

汉中盆地军王村黄土-古土壤剖面的 色度特征及机理*

杨丹, 庞奖励, 周亚利, 黄春长, 查小春, 张旭, 张文桐
(陕西师范大学旅游与环境学院//地理学国家级教学示范中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 对汉中盆地城固县军王村(JWC)剖面的色度参数进行分析,并结合磁化率、烧失量、氧化铁进行主控因素的研究。结果表明:亮度(L^*)含量的变化与有机质含量密切相关,红度(a^*)的变化与氧化铁含量密不可分;色度参数曲线与磁化率曲线具有同步的变化趋势,其中 L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 对气候响应敏感,能作为较好的气候替代指标,记录了该区的气候和成壤环境变化;各色度参数的变化趋势反映了晚更新世末期气候冷干→全新世初期气候开始转向暖湿→全新世中期气候湿热→全新世晚期气候暖湿降低,但晚更新世末期的气候并不是持续稳定的,在38.8~25.6 ka BP期间出现了短暂的相对温暖湿润的阶段。

关键词: 色度;黄土-古土壤;气候变化;汉中盆地

中图分类号: P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)01-0093-09

Chroma characteristics and its significance of the Junwangcun loess-paleosol profile in the Hanzhong basin

YANG Dan, PANG Jiangli, ZHOU Yali, HUANG Chunchang, ZHA Xiaochun, ZHANG Xu, ZHANG Wentong
(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University//National Demonstration Center for
Experimental Geography Education, Xi'an 710119, China)

Abstract: The chroma and its major controlling factors of the Junwangcun loess-paleosol profile in the Hanzhong basin have been studied. The results show that the lightness is strongly linked to the organic matter. By contrast, the redness is strongly linked to the types and concentrations of iron oxides. The curves of chroma present a similar pattern to the curves of magnetic susceptibility. L^* , a^* , a^*/b^* are sensitive to climate response, which can be used as a good alternative climate index to record the changes in climate and pedogenic environment. The change of chroma indicates a cold and dry climate during the late Pleistocene (55.5~11.5 ka BP), a climate shift from cold-dry to warm-humid during the early Holocene (between 11.5~8.5 ka BP), a warm and humid climate during the mid-Holocene (between 8.5~3.0 ka BP), and a cooler and drier climate during the late Holocene (since 3.0 ka BP). The climate is not persistently steady during the late Pleistocene, with a short-term warm and wet climate in the glacial period (38.8~25.6 ka BP).

Key words: chroma; loess-paleosol; climate change; Hanzhong basin

* 收稿日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(41271108; 41371029; 41471071); 国家社会科学基金(14BZS070)

作者简介: 杨丹(1991年生),女;研究方向:资源开发与环境演变;E-mail: 872414693@qq.com

通信作者: 庞奖励(1963年生),男;研究方向:资源开发与环境演变;E-mail: jlpang@snnu.edu.cn

沉积物颜色是沉积物的直观特征之一^[1], 由于其颜色是沉积物的成分和结构的外在表现, 而自然风化成壤作用往往会引起沉积物物质成分的变化, 因此, 沉积物颜色的变化可作为沉积环境变化的重要标志, 也能很好地反映古气候变化的信息^[2-4]。一些学者对沉积物颜色体系进行了研究, 由最初探讨致色矿物与土壤颜色的关系到逐渐被应用于古气候研究方面^[5-15]。例如, 安芷生等^[5]以我国黄土高原典型黄土-古土壤为研究对象, 认为亮黄色的黄土层与暗红色的古土壤层交替出现反映了冬、夏季风的演变历史; 季峻峰等^[6]从光谱学方面对黄土剖面中赤铁矿和针铁矿进行定量和半定量研究, 从而将颜色变化与气候演变紧密的联系起来; 陈一萌等^[7]对黄土高原临夏塬堡剖面进行研究, 表明土壤颜色指标作为气候变化的代用指标在百年甚至万年时间尺度上均是可行的, 且在末次冰期对气候响应最明显, 等等。但是, 目前利用色度来解释气候变化的研究仍然有限, 有待进一步深入研究, 且鲜见利用饱和度 (c^*) 和 a^*/b^* 两个色度参数的研究。秦岭南麓的汉中盆地分布有较大面积的黄土, 一些学者^[16-18]对其从地质学角度进行了较多研究, 对黄土的理化性质、地层学研究较少, 而关于色度变化的研究尚属空白。本文通过对汉中盆地军王村黄土-古土壤色度的研究, 试图探讨土

壤色度指标在晚更新世以来对气候变化的响应程度, 并期望土壤颜色指标在东亚季风演变等全球变化及第四纪区域研究中发挥更大的作用。

1 区域概况

汉中盆地位于秦岭山脉南侧, 陕西省南部, 属北亚热带湿润季风气候, 气候温和湿润, 雨量充足, 多年平均降水 800~900 mm, 降雨集中在 5~9 月。光热充足, 平均日照时数 2 000 h, 无霜期 240~250 d, 年均气温 14.5 °C。区内生态环境较好, 森林植被覆盖率达 56%。汉中盆地东西狭长, 呈椭圆形, 东西长约 116 km, 南北宽约 5~30 km, 汉江自东向西流经盆地内部, 在汉江两侧发育有 1~4 级河流阶地, 阶地面 (特别是低级阶地) 比较平缓, 是黄土物质堆积和保存的地方, 并形成许多大小面积厚度不等的黄土台地。其中 2~4 级阶地受近代河流下切影响明显, 地形变化较大, 水土流失严重, 使得地层序列保存不完整, 而一级阶地地形往往发育较好且较宽缓, 地面侵蚀不明显, 黄土剖面能够保存的较完整。本文选取军王村剖面 (JWC) 为研究对象, 位于城固县军王村 (107°16'52"E, 33°10'53"N) 汉江左岸一级河流阶地上, 具体位置详见图 1。

