

文章编号:1000-0550(2018)02-0333-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.043

中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义

陈杰,杨太保,曾彪,何毅,冀琴

兰州大学资源环境学院,冰川与生态地理研究所,兰州 730000

摘 要 以中国境内帕米尔黄土—古土壤序列为研究对象,对剖面上部进行土壤色度指标与其他常用气候替代指标(如磁化率、碳酸盐和有机碳)对比研究后发现:在帕米尔黄土沉积期间,亮度 L^* 很大程度上受控于颜色分量 a^* 和 b^* ,进而可能与影响 a^* 、 b^* 的物质相对含量有关。红色 a^* 在整个黄土—古土壤剖面中变化特征明显,与磁化率呈明显的负相关关系,可能与土壤中氧化物的种类和含量关系密切。由于 a^* 和 b^* 具有较高的相关性,认为它们具有较为一致的致色物质,可能受控于相似的气候因子。色度 a^* 、 b^* 和亮度 L^* 的变化表明其可以作为帕米尔地区良好的气候代用指标,结合磁化率共同反映该地区的古气候变化过程。

关键词 色度;磁化率;黄土—古土壤;帕米尔

第一作者简介 陈杰,男,1990 年出生,博士研究生,环境演变与全球变化,E-mail: chenj2015@lzu.edu.cn

通信作者 杨太保,男,教授,博士生导师,E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

土壤颜色是土壤最显著的特性之一,反映了土壤在可见光波段的反射光谱特征,是其成分和结构的外在表现,不仅能够反映土壤发育的强度,而且可以反映土壤的沉积环境^[1]。土壤颜色的空间变化其实是受到气候要素的控制,而土壤颜色的垂直剖面变化就具有一定的气候指示意义。由于沉积物的颜色主要是对矿物组成及其特征的反映,而自然风化与成壤作用往往会引起沉积物物质成分的变化。因此,沉积物颜色的变化能够反映当时气候变化的信息,可以作为地层对比、沉积环境气候的替代指标^[2-5]。

自 20 世纪 60 年代以来,沉积物色度指标在古气候研究方面逐渐得到应用并广泛发展^[6-15],其作为气候替代指标在第四纪长时间尺度研究中已得到验证,具有一定的气候敏感性。在对夏季风演化的过程研究中,方小敏等^[16]将土壤色度作为夏季风的代替性指标,效果良好;杨胜利等^[5]的研究表明现代气候因子对土壤的颜色和成土过程有一定的影响,且在磁化率不能很好地指示成土过程和气候意义时,色度指标可以很好地弥补这一缺陷;陈一萌等^[17]认为土壤色度指标所记录的气候变化过程在长时间序列尺度上是可信的,而且这种可靠程度在末次冰期以来表现得

尤为显著。宋春晖等^[13]发现利用沉积物颜色的变化可以很好地重建黄土—古土壤的冷暖旋回过程。前人的研究表明,色度作为气候的代用指标在黄土沉积物中是能够指示气候变化特征的。

此外,在中国黄土—古土壤序列研究中,许多相对成熟的古气候替代指标在揭示古环境演变和成壤环境变化方面都发挥了积极的作用,例如磁化率、碳酸盐含量等;作为黄土研究中的一个重要气候代用指标,在黄土高原地区,影响磁化率变化的重要因素是成壤作用,其值主要指示区域干湿冷暖的古气候条件。磁化率值越高,表明气候越暖湿,反之则越干冷^[18]。而在受西风环流影响下的中亚地区,磁化率形成机制相对复杂。贾佳等^[19-20]和夏敦胜等^[21]通过对伊犁河谷典型的黄土剖面进行磁学特征的研究,指出该地区地层的成壤强度与细颗粒磁性矿物呈正相关,而且物源对本地区的磁学性质有很大的影响。叶玮^[22]及史正涛等^[23]在伊犁盆地的黄土研究中,发现剖面黄土磁化率在不同地区、不同海拔都表现出不尽相同的特征。中亚黄土磁学的研究表明该地区磁化率增强不仅受到物源与原生磁性矿物的影响,而且与当地的气候环境和地质背景有关,成因比较复杂。因此,在磁化率等这些常用替代指标在揭示环境变化和成土过程受限的情况下,色度指标的出现具有很好的

收稿日期:2017-03-29;收修改稿日期:2017-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41271024);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2016-270) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41271024; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. lzujbky-2016-270]

互补作用,在古气候变化研究中前景广泛。但影响色度的因素在各种沉积环境中又各不相同,同一种沉积物中由于区域条件差异,所形成的色度值也不尽相同。在利用色度作为环境替代指标时,就有必要对色度的变化特征及影响因素进行研究。

鉴于此,本文对中国境内东帕米尔地区奥依塔克 (AYTK) 黄土—古土壤序列的色度进行定量研究,结合磁化率、 CaCO_3 (%) 和 TOC 等环境指标进行综合对比分析,揭示该区黄土色度的变化规律及其古气候意义,为地处西风区的中国境内帕米尔地区古气候环境变化的研究提供重要依据。

1 研究剖面概况

帕米尔介于 $70^{\circ}\sim 77^{\circ}30'E$, $36^{\circ}30'\sim 41^{\circ}N$ 之间,地处中亚东南部,中国新疆西南部;横跨中国、阿富汗和塔吉克斯坦三个国家,是亚洲主要山脉喜马拉雅山、喀喇昆仑山、天山、兴度库什山和昆仑山的汇集

处^[24]。平均海拔在 4 000 m 以上,最高峰公格尔峰海拔 7 719 m。该区地势由中央向东、西、南三面逐渐降低,北、西、东缘气候相对湿润,内部干旱,全年主要受西风带的控制,属于典型的大陆性气候。中国境内的帕米尔又称为东帕米尔,该地区年均温为 3.53°C , 年均降水量 74.39 mm,且大都集中在夏季^[25]。

