 809–817(in Chinese with English abstract).
- Shi P H, Yang T B, Tian Q C, et al. 2012. Analysis of Chromaticity Change Characteristics of Jingyuan Loess-Paleosol and Its Paleoclimatic Significance[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*: 48(2): 15–23(in Chinese with English abstract).
- Sun J Z. 2005. *Loess Science*[M]. Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society(in Chinese).
- Sun Y, He L, Liang L, et al. 2011. Changing color of Chinese loess: Geochemical constraint and paleoclimatic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6): 1131–1138.
- Tang J, Lü B, Liu X, et al. 2023. Chromaticity characteristics of soil profiles in the coastal areas of Fujian and Guangdong, southern China and their climatic significance[J]. *Quaternary International*, 649: 38–45.
- Wang S M, Li J R. 1993. Late Cenozoic Lake Deposits in China and the Environmental Overview They Reflect[J]. *Journal of Lake Sciences*, (1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Wang X S, Yang Z Y, Reidar L, et al. 2006. Environmental Magnetic Results of the Loess-Paleosol Sequence on the Southeast Margin of the Loess Plateau and Their Paleoclimatic Significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, (13): 1575–1582(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Pan B T, Guan Q Y, et al. 2008. Characteristics of Magnetic Susceptibility Changes in Loess-Paleosol in the Arid Region of Northwest China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (1): 111–114(in Chinese with English abstract).
- Wang H Y, Pang J L, Huang C Z, et al. 2017. Characteristics of Chromaticity Parameters of the Tujiwan Loess Profile in Yunxi County and Its Paleoclimatic Reconstruction[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(2): 151–156(in Chinese with English abstract).
- Wang J. 2019. Study on the Characteristics of Loess Grain-Size Changes and Paleo-environmental Evolution of the Kaole Profile in Linxia [D]. Master Thesis of Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- Wu C Y. 1999. *Annals of Luonan County* [M]. Beijing: Writer's Publishing House(in Chinese).
- Wu S H, Pang J L, Cheng H Q, et al. 2015. Weathering Process and Paleoflood Event Records of the Holocene Loess-Paleosol Sequence in Liaowadian, Hanjiang River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(5): 846–852(in Chinese with English abstract).
- Wu X L, Li R X, Li X G, et al. 2023. Late Paleogene Climate Change and Its Driving Mechanism in the Ningnan Basin on the Northeast Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1):

- 206–218(in Chinese with English abstract).
- Yang J M, Zhou Y L, Pang J L, et al. 2020. Characteristics of Aeolian Loess Soil-Formation and Climate Change on the Second-Order Terrace of the Yanjiapeng Section in the Upper Reaches of the Hanjiang River[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 52(5): 64–69(in Chinese with English abstract).
- Yang S L. 2001. The Climatic Significance of Soil Color[D]. Master Thesis of Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- Yang S L, Fang X M, Li J J, et al. 2001. Study on the Qualitative to Semi-Quantitative Relationship between Surface Soil Color and Climate[J]. *Science in China (Series D)*: (S1): 175–181(in Chinese with English abstract).
- Yang D. 2017. Study on the Stratigraphic Sequence and Weathering and Soil-Formation Characteristics of Aeolian Loess on the First-Order Terrace of the Hanzhong Basin[D]. Master Thesis of Shaanxi Normal University(in Chinese with English abstract).
- Yang Y Z, Yue D P, Zhao J B, et al. 2023. Chromaticity Characteristics and Paleoclimatic Significance of L3 and S3 Loess-Paleosol on the Southeast Margin of the Mu Us Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 43(1): 176–186(in Chinese with English abstract).
- Yu S J, Li W. 2020. Characteristics of Sedimentary Filling in the Luonan and Shanyang Basins and Their Constraints on the Meso-Cenozoic Intra-continental Evolution of the Eastern Qinling Mountains[J]. *Geoscience*, 34(4): 687–699(in Chinese with English abstract).
- Zeng Y Y, Zhao B. 2020. Enlightenment of the Paleoclimatic Significance of Loess Magnetic Susceptibility to the Study of the Paleoclimatic Significance of Red Soil Magnetic Susceptibility[J]. *Progress in Geophysics*, 35(5): 1717–1723(in Chinese with English abstract).
- Zhang P, Liu W G, Lu H Y, et al. 2009. Organic Carbon Isotope Composition of Luonan Loess and Its Comparison with Luochuan and Xifeng Loess[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 9(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Song C Z, Zhang Y. 2011. Rb, Sr and Magnetic Susceptibility of Loess-Paleosol on the North Piedmont of the Dabie Mountains and Their Paleo-environmental Significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 45–51(in Chinese with English abstract).