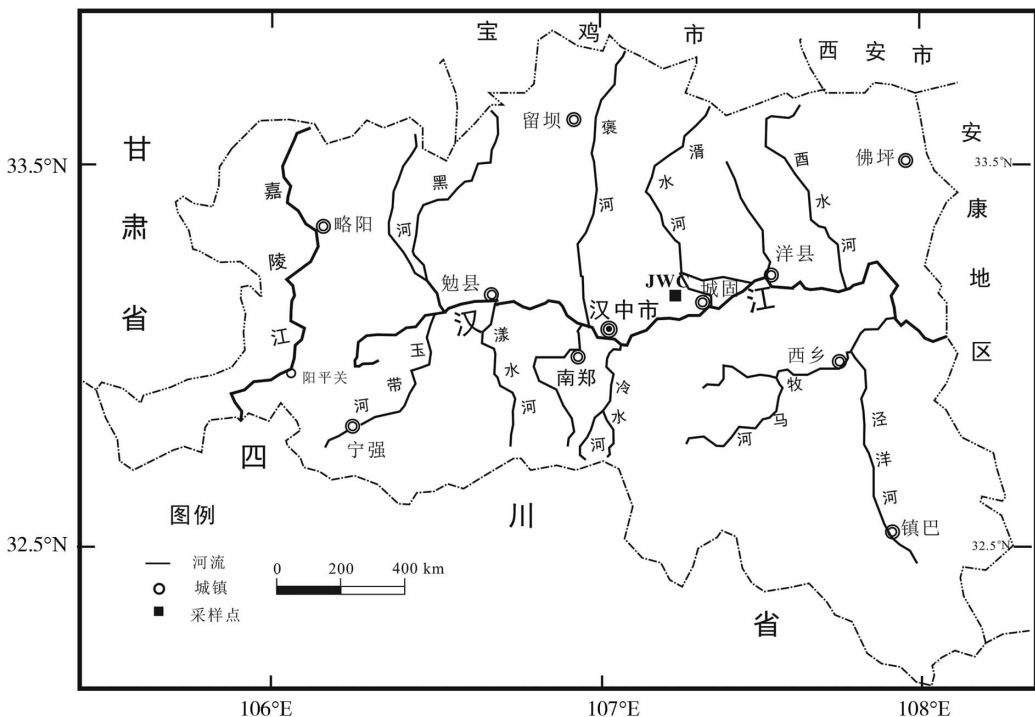


图 1 汉中盆地军王村剖面位置图

Fig. 1 Sketch map of the Hanzhong basin and the location of the Junwangcun (JWC) profile in Shaanxi, China

2 研究材料

军王村剖面 (JWC) 位于城固县军王村汉江左岸一级河流阶地上, 剖面所在地形十分平坦, 当地砖厂自地面向下取土, 形成较好的土壤断面, 断面厚约 10 m, 经向下挖掘, 见到了河流相沉积物, 剖面地层界限明显, 地层序列完整。根据野外调查并结合实验室内所做的粒度、磁化率等理化指标数据对剖面进行了地层划分 (表 1), 自下而上依次为砾石层 (AD) → 马兰黄土 (L_1) → 过渡黄土 (L_1) → 古土壤 (S_0) → 全新世黄土 (L_0) → 表土

层 (MS)。具体地层描述详见表 1。

本文的地层年代序列主要是通过地层对比^[19]和光释光 (OSL) 测年数据确定 (图 2)。有关 OSL 年龄问题另有撰文论述, 本文未进行深入讨论。军王村剖面的地层年代为: 古土壤 (S_0) 的顶界和底界年龄分别为 3.0 ka BP 和 8.5 ka BP, 马兰黄土 (L_1) 的顶界年龄为 11.5 ka BP, 黄土底界年龄为 55.5 ka BP, 马兰黄土 (L_1) 中的弱古土壤层年龄在 38.8 ~ 25.6 ka BP 之间^[4,19]。

表 1 汉中盆地军王村 (JWC) 剖面地层特征描述

Table 1 Stratigraphic description of the JWC profile in Hanzhong Basin

地层单元	厚度/cm	颜色 (Munsell 方法)	剖面结构特征
表土 (MS)	0 ~ 36	浊棕色 (7.5YR5/4)	粘土粉砂质地, 团粒构造, 疏松多孔, 多植物根系
近代黄土 (L_0)	36 ~ 52	浊黄橙色 (10YR6/4)	粉砂质地, 团块 - 块状构造, 结构均匀, 比较疏松, 具有明显的成壤特征
古土壤 (S_0)	52 ~ 200	暗红棕 (5YR3/4)	粘土质地, 典型的棱块状构造, 致密紧实, 比较坚硬, 结构面有大量暗棕色铁质胶膜
过渡层 (L_1)	200 ~ 238	浊黄橙色 (10YR7/4)	粉砂质地, 块状构造, 部分裂隙面有暗棕色粘土胶膜沉淀, 但结构体内部仍呈黄橙色
马兰黄土 (L_1)	238 ~ 952	浊黄橙色 (10YR6/4)	粉砂质地, 均匀块状构造, 十分疏松, 典型黄土。在 508 ~ 608 cm, 632 ~ 660 cm 和 708 ~ 740 cm 呈暗红棕色 (5YR3/4) 粘土粉砂质地, 弱棱块状结构, 较紧实和较坚硬, 显示明显成壤特征
砾石层 (AD)	952 ~ ?	灰白色 (5YR8/2)	典型二元结构, 纯净砂层 (厚度 > 150 cm), 直接覆盖在河流相砾石层