研究区奥依塔克 (AYTK) 黄土剖面 (图 1) 毗邻中国新疆西面喀什边界,具体地理位置为 $38^{\circ}58'46.3"N$, $75^{\circ}27'47.5"E$, 海拔 2 009.7 m。以 2 cm 为间隔选取剖面上部 6 m 的黄土沉积为研究对象,共计样品 300 个。目前尚未对 AYTK 剖面进行详细的断代定年研究,其年代框架和层位划分是根据前人已有的成果^[26],以及野外土壤颜色观测加上不同气候代用指标的对比分析而获得。具体方法:将剖面磁化率和红度 a^* 的垂向变化与氧同位素曲线^[27] 进行对比来获得 AYTK 剖面的沉积年龄和层位。剖面描述和地层划分详见表 1 和图 2。

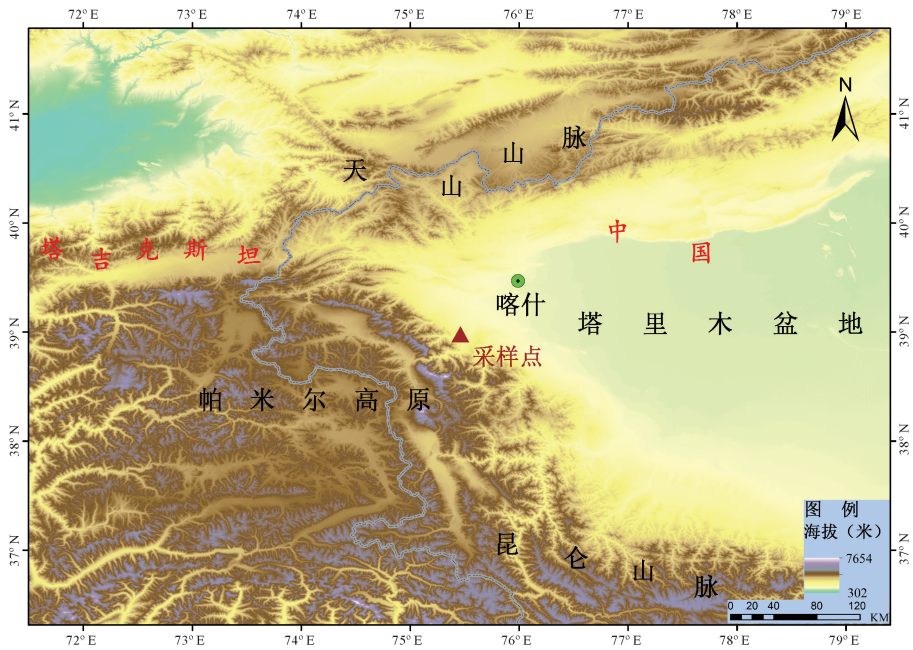


图 1 研究剖面位置图

研究区概况图所采用的国界数据源于国家基础地理信息中心发布的 1 : 400 万国家基础信息数据

Fig.1 Location of the research section and sampling site

表 1 帕米尔奥依塔克 AYTK 剖面地层特征

Table 1 Stratigraphic characteristics of the AYTK Profile in Pamir area, China

地层及符号	深度/m	特征描述
全新世土壤 (S0)	0~0.5	褐色、结构疏松多孔
黄土层 (L1)	0.5~2.3	棕黄色、结构紧密均一
古土壤 (S1)	2.3~4.0	浅红褐色、结构致密、无明显分层
黄土层 (L2)	4.0~	浅褐黄色、结构均一、较紧实

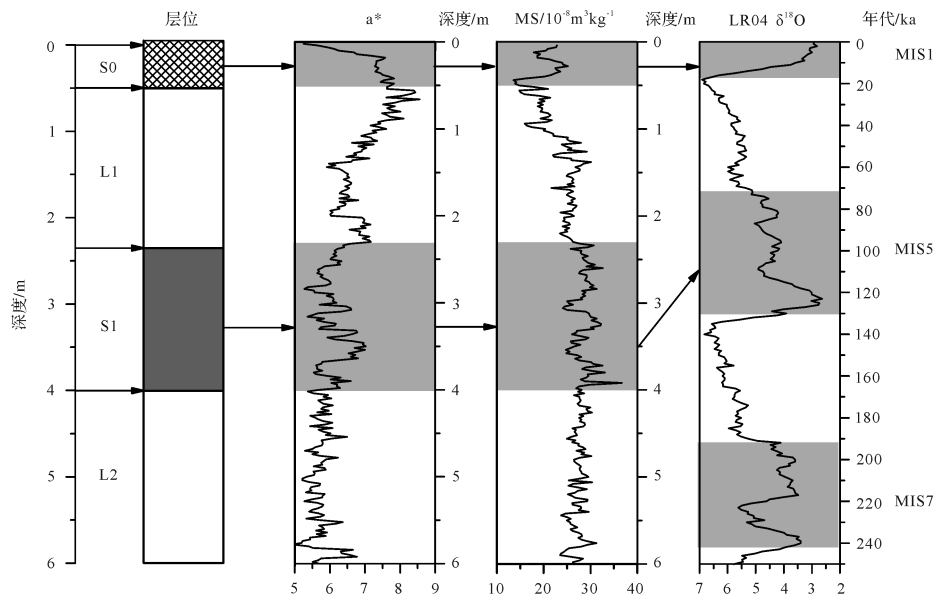


图 2 AYTK 剖面黄土—古土壤序列地层对比图(LR04 引自 Lisiecki *et al.*, 2005)

Fig.2 Stratigraphic correlation with oxygen isotope curve of AYTK loess-paleosol sequence (LR04 from Lisiecki *et al.*, 2005)

2 实验方法

目前对样品分别进行了色度、磁化率、CaCO₃ (%)和有机碳(TOC)指标的测试。色度指标用 X-Rite948 型分光色度计进行测量,测试参数为 CIE D₆₅ 标准光源(色温为 6 500 K),观察视野为 10°,孔径为 8 mm^[28]。样品前处理和测试简要流程如下:1)用玛瑙研钵将烘干的样品碾磨,并用 200 目的筛子过筛;2)使用标准校正白板(CR-A74 白色校正版,标准偏差<0.5%,色差<0.25CIELAB DE*)对仪器进行颜色系统校正;3)取 2~3 g 样品放置于玻璃板上压实、压平至无褶皱,但勿用力过度导致样品颗粒结构被破坏;4)在背景光源恒定的条件下,随机选择三个表面平整的区域测试三次,仪器自动求出三次测量的 a*、b*、L* 平均值。磁化率采用 MS2 型磁化率仪,对每个样品各测试三次,取其平均值^[29];最后计算出百分频率磁化率($X_{fr}\% = (X_{fr} - X_{lr})/X_{fr} \times 100\%$)。CaCO₃ (%)含量采用气量法^[30]。有机碳(TOC)通过重铬酸钾—硫酸滴定法来获取^[31]。详细的测试流程可见各参考文献,以上样品的测试工作均在兰州大学资源环境学院综合地化实验室完成。