- Zhang W C. 2013. Environmental Evolution Revealed by Pollen Analysis of Surface Soil and Loess Strata in the Nanluo River Basin of the Eastern Qinling Mountains[D]. Master Thesis of Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Zhang W C. 2017. Pollen-Revealed Pleistocene Environmental Changes in the Qinling Region and Their Impacts on Paleo-human Activities[D]. Doctoral Dissertation of Nanjing University(in Chinese with English abstract).
- Zhang W T, Pang J L, Zhou Yali, et al. 2017. Characteristics of Weathering and Soil-Formation of the Mitosi Profile in the Upper Reaches of the Hanjiang River and Its Response to Climate Change[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 56(6): 31–37(in Chinese with English abstract).
- Zhao J, Lu H Y, Wang X Y, et al. 2008. Rock Magnetic Characteristics of Loess Deposits in the Eastern Qinling Mountains and Exploration of the Magnetic Susceptibility Enhancement Mechanism[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(6): 1052–1062(in Chinese with English abstract).
- Zhao C P, Pang J L, Huang C Z, et al. 2012. Characteristics and Significance of the Holocene Loess-Paleosol Sequence in Nansi Village, Xianyang [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*: 40(2): 93–97(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y L, Pang J L, Huang C Z, et al. 2014. Study on the Weathering and Soil-Formation and Paleoclimate of the Loess-Paleosol Sequence in the Qianfangcun Profile, Yunxian County[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 840–845(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹宏伟. 2019. 豫南黄土理化特性及其古环境意义[D]. 华东师范大学硕士学位论文.
- 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 2006. 土壤颜色——一个可靠的气候变化代用指标[J]. *干旱区地理*, (3): 309–313.
- 杜兰, 李志文, 杜丁丁, 等. 2021. 烟台芝罘黄土剖面末次冰期沉积物色度特征及其古环境意义[J]. *热带地理*, 41(2): 423–430.
- 冯力威, 吴克宁, 查理思, 等. 2015. 仰韶文化遗址区古土壤色度特征及其气候意义[J]. *生态环境学报*, 24(5): 892–897.
- 高鹏坤, 庞奖励, 黄春长, 等. 2015. 陕南丹凤茶房村黄土-古土壤剖面色度参数特征[J]. *沉积学报*, 33(3): 537–542.
- 胡梦珺, 李娜娜, 张亚云, 等. 2020. 近 32 ka 以来青海湖古风成砂-古土壤序列色度参数变化特征及环境演变[J]. *第四纪研究*, 40(5): 1105–1117.
- 胡梦珺, 吉天琪, 郑登友, 等. 2022. 9.4 ka 以来青藏高原东北部风成沉积物色度参数变化特征及其环境演变[J]. *现代地质*, 36(2): 439–448.
- 贾耀锋, 毛龙江. 2010. 黄土 Rb、Sr 地球化学研究新进展[J]. *土壤通报*, 41(6): 1501–1504.
- 李星耀, 李志文, 朱志军, 等. 2023. 南昌市厚田剖面末次冰期沉积的色度特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 43(1): 170–179.
- 刘东生. 1985. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘峰, 王昊, 秦艺帆, 等. 2015. 南京周家山下蜀黄土色度特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 35(5): 143–151.
- 刘大齐, 李永化, 魏东岚. 2018. 大连市长兴岛地区黄土剖面磁化率特征及古气候意义[J]. *国土与自然资源研究*, (3): 51–53.
- 刘博华, 吴芳, 张绪教, 等. 2024. 青藏高原东北缘红寺堡盆地晚更新世沉积物元素地球化学特征及其环境指示意义[J]. *地质通报*, 43(1): 33–45.
- 鹿化煜, 安芷生. 1997. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, (1): 66–69.
- 鹿化煜, 张红艳, 王社江, 等. 2007. 东秦岭南洛河上游黄土地层年代的

- 初步研究及其在旧石器考古中的意义[J]. 第四纪研究, (4): 559–567.
- 鹿化煜, 张红艳, 孙雪峰, 等. 2012. 中国中部南洛河流域地貌、黄土堆积与更新世古人类生存环境[J]. 第四纪研究, 32(2): 167–177.
- 马永法, 詹涛, 杨业, 等. 2021. 东北平原东部天恒山钻孔色度变化特征与古气候意义及对松嫩古湖演化的指示[J]. 地质学报, 95(11): 3519–3531.