3 研究方法

3.1 CIELAB 表色系统

门塞尔表色系统 (Munsell) 是地质学上广泛使用的颜色定性描述系统, 主要通过肉眼比较来判别土壤颜色。CIELAB 表色系统^[13,20]是一种对颜色特征进行定量描述的系统, 通常选用 L^* 、 a^* 、 b^* 这 3 个参数来对任何均匀连续的颜色空间进行定量描述。其中, L^* 表示亮度, 介于黑 (0) 和白 (100) 之间, a^* 介于红 (+) 和绿 (-) 之间, b^* 介于黄 (+) 和蓝 (-) 之间。并且其衍生参数色饱和度 c^* ($c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$) 也可作为颜色判别指标, c^* 越大, 表示颜色越鲜艳。

3.2 测试方法

沿剖面从地表开始向下 2 cm 连续采样, 其中 464 cm 以下 4 cm 连续采样 (采至砾石层顶界),

共获得 396 个样品。所有实验均在陕西师范大学旅游与环境学院实验室完成。色度的测量: 采用美国生产的 X-rite VS450 型分光测色仪完成, 观察视野为 10° , 孔径为 6 mm, 背景光源恒定。将自然风干样品磨至 200 目以下, 称取 4 g 用 YY60 型压力机压成圆片, 分光测色仪用标准色板白度校准后将圆片放于测试白板上, 同一样品在不同区域测量 3 次, 然后取其 L^* 、 a^* 、 b^* 、 h^* 的平均值, 相对误差小于 2%。Munsell 颜色描述采用中科院南京土壤研究所制的标准比色卡所得; 有机质用 SX-5-12 型箱式电阻炉仪器运用燃烧失重法进行测量; 磁化率的测量采用英国 Bartington 公司制造的 MS2B 型磁化率仪; 化学元素含量的测量采用荷兰 Panalytical 公司生产的 X-Ray 荧光光谱仪 (PW2403), 误差控制在 5% 以内。

4 结果与分析

4.1 军王村剖面亮度 (L^*) 特征

军王村剖面中 L^* 值变化波动较大, 变化幅度为 33%。介于 47.7 ~ 71.5 之间变化, 均值为 54.0, 且 L^* 值在各个地层中也有明显的差异, 表现为古土壤层 S_0 的 L^* 值整体小于黄土层, 呈现明显的凹值区, 其变化范围为 47.7 ~ 53.9, 平均 50.2; 而黄土层则呈现明显的高值区, 其中马兰黄土层 L_1 的 L^* 最高, 变化范围为 52.2 ~ 59.0, 平均值为 56.2; 过渡黄土层 L_1 介于马兰黄土和现代黄土之间, 变化于 50.8 ~ 53.1 之间, 平均 52.2。值得注意的是, 在 508 ~ 608 cm、632 ~ 660 cm 和 708 ~ 740 cm 的深度处, 其 L^* 值相对马兰黄土呈现明显的谷值, 分别为 53.1、54.4、54.3, 较接近于古土壤 S_0 中的 L^* 值。

4.2 彩度特征

剖面中 a^* 值变化特征较为明显, 其变化范围为 1.3 ~ 8.5, 平均值为 7.3。不同地层其 a^* 值也有较大差异, 在古土壤层 S_0 中呈现高值, 变化范围为 6.8 ~ 8.5, 均值 7.7; 而黄土层的 a^* 则呈现相对低值, 其中马兰黄土层 L_1 的 a^* 值最低, 变化范围为 4.7 ~ 8.4, 平均值为 6.8, 过渡黄土层 L_1 和近代黄土层 L_0 分别为 7.6 和 7.9, 表土 MS 的变化范围为 7.0 ~ 8.3, 平均值为 7.6。

b^* 值介于 12.4 ~ 21.5 之间变化, 其变化幅度为 43%, 平均值 16.6。且不同地层单元的变化趋势与 L^* 相似, 表现为古土壤 S_0 呈现低值, 平均为 15.5, 黄土层表现为高值, 其中马兰黄土层 L_1 的 b^* 值最高 (16.7), 过渡黄土层 L_1 和全新世黄土 L_0 的 b^* 值分别为 16.3、15.4。

a^*/b^* 值随深度的变化趋势与 a^* 相似。其变化范围为 0.09 ~ 0.56, 变化幅度达到 84%, 平均为 0.44。其中古土壤层 S_0 中 a^*/b^* 值最高, 平均为 0.50; 黄土层各单元则呈现相对的低值, 过渡黄土层 L_1 的 a^*/b^* 值平均为 0.46。 c^* 值变化范围为 12.8 ~ 22.6, 平均为 18.1, 马兰黄土层 L_1 的 c^* 较小, 平均为 17.8。

值得注意的是, 在马兰黄土 L_1 中 a^* 、 a^*/b^* 都与 L^* 有一个相似之处, 三者者在 508 ~ 608 cm、632 ~ 660 cm 和 708 ~ 740 cm 的深度处出现相对马兰黄土层的波峰或波谷。马兰黄土 L_1 的 a^* 变化范围为 4.6 ~ 8.2, 平均值 6.8, 在上述 3 个深度处的 a^* 值分别为 7.5、7.4、7.3, 其值明显大于马兰黄土层 L_1 , 而接近古土壤 S_0 中的 a^* 值。 a^*/b^* 在马兰黄土 L_1 中平均值为 0.42, 在 508 ~ 608, 632 ~ 660 和 708 ~ 740 cm 的深度处 a^*/b^* 值分别为 0.44、0.45、0.44。