3 结果

实验结果如图 3 所示。整个剖面亮度 L* 的平均值为 57.26,变化范围 52.50~64.42,变化幅度

22.70%,剖面自上而下呈现出亮度 L* 逐渐增大的趋势。其中黄土层 L1 的 L* 值最低,平均值 54.84,变化范围在 52.57~57.69 之间;在古土壤 S₀ 和 S₁ 中,亮度 L* 的平均值分别为 56.92 和 56.33;剖面层位整体上亮度 L* 由大到小依次为:S₀>S₁>L₁。

红色 a* 在整个剖面中变化特征明显,其值在 4.94~8.56 之间,平均值 6.32,变化幅度为 73.28%,明显大于亮度 L*。不同地层单元的 a* 值变化差异明显:其峰值出现在黄土层 L1,且在整个黄土层 L1 中 a* 由剖面自下而上呈现逐渐增大的趋势,曲线波动大,变化范围为 5.91~8.56,平均值 6.98,变化幅度 44.84%;相比之下,古土壤层 S1 则较低,曲线波动平缓,变化幅度不大,平均值为 6.10;古土壤 S₀ 的 a* 值平均值在整个剖面最高,为 7.09,变化幅度 49.14%;a* 值在剖面上从大到小依次为:S₀>L₁>S₁,整体表现出逐渐减小的趋势。相比于亮度 L* 和黄度 b*,剖面 a* 值变化幅度最大,对环境变化响应也更为敏感,可能包含了更多的古环境信息^[28]。

相比于 a* 来说,帕米尔 AYTK 剖面黄度 b* 值变化幅度较小,仅为 28.33%,其值介于 16.87~21.65 之间。最大值出现在黄土层 L₁ 中,曲线整体变化与 a* 相似,均与亮度曲线呈现大致相反的变化趋势。

其他气候代用指标的变化特征如图 3 所示:帕米尔 AYTK 剖面低频质量磁化率的变化范围在 13.54~36.71×10⁻⁸ m³·kg⁻¹ 之间,平均值为 26.72×10⁻⁸

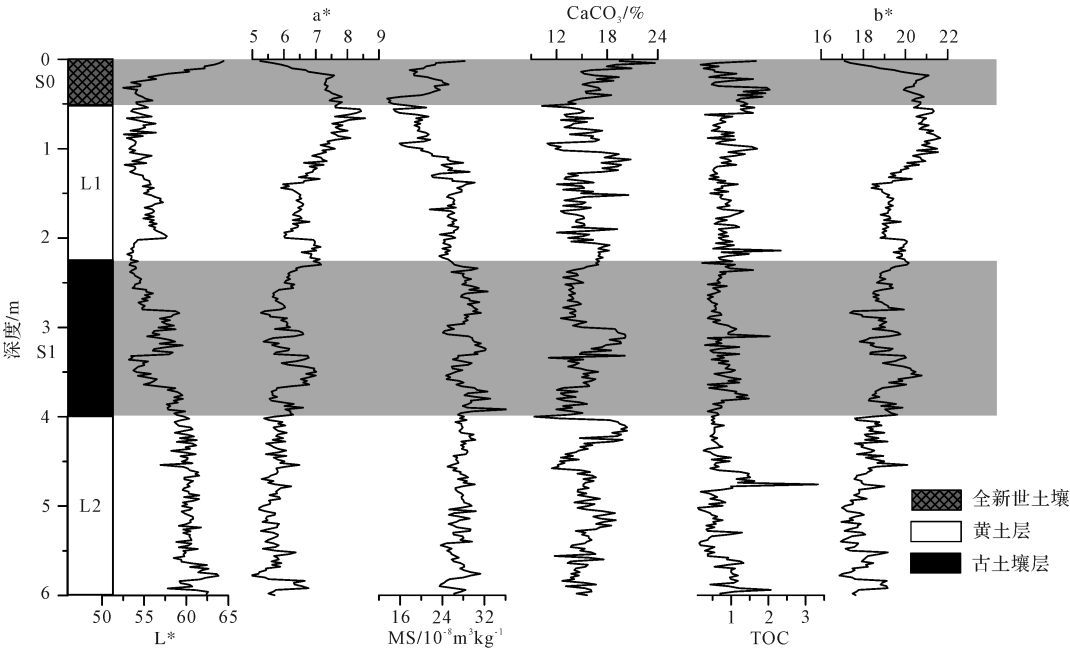


图 3 帕米尔黄土色度及各指标的变化曲线

Fig.3 The comparison of chromatic proxies and other indexes in the Pamir Section

$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 碳酸钙百分含量平均值 15.49%, 变化范围在 9.38%~23.66% 之间, 但剖面各层位之间整个曲线波动不明显, 呈现出“高频低幅”的变化特征; TOC 有机质含量较少, 平均含量仅为 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显示出整个剖面的 TOC 含量较低; 其中最大值 $3.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 出现在 4.76 m 处, 最小值在 5.02 m 处, 其值仅为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

4 讨论

黄土沉积物在地质历史时期由于受到当时气候和环境的影响, 其风化成壤强度在各个阶段不同, 从而使沉积物的原始物质在一定程度上发生改变, 如碳酸盐的沉积和淋溶、铁氧化物的转化、有机质的产生与分解等等, 进而使黄土剖面在外观上发生颜色的变化^[32]。

4.1 亮度 L^* 的意义

沉积物的粗糙度、湿度、有机质含量和碳酸盐含量等都会影响 L^* 的变化^[8], 在实验前处理阶段已将粗糙度和湿度通过物理方法使其影响降至最小。前人普遍认为黄土中碳酸盐矿物的存在对 L^* 具有促进增强作用, 而有机质则相反^[8], 同时颜色分量 a^* 、 b^* 对 L^* 也有一定的影响^[28]。鉴于此, 现对亮度 L^* 分别与碳酸钙、有机质含量以及 a^* 、 b^* 做相关性分析(图 4)。