- 任少芳. 2010. 下蜀黄土地层的色度特征及环境信息研究[D]. 华东师范大学硕士学位论文.
- 沈曼丽, 张军, 惠争闯. 2021. 兰州西津黄土色度指标记录的第四纪气候演化[J]. 冰川冻土, 43(3): 809–817.
- 石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 2012. 靖远黄土-古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版): 48(2): 15–23.
- 孙建中. 2005. 黄土学[M]. 香港: 香港考古学会.
- 王苏民, 李建仁. 1993. 中国晚新生代湖泊沉积及其反映的环境概貌[J]. 湖泊科学, (1): 1–8.
- 王喜生, 杨振宇, Reidar Løvlie, 等. 2006. 黄土高原东南缘黄土-古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义[J]. 科学通报, (13): 1575–1582.
- 王勇, 潘保田, 管清玉, 等. 2008. 西北干旱区黄土-古土壤磁化率变化特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, (1): 111–114.
- 王海燕, 庞奖励, 黄春长, 等. 2017. 郿西县庾家湾黄土剖面色度参数特征及其古气候重建[J]. 水土保持学报, 31(2): 151–156.
- 王晶. 2019. 临夏考察剖面黄土粒度变化特征及古环境演变研究[D]. 兰州大学硕士学位论文.
- 吴承英. 1999. 洛南县志[M]. 北京: 作家出版社.
- 吴帅虎, 庞奖励, 程和琴, 等. 2015. 汉江辽瓦店全新世黄土-古土壤序列风化过程及古洪水事件记录[J]. 长江流域资源与环境, 24(5): 846–852.
- 吴小力, 李荣西, 李小刚, 等. 2023. 青藏高原东北缘宁南盆地晚古近纪气候变化及其驱动机制[J]. 沉积学报, 41(1): 206–218.
- 羊俊敏, 周亚利, 庞奖励, 等. 2020. 汉江上游晏家棚段二级阶地风成黄土成壤特征及气候变化[J]. 山东农业科学, 52(5): 64–69.
- 杨胜利. 2001. 土壤颜色的气候意义[D]. 兰州大学硕士学位论文.
- 杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 2001. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. 中国科学(D辑), (S1): 175–181.
- 杨丹. 2017. 汉中盆地一级阶地上风成黄土地层序列及风化成壤特征研究[D]. 陕西师范大学硕士学位论文.
- 杨宇哲, 岳大鹏, 赵景波, 等. 2023. 毛乌素沙地东南缘 L3、S3 黄土-古土壤色度特征及古气候意义[J]. 中国沙漠, 43(1): 176–186.
- 余尚江, 李玮. 2020. 洛南、山阳盆地沉积充填特征及其对东秦岭中—新生代陆内演化的约束[J]. 现代地质, 34(4): 687–699.
- 曾永耀, 赵博. 2020. 黄土磁化率的古气候意义对研究红土磁化率古气候意义的启示[J]. 地球物理学进展, 35(5): 1717–1723.
- 张普, 刘卫国, 鹿化煜, 等. 2009. 洛南黄土有机碳同位素组成及其与洛川、西峰黄土对比[J]. 第四纪研究, (1): 9.
- 张华, 宋传中, 张妍. 2011. 大别山北麓黄土-古土壤 Rb、Sr 与磁化率及其古环境意义[J]. 地质科技情报, 30(2): 45–51.
- 张文超. 2013. 东秦岭南洛河流域表土及黄土地层孢粉分析揭示的环境演变[D]. 南京大学硕士学位论文.
- 张文超. 2017. 孢粉揭示的秦岭地区更新世环境变化及其对古人类活动的影响[D]. 南京大学博士学位论文.
- 张文桐, 庞奖励, 周亚利, 等. 2017. 汉江上游弥陀寺剖面风化成壤特征及其对气候变化的响应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 56(6): 31–37.
- 赵军, 鹿化煜, 王晓勇, 等. 2008. 东秦岭地区黄土堆积的岩石磁学特征及磁化率增强机制探索[J]. 沉积学报, 26(6): 1052–1062.
- 赵彩萍, 庞奖励, 黄春长, 等. 2012. 咸阳南寺村全新世黄土-古土壤序列特征及其意义[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 40(2): 93–97.
- 赵艳雷, 庞奖励, 黄春长, 等. 2014. 郿县前坊村剖面黄土-古土壤序列风化成壤及古气候研究[J]. 沉积学报, 32(5): 840–845.