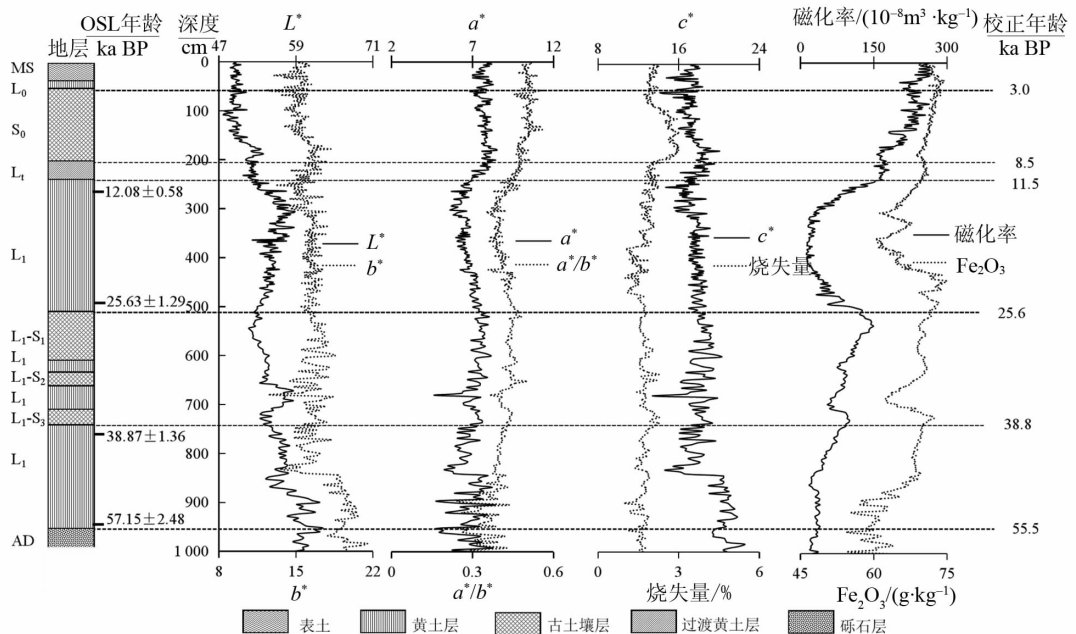


图2 军王村剖面色度参数、磁化率、 Fe_2O_3 、烧失量变化特征

Fig. 2 The curves of chroma, magnetic susceptibility, Fe_2O_3 and Loss on ignition of the Junwangcun profile in Hanzhong

5 讨论

5.1 亮度 (L^*) 的意义及影响因素

色度参数中的亮度 L^* 值主要反映土壤的明暗程度^[13]，其变化受多种因素影响，主要包括有机质、碳酸盐含量、湿度、土壤粒度等因子，其中碳酸盐和有机质对 L^* 影响尤为明显^[12,21]。军王村剖面实验前处理已经将土壤湿度和粒度对色度参数的影响降到最低，且实验表明剖面中碳酸盐反应不明显，因而其对亮度 L^* 的影响甚微，这可能与剖面所在的地理位置关系密切，军王村剖面所在的汉中盆地属于亚热带湿润季风气候，降水量较高使得剖面中的碳酸盐矿物淋溶强烈，因此，本文认为碳酸盐对 L^* 的影响可以忽略不计，这也与苗运法^[22]认为碳酸盐与亮度的相关关系因地制宜的观点一致。

剖面中 L^* 值与有机质含量具有同步异向的变化趋势，即 L^* 值随有机质含量的增高而降低（图 2），对其进行相关性分析发现，二者的相关系数 $R^2 = 0.52$ （图 3），表明有机质含量对 L^* 变化的影响很大，土壤有机质是造成土壤颜色变暗的关键因素^[12]。前人研究表明，有机质含量的变化与降水量和生物活动密切相关，即气候的温暖程度和降水量的变化会直接影响植被的发育和生物活动量的大小，因而有机质的含量可以反映一定气候条件下植被的生长状况，进而更深层次地揭示古气候的冷暖 - 干湿变化^[8,23]。在军王村剖面中，古土壤 S_0 中的有机质含量表现为高值，且相应的 L^* 值在深度曲线上呈现为低谷值区，指示了古土壤 S_0 形成时期的气候温暖湿润，森林植被覆盖面积大，有利于有机质的累积；而黄土层的有机质含量呈现低值，对应的 L^* 值表现为峰值，揭示了黄土形成时期气候较古土壤形成时期相对冷干，降水量较少，植被覆盖度低，限制了有机质含量的累积。值得注意的是，在剖面 508 ~ 608, 632 ~ 660 和 708 ~ 740 cm 深度处的 L^* 值出现相对马兰黄土明显的低值，有机质呈现小峰值，这可能指示了该时期存在 3 个相对暖湿的气候时期，降水量充足，植被较丰茂。

5.2 彩度参数的意义及影响因素

彩度参数主要包括红度 a^* ，黄度 b^* 以及二者的衍生参数 a^*/b^* 和 c^* ，其不仅表现为土壤颜色的变化，更是对土壤内部结构组分改变的反映^[12]。沉积物色度的变化主要来源于其致色矿物类型及含量的变化，相关研究表明，有机质含量和碳酸盐矿物对红度 a^* 的影响有限，铁氧化物对土壤颜色变

化的影响最大^[24-26]，而 b^* 值主要受控于气温和降水量的变化，杨胜利等认为 b^* 与气温降水具有极高的线性相关性，即 b^* 值随气温降水的增加而增加^[8]。 a^*/b^* 表示红度与黄度的比值，间接指示了黄土被化学风化改造的程度，而 c^* 表示黄土颜色的鲜艳程度。

军王村剖面中 a^* 与 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 曲线变化趋势一致（图 2）。相关性分析显示，二者相关系数 $R^2 = 0.59$ ，具有良好的线性相关性。由于暖湿的气候能够促进风化成壤发生和大量不稳定性矿物的分解，造成铁氧化物难于迁移而相对富集，使沉积物的颜色加深， a^* 值增加。反之，干冷的气候环境使得矿物不易分解，致色矿物含量甚微， a^* 值较低。因此， a^* 值能够很好地反映风成黄土受夏季风环流强度控制的风化成壤强度的变化。剖面中 Fe_2O_3 在古土壤层 S_0 呈现高值，在黄土层中的