结果显示亮度 L^* 与碳酸钙百分含量的相关系数

R^2 在不同地层表现有所不同, 由大到小依次是: $S_0 > L_1 > S_1$, 其 R^2 值分别为 0.329、0.065 和 0.010(图 4a), 但整体都不大; 与有机质含量的相关系数在各个层位中也都很小(图 4b), 和 a^* 、 b^* 的相关系数分别为 0.551、0.637(图 4c 和 d)。帕米尔 AYTCK 剖面碳酸钙百分含量平均值为 15.49%, 高于黄土高原地区, 但各个层位碳酸钙百分含量与 L^* 值并未表现出明显的相关性, 预示着该地区碳酸盐对 L^* 贡献不大, 这与苗运法等^[33]对西北地区现代沉积物的研究结果相似。在黄土高原地区, CaCO_3 含量的变化对区域的湿度状况具有一定的指示意义: 在气候条件好, 成土过程强的土壤发育时期, 由于区域内降水增多, 湿度高而发生淋溶作用, 使地层中 CaCO_3 含量降低; 相反, 较低的土壤湿度使残酸盐在原地保留, 从而使该层位表现为高值^[34]。但我们的研究结果显示在帕米尔地区亮度 L^* 与 CaCO_3 含量并未有明显的因果关系; 某些层位存在黄土层中碳酸盐含量高的特征(如 L_2), 而某些层位存在古土壤层中碳酸盐含量高的特征(如 S_0), 变化特征比较复杂。另据陈杰等^[24]人对帕米尔地区磁化率变化特征的研究中发现, 该地区主要是以原生的砂粒沉积物为主, 成壤作用比较微弱, 未经过长期的气候作用, CaCO_3 含量更多的可能来自于源区携带而来的原生碳酸盐物质, 而受气候与成壤作用较大的次生碳酸盐却相对较少。在干旱的高亚洲地区, Zan

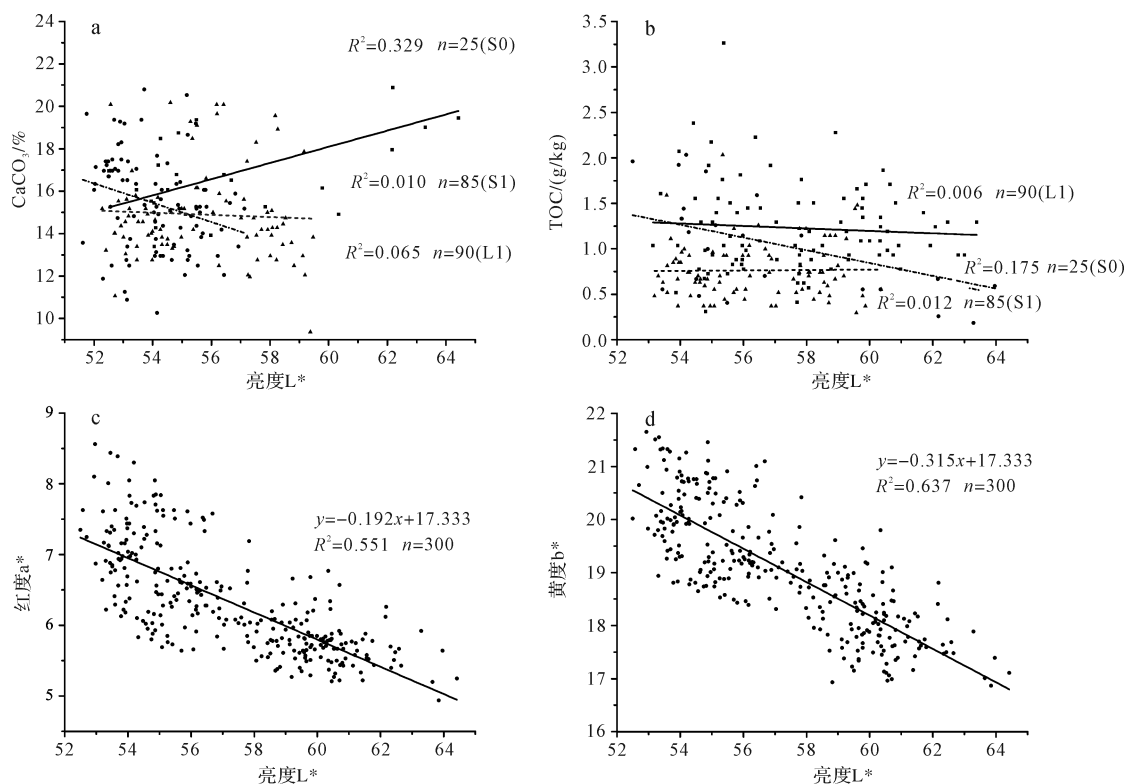


图4 帕米尔剖面黄土亮度 L^* 与碳酸钙、有机质含量以及 a^* 、 b^* 之间的线性关系

Fig.4 Linear relationships among L^* , carbonate content, organic matter, a^* and b^* in Pamir loess-paleosol sequence

et al.^[35] 也发现碳酸钙与砂粒级的含量呈现出一定的负相关关系,这都与黄土高原地区明显不同。加上地处极端干旱气候条件下的帕米尔高原,研究区年均降水量少,由降水增多而导致的淋溶作用鲜有发生。因此,在黄土高原地区碳酸盐含量与气候条件的这种关系在 AYTK 剖面并不适用,用碳酸盐百分含量来指示亮度 L^* 的变化在该地区有一定的局限性。

黄土沉积物中有机质是一定生物和气候环境下的产物,在一定条件下,可反映地表植被的发育状态和生物量的大小,而这都与降水量的多少有直接关系。在气候湿润且降水量多时,植被生长茂盛,有利于有机质的产生和积累;而在气候寒冷干燥且降水量少的时期,植被稀疏,不利于有机质的产生和积累^[36]。分析 L^* 与 TOC 含量之间的关系发现帕米尔地区有机质平均含量仅 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,整个剖面的 TOC 含量较低,并且变化基本没有超过一个数量级;与 L^* 整体相关系数仅为 0.019,在各个层位中的相关性也较低。如此小幅度的变化和微弱的相关性难以引起亮度 L^* 的改变,有机质含量的变化对亮度 L^* 贡献微弱。处于极端干旱气候条件下的帕米尔地区,年降水量少,土壤的化学风化作用较弱,植被覆盖度低,