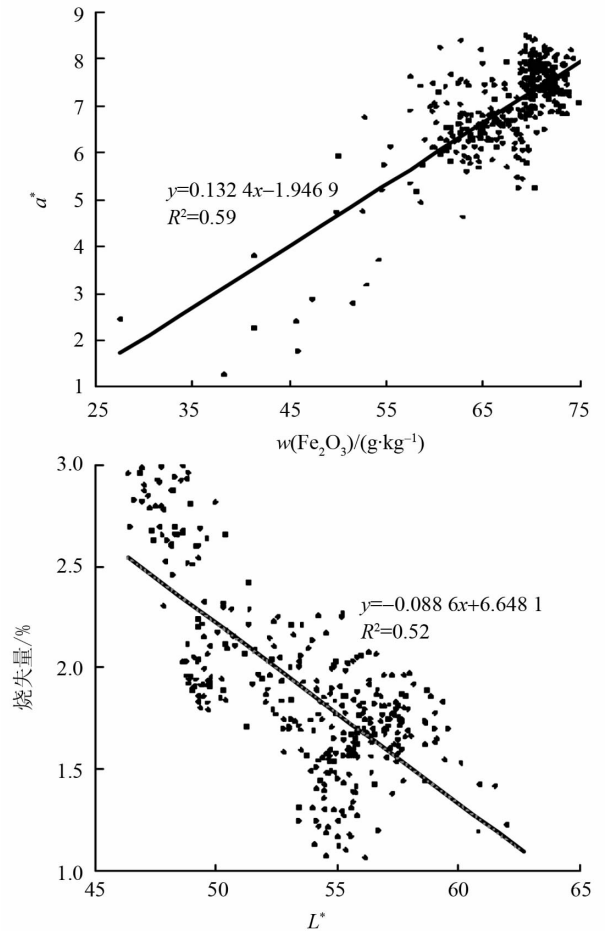


图 3 军王村剖面 L^* 与烧失量， a^* 与 Fe_2O_3 之间的线性关系

Fig 3 Linear relationship of L^* and loss on ignition, a^* and Fe_2O_3 of the Junwangcun profile in the Hanzhong city, China

Fe_2O_3 呈现明显的谷值, 指示了古土壤形成时期气候温暖湿润, 风化成壤作用强烈, 黄土形成时期气候较干冷, 成壤作用较弱; 而马兰黄土层 L_1 中 a^* 值出现三个相对马兰黄土较高的值, 指示了该时期气候出现突变波动, 表现为相对马兰黄土形成时期气候较暖湿, 成壤作用较强。

5.3 色度参数与磁化率的相关分析

CIELAB 表色系统是一个立体的颜色空间, 各颜色坐标分量之间也是相互联系, 相互影响的整体^[24]。因此分析各色度参数之间的相互关系变得尤为重要。由表 2 可看出, L^* 与 a^* 呈显著的负相关, 二者的相关系数 $R = -0.72$, 表明 L^* 值随着 a^* 值的增加而变小。 L^* 与氧化铁相关系数 $R = -0.84$, 呈显著负相关关系, 这也说明了铁氧化物含量对 L^* 的变化也具有至关重要的影响; 而 L^* 与 b^* 呈显著正相关关系, 相关系数 $R = 0.50$, 且二者具有基本一致的变化趋势 (图 2), 表明 L^* 值在一定程度上随着 b^* 值的变化而变化; L^* 与 a^*/b^* 呈极显著负相关关系, 相关系数 R 为 0.92, 两者具有同步异向的变化趋势, 表现出 L^* 值随着 a^*/b^* 值增大而减小; L^* 与 c^* 也有极显著相关关系, 并随着 c^* 的增大而增大。但是相较于 L^* 而言, a^* 和 b^* 两者之间的相关性则很小, 相关系数仅为 0.09, 可见 a^* 和 b^* 并不存在明显的相关性, 说明二者的变化是受制于不同的致色矿物。

一般认为, 磁化率能够解释黄土-古土壤序列

的风化成壤强度, 也能揭示一定区域的气候变化, 可以作为一个很好的反演东亚夏季风变化的替代指标^[27-28]。鉴于此, 本文将结合磁化率和色度参数共同揭示色度的研究机理及古气候意义。相关分析表明 (表 2), 军王村剖面中磁化率与 Fe_2O_3 具有显著的正相关关系, 相关系数为 0.58, 表明二者均与黄土中的铁磁性矿物含量密切相关。而磁化率与 L^* 和 b^* 呈显著的负相关, 与 a^* 值表现为正相关, 相关系数 R 分别为 -0.81 、 -0.45 、 0.57 。进一步观察发现, 磁化率与 L^* 具有相反的波峰波谷对应, 而与 a^* 具有相似的波峰波谷对应关系 (图 2), 因此, L^* 和 a^* 可作为良好的气候替代指标来反演气候变化, 甚至对次一级的气候变化事件上也有明显的指示; 而 b^* 与磁化率相对较低的相关系数可能意味着作为气候替代指标具有一定的局限性。进一步研究发现, 在剖面中 a^*/b^* 和 c^* 曲线也可与磁化率曲线进行很好地对比。其中 a^*/b^* 曲线与磁化率具有同步同向的变化趋势, 相关系数 $R = 0.77$, 呈极显著相关性。但 c^* 曲线波动较大, 且与磁化率相关系数为 -0.28 , 相关性较差, 反映出 c^* 在一定程度上可能不能很好地作为气候替代指标。进一步研究表明, 在剖面 508~608, 632~660 和 708~740 cm 深度处 a^*/b^* 与磁化率曲线也具有良好的对应关系。因此, 本文认为 a^*/b^* 或许是一个良好的气候代用指标, 与磁化率等气候指标共同反映晚更新世以来的气候演变。

表 2 军王村剖面色度参数与磁化率、 Fe_2O_3 的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient of the chroma with the magnetic susceptibility and Fe_2O_3 of Junwangcun profile in the Hangzhong city

项目	L^*	a^*	b^*	a^*/b^*	c^*	磁化率	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$
L^*	1						
a^*	-0.72^{**}	1					
b^*	0.50^{**}	0.09	1				
a^*/b^*	-0.92^{**}	0.85^{**}	-0.43^{**}	1			
c^*	0.30^{**}	0.32^{**}	0.97^{**}	-0.21^{**}	1		
磁化率	-0.81^{**}	0.57^{**}	-0.45^{**}	0.77^{**}	-0.28^{**}	1	
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	-0.84^{**}	0.76^{**}	-0.31^{**}	0.85^{**}	-0.12^{**}	0.58^{**}	1

1) ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

5.4 秦岭南北地区色度参数对比

梁村剖面位于秦岭北侧的关中平原, 将其作为秦岭以北黄土的典型剖面与汉中军王村剖面进行对比, 据图 4 可看出^[29], 其 L^* 与磁化率具有同步异向的变化趋势, 与磁化率具有良好地对应关系, 在古土壤层 L^* 含量最低 (56.8), 马兰黄土层中最

高 (67.2)。 a^* 、 a^*/b^* 均与磁化率呈现同步的变化趋势, 表现为其值均在古土壤层中呈现最高值, 在马兰黄土层中为最低值。但是剖面中 b^* 和 c^* 变化趋势与磁化率相关性较差, 在剖面中, 二者曲线趋势波动变化较大。这与汉中军王村色度参数可以进行良好对比, 梁村剖面的色度参数与汉中军王村剖

面共同验证了 L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 可以作为良好的气候代用指标指示古气候的变化过程，而 b^* 和 c^* 在一定程度上不能准确地指示古气候变化。

据表 3 可发现^[29]，军王村剖面与梁村剖面的色度参数差异比较明显，军王村剖面的 L^* 值和 b^* 值显著低于梁村剖面，这可能是汉中地区有机质含量较多和碳酸盐含量较低所致；但军王村剖面的

a^* 值明显高于梁村剖面，甚至军王村剖面中黄土层的 a^* 值大于梁村剖面中古土壤层的 a^* 值，指示汉中地区的铁氧化物含量大大的高于秦岭以北黄土地区。这些都佐证了在同一时期汉中地区气候相对秦岭以北地区温暖湿润，而湿热的环境使得黄土 - 古土壤在发育过程中经历了更强烈的风化成壤改造作用。

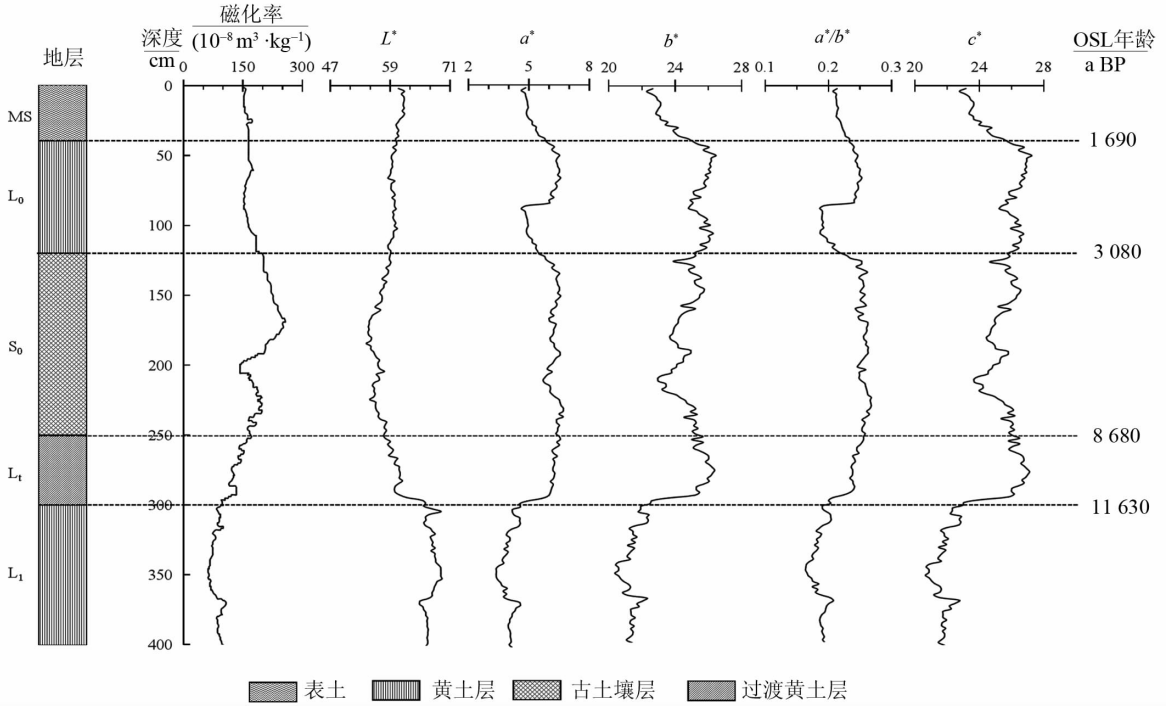


图 4 秦岭北侧关中盆地梁村 (LC) 剖面磁化率、色度参数变化特征

Fig. 4 The curves of chroma and magnetic susceptibility of liangcun profile in the Ganzhong Basin, China

表 3 军王村剖面与梁村剖面色度对比

Table 3 Comparison of the chromaticity index between Junwangcun profile and Liangcun profile