这样的气候环境不利于有机质的产生和积累,从而使该地区的 TOC 含量整体都处于一个较低的水平。而在与 a^* 、 b^* 的相关性分析结果中,我们发现 a^* 、 b^* 的变化对亮度 L^* 的影响程度最大; L^* 与 a^* 、 b^* 呈明显的负相关关系,且相关系数达到 0.551 和 0.637,成为影响 L^* 的主要因素。

综上所述,亮度 L^* 与碳酸钙百分含量相关性微弱,有机质由于整体含量偏小,对 L^* 贡献较小;亮度 L^* 的相关系数很大程度上受红度 a^* 和黄度 b^* 颜色分量的影响, a^* 、 b^* 成为影响亮度 L^* 的主因,进而可能与影响 a^* 和 b^* 的物质相对含量有关。亮度 L^* 所指示的古环境意义也有待进一步研究。

4.2 红度 a^* 和黄度 b^* 的意义

前人的研究结果表明,在排除水分影响的情况下,沉积物中铁氧化物的种类和含量(赤铁矿和针铁矿百分含量的变化)是引起颜色分量 a^* 、 b^* 发生变化的主因^[6,8,37],而碳酸盐和有机质的变化对 a^* 、 b^* 影响较小^[8]。本文将 a^* 、 b^* 分别同碳酸钙、有机质做相关性分析后(图5),得出与前人相同的结论:认为在帕米尔地区碳酸盐和有机质对土壤的 a^* 、 b^* 变化影响微弱。在风化成壤过程中,大量易淋溶及易分

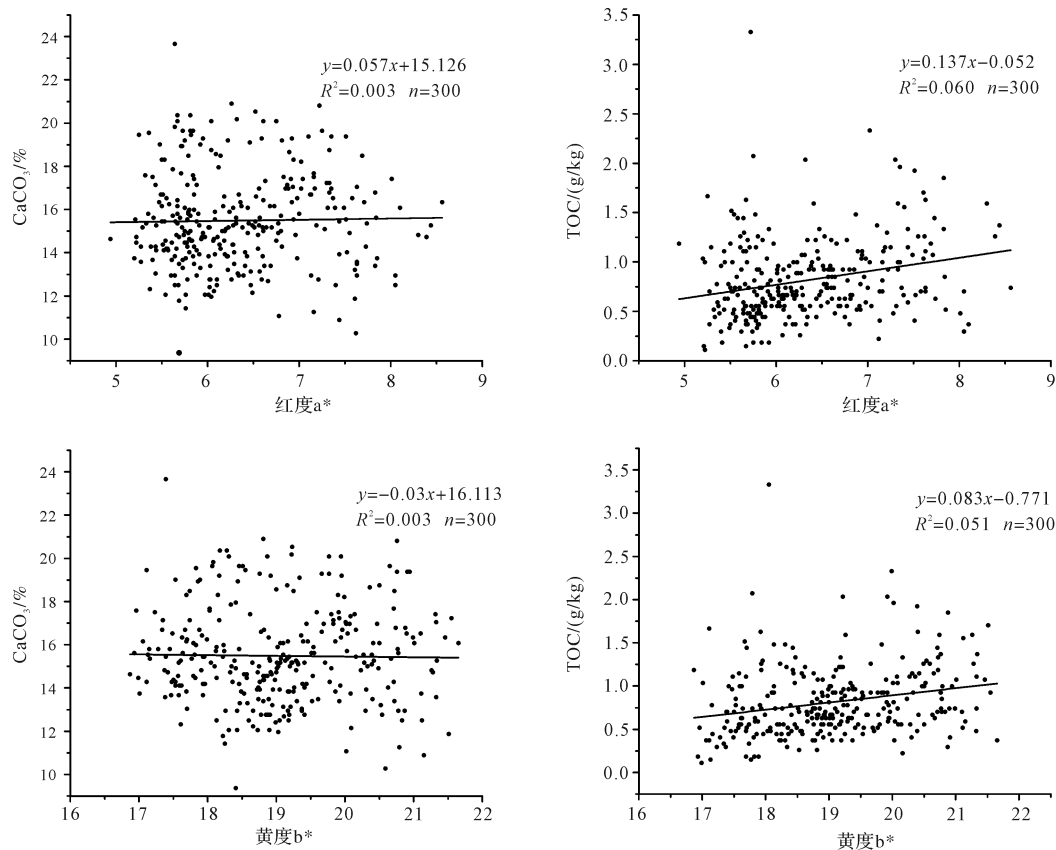


图 5 帕米尔黄土 a^* 、 b^* 与碳酸钙、有机质含量之间的线性关系

Fig.5 Linear relationships between a^* , b^* and carbonate content, organic matter in Pamir loess-paleosol sequence

解的矿物和组分发生淋失,黄土中的 Fe 作为一种不易迁移的元素往往难以发生明显的迁移,但其形态和价态却容易随着沉积环境的不同而发生转变,多以铁氧化物(如赤铁矿、针铁矿、磁铁矿等)的形式在黄土中发生累积,进而使得黄土的颜色发生变化,成为影响 a^* 、 b^* 变化的主因,但具体是哪种铁矿物占主导作用还有待更深一步的研究。

帕米尔 AYTK 剖面色度值 a^* 、 b^* 均表现出明显的系统性变化特征,黄土层(L_1)表现出较高的红度和黄度值,古土壤层(S_0 、 S_1)为低值,这与磁化率的变化特征(黄土层为低值,古土壤层为高值)正好相反(图 3)。通过系统测试发现 a^* 和 b^* 的相关系数达到 0.892(图 6a),说明引起 a^* 和 b^* 变化的铁氧化物可能相同,并且受控于相似的气候条件。

黄土磁化率作为常用的气候替代指标,在中亚干旱区气候演变的研究中应用广泛^[19-24],但由于该地区磁化率形成机制复杂,需与其他气候代用指标的结合使用才能更好的反映研究区古气候变化过程。从图 3 各个指标变化曲线看,帕米尔地区磁化率与 a^*