地层	军王村剖面					梁村剖面				
	L^*	a^*	b^*	a^*/b^*	c^*	L^*	a^*	b^*	a^*/b^*	c^*
MS	49.5	7.6	15.2	0.50	16.9	60.3	5.7	24.6	0.21	23.9
L ₀	49.8	7.8	15.4	0.51	17.3	59.6	5.1	25.6	0.22	26.4
S ₀	50.2	7.7	15.5	0.51	17.4	56.8	6.3	24.6	0.25	25.3
L ₁	52.2	7.6	16.3	0.46	18.0	63.2	5.4	24.2	0.23	26.1
L ₁	54.7	6.9	16.5	0.34	20.5	67.2	3.9	21.3	0.18	21.8

5.5 军王村剖面色度与气候变化的关系

上述分析无疑表明，军王村剖面色度参数也能作为良好的气候代用指标，其变化实质上记录了该地区晚更新世以来的气候变化信息。晚更新世末期 (55.5 ~ 11.5 ka BP) 形成了马兰黄土 L₁，该层黄土中色度表现为较高的 L^* 和较低的 a^* 、 a^*/b^* 值，指示了该时期受夏季风影响较弱，降水稀少，生物

活跃程度较低，植被较少，处于冷干的气候环境，风化成壤作用较弱；全新世初期 (11.5 ~ 8.5 ka BP) 形成了过渡黄土层 L₁，其 L^* 值相对马兰黄土呈降低的趋势，而 a^* 、 a^*/b^* 呈升高的趋势，表明在该时期夏季风活动渐渐增强，气候逐渐变得温暖湿润，生物活动性增强，植被数量有所增加，开始有较弱的风化成壤作用；全新世中期 (8.5 ~ 3.0

ka BP) 属于气候大暖期, 形成了典型的古土壤层 S_0 , 其 L^* 值呈现明显的谷值, a^* 、 a^*/b^* 呈明显的峰值, 以及磁化率、烧失量、 Fe_2O_3 含量均在该层出现高值, 这些特征均揭示了全新世中期受东亚夏季风影响明显, 气候相对湿热, 植被茂盛, 风化成壤作用强烈; 全新世黄土 L_0 接近古土壤层 S_0 特征, 却又低于古土壤时期特征, 指示了在全新世晚期 (3.0 ka BP 以来) 气候暖湿程度有所降低。但值得注意的是 L^* 、 a^* 、 a^*/b^* 在马兰黄土层 L_1 中出现了 3 次次一级的波动, 表现为相对马兰黄土 L_1 中 L^* 较低, a^* 、 a^*/b^* 较高, 三者数值却接近古土壤层 S_0 的色度参数值, 说明在 508 ~ 608, 632 ~ 660 和 708 ~ 740 cm 深度处出现 3 层弱古土壤层 ($L_1 - S_1$ 、 $L_1 - S_2$ 、 $L_1 - S_3$), 指示了此时期 (约 38.8 ~ 25.6 ka BP) 气候变得相对温暖湿润, 降水较多, 生物活动性较高, 风化成壤作用明显增强。在马兰黄土 L_1 中出现弱古土壤的特征, 也说明了汉中盆地末次冰期时气候并非为长期稳定的寒冷特征, 其中在约 38.8 ~ 25.6 ka BP 期间出现了气候相对暖湿的阶段。

6 结 论

1) 军王村剖面 L^* 值主要与有机质含量有关, a^* 值受氧化铁含量的影响很大, 但二者均与磁化率有很好可比性, 与风化成壤作用密切相关, 因此 L^* 和 a^* 可以作为气候演变的替代指标, L^* 值越小, a^* 值越大指示气候相对暖湿; 但 b^* 对气候的指示意义有一定的局限性。

2) a^*/b^* 与磁化率相关系数很高, 能够作为一个良好的气候替代指标来反演气候变化, 重建汉中盆地晚更新世以来的气候冷暖干湿变化过程, 而 c^* 指标可能不是很好的气候替代指标。

3) 色度参数变化与地层序列具有明显的对应关系, 可以作为一个良好的气候替代指标, 军王村剖面色度参数表明, 该区晚更新世时期风化成壤较弱, 气候寒冷, 降水较少, 生物活动性较差, 形成了较厚的马兰黄土。马兰黄土层中出现了 3 个次一级的波动, 记录了在 38.8 ~ 25.6 ka BP 期间出现了短暂的气候转暖事件, 期间气候温暖湿润, 风化成壤作用较强。全新世初期气候逐渐转为暖湿, 全新世中期形成一个大暖期, 气候相对湿热, 植被茂盛。

参考文献:

- [1] 柯夫达. 土壤学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] 周伟, 王琦, 赵其渊, 等. 渤海南部海底沉积物颜色的研究[J]. 海洋科学, 1990, 14(3): 31 - 35.
ZHOU W, WANG Q, ZHAO Q Y, et al. Color variation of surface sediment in south Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 1990, 14(3): 31 - 35.
- [4] 庞奖励, 黄春长, 周亚利, 等. 汉江上游谷地全新世风成黄土及其成壤改造特征[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1562 - 1573.
PANG J L, HUANG C C, ZHOU Y L, et al. Holocene aeolian loess and its pedogenic modification in the Upper Hanjiang River Valley, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1562 - 1573.
- [5] AN Z S, LIU D S, LU Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-Paleosol sequence in central China[J]. Quatern Int, 1990(7/8): 91 - 95.
- [6] 季峻峰, 陈骏, BALSAM W, 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 221 - 229.
JI J F, CHEN J, BALSAM W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 221 - 229.
- [7] 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 等. 土壤颜色——一个可靠的气候变化代用指标[J]. 干旱区地理, 2006, 29(3): 309 - 313.
CHEN Y M, CHEN X S, GONG H L, et al. Soil color a new sensitive indicator for climatic change[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(3): 309 - 313.
- [8] 杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2001, 31(S1): 175 - 181.
YANG S L, FANG X M, LI J J, et al. Transformation functions of soil color and climate[J]. Science in China (Series D), 2001, 31(S1): 175 - 181.
- [9] YANG S L, DING Z L. Color reflectance of Chinese loess and its implications for climate gradient changes during the last two glacial-interglacial cycles[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(20): 2058.
- [10] SUN Y B, HE L, LIANG L J, et al. Changing color of Chinese loess: geochemical constraint and paleoclimatic significance[J]. Journal of Asian Earth Science, 2011, 40(6): 1131 - 1138.
- [11] 陈咏, 陈骏, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的白度参数及其古气候意义[J]. 地质论评, 2002, 48(1): 38 - 43.
CHEN Y, CHEN J, JI J F, et al. Whiteness in tensity in Luochuan loess sequence (Shaanxi Province) and paleoclimatic implications[J]. Geological Review, 2002, 48(1): 38 - 43.
- [12] 何柳, 孙有斌, 安芷生. 中国黄土颜色变化的控制因素和古气候意义[J]. 地球化学, 2010, 39(5): 447 - 455.