之间存在着良好的对应关系,波峰波谷的旋回变化存在着明显的正负对应关系;为更加精确的分析它们之间的关系,对 a^* 、 b^* 和 L^* 与磁化率进行相关性分析,以明确色度参数的气候意义。结果显示(图 6):帕米尔黄土—古土壤序列中 a^* 、 b^* 与磁化率呈负相关关系,相关系数分别为-0.582 和-0.406,与亮度 L^* 相关性微弱,仅为 0.120。何柳等^[8]研究指出土壤中磁铁矿和赤铁矿的含量共同影响着磁化率的变化,但磁铁矿的贡献较大;而 a^* 值对赤铁矿质量分数反映敏感,但其含量增加到 50% 以上时,对 a^* 的影响就甚微;而磁铁矿对 a^* 值的影响不明显。虽然赤铁矿和磁铁矿都与成壤作用有关,但它们在土壤中的分布和含量与成土气候环境密切相关,对温度和降水变化存在明显差别:在黄土—古土壤序列中,赤铁矿利于在干旱温暖的氧化环境下生成,而湿润潮湿的环境则对磁铁矿的生成有利^[37]。

研究区 AYTK 剖面的平均磁化率为 $26.72 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,年均气温 3.5°C ,年均降水量只有 74.39 mm,较差的水热组合条件使得现代成壤作用较弱。

另一方面,作为成壤作用大小量度的一项指标,百分频率磁化率($\chi_{fd}\%$)值的大小可以用来近似反映该区域成壤作用的状况^[38]。测量发现 AYTK 剖面百分频率磁化率平均值仅为 0.69%,含量较少,且剖面各个层位之间变化幅度不大,说明该地区成壤作用一直很弱。在对帕米尔地区黄土磁性特征进行研究时,陈杰等^[24]和何毅^[26]认为该地区主要是以原生的磁性矿物为主,且剖面中反铁磁性矿物含量较高(如赤铁矿、针铁矿等),对磁化率影响较大的亚铁磁性矿物(如磁铁矿)产生了一定的影响。加之帕米尔地区极

端干旱的气候条件,成壤作用不强,有利于对 a^* 值贡献较大的反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿等)生成,而使磁铁矿的形成受限,因此出现当红度 a^* 为高值时,磁化率值却很低的现象。综上所述,帕米尔 AYTK 剖面红度 a^* 对气候变化反映较 L^* 、 b^* 敏感,但也存在着一定的局限性,结合磁化率等气候代用指标,能更好的辨别黄土—古土壤层、记录区域内土壤成土过程以及气候的演化等情况。单一的磁化率或色度在解释气候变化时都有一定的局限性,两者的结合能够更好的反映古环境信息。

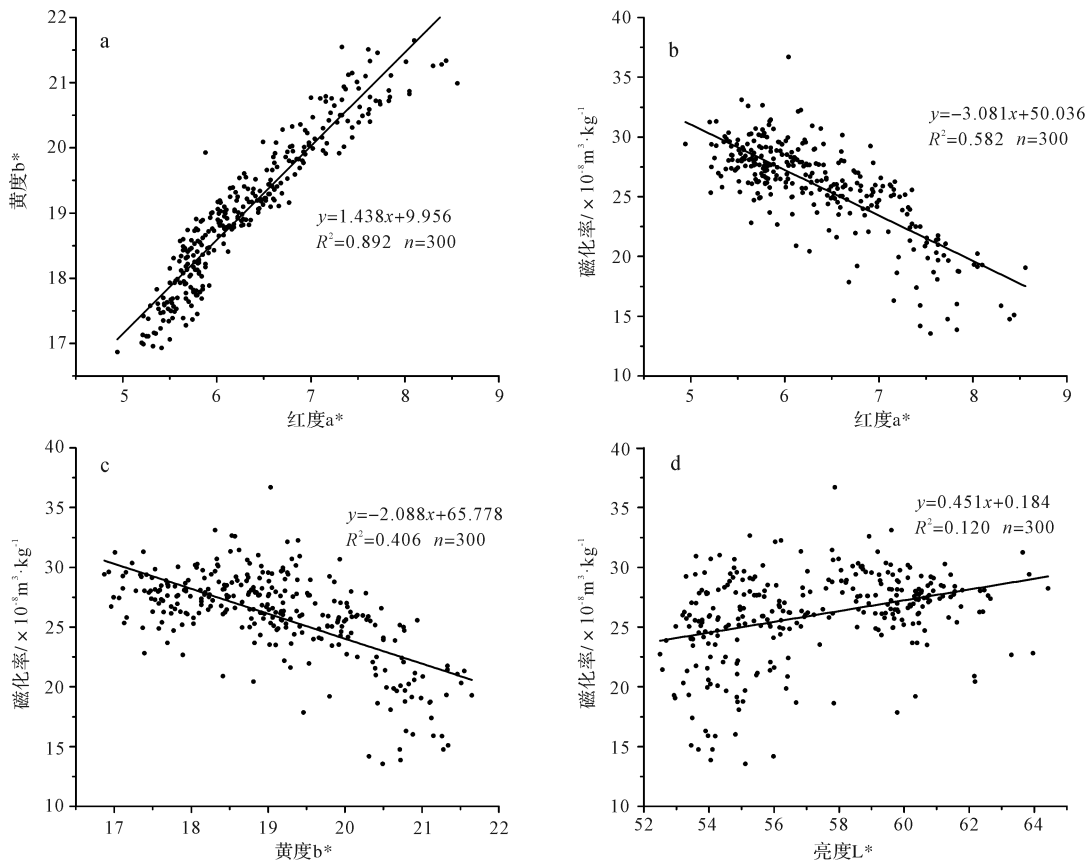


图6 帕米尔黄土 a^* 、 b^* 以及与磁化率之间的线性关系

Fig.6 Linear relationships between a^* , b^* and magnetic susceptibility in Pamir loess-paleosol sequence

4.3 帕米尔 AYTK 黄土色度变化与气候演变

帕米尔 AYTK 黄土剖面色度指标的变化与黄土—古土壤地层具有良好的对应关系,其实质是气候因素的变化导致其指标发生变化。在古土壤 S_1 层, L^* 为高值(呈降低趋势), a^* 和 b^* 均为低值(呈升高趋势),表明在该阶段气候逐渐变暖,气温上升,降水增加,从而导致生物风化和土壤成壤作用逐渐变强。由成壤作用生成的磁性矿物(磁铁矿)增加,而对另一种磁性矿物(赤铁矿)生成不利;这一点可由在该

时期磁化率一直处于高值,而红度 a^* 为低值得到很好的验证;黄土层 L_1 时期, a^* 和 b^* 逐渐增大,相反的,此时磁化率却处于低值,并有逐渐减小的趋势;综合其指标变化表明该时期气候相对较冷,生物风化作用弱,降水稀少的环境特征;古土壤 S_0 时期, L^* 呈逐渐上升趋势, a^* 和 b^* 却逐渐减小,磁化率在该时期呈现“一峰两谷”的态势,表明该地区在这一历史时期气候经历了由“冷干—暖湿—冷干”的变化,只是变化程度不同而已。上述结论与前人在西风区通过

其他沉积物所记录的环境演化结果基本相一致,遵循了全新世气候变化的西风模式^[39-40]。

综上所述,色度作为一种描述区域气候环境变化的代用指标,在黄土—古土壤序列研究中与其他气候常用替代指标的综合使用,能够更加准确的恢复和重建该区古环境变化的时空特征。

5 结论

(1) 帕米尔 AYT 黄土剖面色度指标的分析表明,亮度 L^* 受颜色分量 a^* 、 b^* 的影响较大,而受碳酸钙含量和有机质含量的影响微弱,其所指示的古环境意义有待进一步研究。

(2) 红度 a^* 和黄度 b^* 均表现出明显的系统性变化,且具有很好的相关性,认为它们受控于相似的气候因子,具有较为一致的致色物质。

(3) 红度 a^* 主要与土壤中铁氧化物的种类和含量有关,但具体的铁矿物成分还有待更深一步的研究。

(4) 在帕米尔地区色度 a^* 对气候变化响应敏感,与磁化率等替代气候指标结合使用,能更综合、准确地恢复该地区古气候的变化过程。

致谢 感谢范喆、徐浩杰、梁烨、王琳栋、陈雨以及天津工业大学田洪阵老师在野外采样和实验室的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 柯夫达 B A. 土壤学原理(上册)[M]. 陆宝树,周礼恺,吴珊眉,等译. 北京:科学出版社,1981:19-20. [Kovda B A. Agrology principle[M]. Lu Baoshu, Zhou Likai, Wu Shanmei, et al, trans. Beijing: Science Press, 1981: 19-20.]
- [2] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:1-481. [Liu Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-481.]
- [3] 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 Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, 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.]
- [4] 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 Wei, Wang Qi, Zhao Qiyuan, et al. Color variation of surface sediment in South Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 1990, 14(3): 31-35.]
- [5] 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),2001,31(增刊1):175-181. [Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Studies on the quali-

- tative and semi-quantitative relationship research between the topsoil color and climate[J]. Science in China (Series D), 2001, 31 (Suppl.1): 175-181.]
- [6] 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 Sciences, 2011, 40(6): 1131-1138.
- [7] Ding Z L, Yang S L, Hou S S, et al. Magnetostratigraphy and sedimentology of the Jingchuan red clay section and correlation of the Tertiary eolian red clay sediments of the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B4): 6399-6407.
- [8] 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 Liu, Sun Youbin, An Zhisheng. Changing color of Chinese loess: controlling factors and paleoclimatic significances[J]. Geochimica, 2010, 39 (5): 447-455.]
- [9] 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 Min, Pang Jiangli, Huang Chunchang, 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 Edition), 2010, 38(5): 92-97.]
- [10] 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 Pengkun, Pang Jiangli, Huang Chunchang, 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.]
- [11] 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.
- [12] 徐丽,苗运法,方小敏,等. 青藏高原东北部西宁盆地中始新世—渐新世沉积物颜色与气候变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(1):12-19. [Xu Li, Miao Yunfa, Fang Xiaomin, et al. Middle Eocene-Oligocene climatic changes recorded by sedimentary colors in the Xining Basin, in northeastern Tibetan Plateau, NW China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(1): 12-19.]
- [13] 宋春晖,白晋锋,赵彦德,等. 临夏盆地 13~4.4Ma 湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨[J]. 沉积学报,2005,23(3):507-513. [Song Chunhui, Bai Jinfeng, Zhao Yande, et al. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4.4 Myr in Linxia Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 507-513.]
- [14] 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,2014,5(2):67-75. [Li Yue, Song Yougui, Wang Qiansuo. Chroma characteristics in the Zhaoosu loess section and its paleoclimatic significance[J]. Journal of Earth