- HE L, SUN Y B, AN Z S. Changing color of Chinese loess: controlling factors and paleoclimatic significances [J]. *Geochimica*, 2010, 39(5):447-455.
- [13] 李越,宋友桂,王千锁. 新疆昭苏黄土剖面色度变化特征及古气候意义[J]. *地球环境学报*, 2014, 15(2):67-75.
- LI Y, SONG Y G, WANG Q S. Chroma characteristics in the Zhaosu loess section and its paleoclimatic significance [J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 15(2):67-75.
- [14] 刘峰,王昊,秦艺帆,等. 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*, 2015, 35(5):143-151.
- LIU F, WANG H, QIN Y F, et al. Chroma characteristics of the Zhoujiashan Xiashu loess profile in Nanjing and its significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5):143-151.
- [15] 高鹏坤,庞奖励,黄春长,等. 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*, 2015, 33(3):537-542.
- GAO P K, PANG J L, HUANG C C, et al. Chroma Characteristics and Its Significances of the Chafangcun Loess-paleosol Profile in Southeast Shaanxi, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3):537-542.
- [16] 李晓妮,冯希杰,任隽,等. 陕南汉中盆地西部梁山南缘断裂隐伏段的活动性鉴定[J]. *地震学报*, 2013, 35(4):534-542.
- LI X N, FENG X J, REN J, et al. Activity identification of the buried segment of Liangshan south margin fault in the west of Hanzhong basin [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(4):534-542+2.
- [17] 王明明,周本刚,杨晓平,等. 汉中盆地周缘断裂活动性及晚第四纪构造特征[J]. *地震地质*, 2013, 35(4):778-792.
- WANG M M, ZHOU B G, YANG X P, et al. A study on the activity of the faults around and the late quaternary tectonic features in the Hanzhong basin [J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(4):778-792.
- [18] 韦玉春,黄春长,孙根年. 汉中盆地全新世沉积物成因研究[J]. *干旱区地理*, 2000, 23(1):37-43.
- WEI Y C, HUANG C C, SUN G N. Study on the Holocene loess sedimentary stratigraphy in Hanzhong basin [J]. *Arid Land Geography*, 2000, 23(1):37-43.
- [19] 庞奖励,黄春长,周亚利,等. 郿县盆地风成黄土—古土壤与汉江I级阶地形成年龄研究[J]. *地理学报*, 2015, 70(1):63-72.
- PANG J L, HUANG C C, ZHOU Y L, et al. Eolian loess-paleosol sequence and OSL age of the first terraces within the Yunxian Basin along the upper Hanjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1):63-72.
- [20] 顾磊. 基于色度学的灵台剖面晚新生代地层序列研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011.
- [21] 彭淑贞,郭正堂. 西峰晚第三纪红土记录的亮度学特征[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1):110.
- PENG S Z, GUO Z T. Characteristic of luminosity of the Late Tertiary red earth in Xifeng area [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1):110.
- [22] 苗运法,杨胜利,卓世新,等. 我国西北干旱区现代地表沉积物颜色指标与降水关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4):77-85.
- MIAO Y F, YANG S L, ZHUO S X, et al. Relationship between the color of surface sediments and precipitation in arid Northwest China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(4):77-85.
- [23] 李天杰,赵焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [24] 石培宏,杨太保,田庆春,等. 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)*, 2012, 48(2):15-23.
- SHI P H, YANG T B, TIAN Q C, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its significance to paleoclimatic [J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2012, 48(2):15-23.
- [25] CHEN J, JI J F, BALSAM W, et al. Characterization of the Chinese loess-paleosol stratigraphy by whiteness measurement [J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 183(3/4):287-297.
- [26] 朱丽东,刘名瑜,谷喜吉,等. 金衢盆地网纹红土色度及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3):133-141.
- ZHU L D, LIU M Y, GU X J, et al. Environmental implication of the color index of the plinthitic red earth in Jinhua-Quzhou basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3):133-141.
- [27] 刘秀铭,刘东生,John Shaw. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(3):281-287.
- LIU X M, LIU D S, JOHN SHAW. Magnetic mineral characteristics of Chinese Loess and its palaeoclimatic significance [J]. *Quaternary Science*, 1993, 13(3):281-287.
- [28] 邓成龙,刘青松,潘永信,等. 中国黄土环境磁学[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2):193-209.
- DENG C L, LIU Q S, PAN Y X, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2):193-209.
- [29] 丁敏,庞奖励,黄春长,等. 全新世黄土—古土壤序列色度特征及气候意义—以关中平原西部梁村剖面为例[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5):92-97.
- DING M, PANG J L, HUANG C C, et al. Chroma characteristics and its climatic significance in Holocene loess-paleosol sequence—A case study of the Holocene Liangcun profile in the western Guanzhong Basin [J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science)* 2010, 38(5):92-97.