- Environment, 2014, 5(2): 67-75.]
- [15] 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 Feng, Wang Hao, Qin Yifan, 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.]
- [16] 方小敏,潘保田,管东红,等. 兰州约60ka以来夏季风千年尺度不稳定性研究[J]. 科学通报, 1999, 44(4): 436-439. [Fang Xiaomin, Pan Baotian, Guan Donghong, et al. The instability research on summer wind since 60ka years in Lanzhou [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(4): 436-439.]
- [17] 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 Yimeng, Chen Xingsheng, Gong Huili, et al. Soil color-a new sensitive indicator for climatic change [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(3): 309-313.]
- [18] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. Nature, 1990, 346(6286): 737-739.
- [19] 贾佳,刘现彬,夏敦胜,等. 坎苏剖面记录的西天山地区黄土磁学性质及其控制因素初探[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 124-132. [Jia Jia, Liu Xianbin, Xia Dunsheng, et al. Magnetic property and its dominant fact of loess strata in western Tianshan area recorded by Kansu section [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1): 124-132.]
- [20] 贾佳,夏敦胜,魏海涛,等. 阿西克剖面记录的西天山地区黄土磁学性质及古气候意义初探[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1406-1415. [Jia Jia, Xia Dunsheng, Wei Haitao, et al. Magnetic property and paleoclimatic implication recorded by AXK sequence in West Tianshan area [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1406-1415.]
- [21] 夏敦胜,陈发虎,马剑英,等. 新疆伊犁地区典型黄土磁学特征及其环境意义初探[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 902-910. [Xia Dunsheng, Chen Fahu, Ma Jianying, et al. Magnetic characteristics of loess in the Ili area and their environmental implication [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(5): 902-910.]
- [22] 叶玮. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 380-386. [Ye Wei. Study on magnetic susceptibility of loess and paleosol sequences in westerly region of Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 380-386.]
- [23] 史正涛,董铭,方小敏. 伊犁盆地晚更新世黄土—古土壤磁化率特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 7-10. [Shi Zhengtao, Dong Ming, Fang Xiaomin. The characteristics of later Pleistocene loess-paleosol magnetic susceptibility in Yili Basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2007, 43(2): 7-10.]
- [24] 陈杰,杨太保,曾彪,等. 中国帕米尔地区黄土磁化率特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 761-769. [Chen Jie, Yang Taibao, Zeng Biao, et al. Magnetic susceptibility features and influencing factors in Pamir, China [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 761-769.]
- [25] 曾磊. 基于RS和GIS的东帕米尔高原冰川近40年来的变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Zeng Lei. The glacier variations research in the eastern Pamirs plateau during the last 40 years [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]
- [26] 何毅. 俄罗斯亚速海地区与中国帕米尔地区 MIS5 以来黄土磁性特征及环境演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [He Yi. The loess research on magnetic characteristics and environmental evolution in Azov region of Russia and Pamir region of China since MIS5 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.]
- [27] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. Paleoceanography, 2005, 20(1): PA1003.
- [28] 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 Peihong, Yang Taibao, Tian Qingchun, et al. Chroma characteristics in the loess-paleosol at Jingyuan section and its signification to paleoclimate [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(2): 15-23.]
- [29] 田庆春,杨太保,张述鑫,等. 青藏高原腹地湖泊沉积物磁化率及其环境意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 143-150. [Tian Qingchun, Yang Taibao, Zhang Shuxin, et al. Magnetic susceptibility and its environmental significance of lake sediments in Tibet Plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 143-150.]
- [30] Bascomb C L. A calcimeter for routine use on soil samples [J]. Chemistry and Industry, 1961, 45: 1826-1827.
- [31] Shi P H, Yang T B, Tian Q C, et al. Loess record of climatic changes during MIS 12-10 in the Jingyuan section, northwestern Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary International, 2013, 296: 149-159.
- [32] 陈旸,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]. 地质评论, 2002, 48(1): 38-43. [Chen Yang, Chen Jun, Ji Junfeng, et al. Whiteness intensity in Luochuan loess sequence (Shaanxi province) and paleoclimatic implications [J]. Geological Review, 2002, 48(1): 38-43.]
- [33] 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 Yunfa, Yang Shengli, Zhuo Shixin, 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.]
- [34] 赵景波. 黄土地层中的 CaCO_3 与环境[J]. 沉积学报, 1993, 11(1): 136-142. [Zhao Jingbo. CaCO_3 and sedimentary environment of loess strata [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(1): 136-142.]
- [35] Zan J B, Fang X M, Yang S L, et al. Evolution of the arid climate in High Asia since ~1Ma: evidence from loess deposits on the surface and rims of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 2013, 313-314: 210-217.
- [36] 谢远云,李长安,周嘉,等. 陇西民和黄土 CaCO_3 和有机碳总量

- 的含量变化及其气候指标的局限性[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 99-104. [Xie Yuanyun, Li Changan, Zhou Jia, et al. Variations of the CaCO_3 and total organic carbon contents in the Minhe loess and their limitations as climatic proxies[J]. *Geology in China*, 2003, 30(1): 99-104.]
- [37] Torrent J, Barrón V, Liu Q S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(2): L02401.
- [38] 刘秀铭, 刘东生, Heller F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换[J]. 第四纪研究, 1990, 10(1): 42-50. [Liu Xiuming, Liu Dongsheng, Heller F, et al. Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(1): 42-50.]
- [39] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式: 以新疆博斯腾湖记录为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881-887. [Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia: Case study on Bosten lake, Xinjiang, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 881-887.]
- [40] 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 西风区全新世以来湖泊沉积记录的高分辨率古气候演化[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 1042-1049. [Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, et al. A high-resolution climatic change since Holocene inferred from multi-proxy of lake sediment in westerly area of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9): 1042-1049.]

Chroma Characteristics and Its Paleoclimatic Significance in Pamir Loess Section, China

CHEN Jie, YANG TaiBao, ZENG Biao, HE Yi, JI Qin

Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Loess is one of the most detailed terrestrial widespread high resolution archives of climate and environment change, the study of the loess-paleosol sequences in Pamir allows one to assess the changes in the environment and pedogenesis over the interglacial and glacial epoch of the Quaternary period. However, deciphering such amount information requires multi-proxy to investigate the temporal process of aeolian dust and paleoclimate, which is important for understanding the forcing mechanisms of past climate in Pamir region and also for predicting the future regional climate changes under the global warming background. Soil color, one of the sensitive proxies for paleoclimate, has been widely used as an indicator of chemical and biological properties as well as the soil-forming process in the loess study. In view of above analysis, combined with magnetic susceptibility, calcium carbonate and organic matter proxies, this paper measured the chromatic proxies to investigate the spatial and temporal variations of soil color and their major controlling factors at the Pamir loess section dominated by westerlies. The results show that the introduction of chroma could compensate for defects in paleoclimate reconstruction when magnetic susceptibility cannot record the process of climate change and soil development well. In the process of loess accumulation, lightness L^* , to a large extent, was dominated by color components a^* and b^* , furthermore, may be correlated to the substance that affect color component a^* , b^* . Redness a^* and yellowness b^* were controlled by the similar climatic factors and might process the consistent color material because of their relatively high correlation. Largely influenced by the categories and contents of iron oxide and correspond well with magnetic susceptibility, Redness a^* could indirectly reflect the climate change and pedogenic environment in this region. The relationship between chromatic proxies and magnetic susceptibility indicate that magnetic susceptibility and a^* show a positive correlation, for L^* it is a negative one; this is due to the fact that their dominating matter is different. Only the combination between chromatic proxies and other climatic proxies, could we reconstruct a reasonable and reliable process of climate change in the Pamir region.

Key words: chroma ; magnetic susceptibility; loess-paleosol; Pamir