

引用格式:马欢欢,戴霜,马晓军,等. 2026. 祁连山西段表土磁化率、色度特征与环境意义[J]. 沉积学报, 44(2): 425-440.

MA HuanHuan, DAI Shuang, MA XiaoJun, et al. 2026. Magnetic Susceptibility and Chromaticity Characteristics of Surface Soil in the Western Qilian Mountains and Their Environmental Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 425-440.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.034

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.034

祁连山西段表土磁化率、色度特征与环境意义

马欢欢^{1,2}, 戴霜^{1,2}, 马晓军^{1,2}, 刘福田^{1,2}, 丁仲昭^{1,2}, 曹鹏举^{1,2}, 方信楠^{1,2}

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃省西部矿产资源重点实验室, 兰州 730000

2. 自然资源部黄河上游矿产资源成矿与勘查重点实验室, 兰州 730000

摘要 【目的】研究不同环境沉积物的磁化率和色度的变化机制, 对于利用该指标进行古气候恢复具有重要意义。【方法】通过对我国西北内陆腹地祁连山西段表土磁化率和色度的采样测量, 分析了其随降水、气温和海拔的变化特征, 并尝试建立了磁化率和色度与气候因子及海拔的函数关系。【结果】(1)磁化率与年均气温、年均降水量呈非线性变化关系, 存在一个温度和降水量阈值(约0℃和300mm), 低于该阈值磁化率与其成反比, 反之成正比; 磁化率与海拔呈线性负相关关系, 在低海拔区域(1600~3300m)尤其敏感。通过回归分析建立了祁连山西段磁化率与年均降水量、年均气温和海拔的函数关系。(2)色度(亮度、红度、黄度)与气温、降水无明显关系; 亮度与海拔呈较显著负相关, 且在低海拔地区(1600~3300m)更敏感。【结论】相较而言, 磁化率比色度更能反映祁连山西段气候及海拔变化信息; 在低海拔区(1600~3300m)亮度与海拔关系更显著, 黄度、磁化率次之; 在 high 海拔区(3700~4300m)红度、亮度与海拔关系更显著。

关键词 西祁连山; 表土; 磁化率; 色度; 环境意义

第一作者 马欢欢, 女, 1996年出生, 硕士研究生, 地质学, E-mail: 3312004437@qq.com

通信作者 戴霜, 男, 教授, E-mail: daisher@lzu.edu.cn

中图分类号: P532 P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2026)02-0425-16

0 引言

磁化率、色度常作为重要的气候代用指标, 被广泛用于古气候环境的恢复。磁化率是沉积物自身所含磁性物质在外加磁场作用下产生的磁化强度与外磁场强度的比值, 主要与磁性矿物的类型、含量及粒径相关。在地表环境下, 气候决定了母岩风化及其风化产物搬运、沉积、成壤等过程的磁性矿物性质, 因而, 不同气候环境背景下物质的磁性矿物特征不同, 磁化率的变化机制及其气候环境意义比较复杂(Thompson and Oldfield, 1986; 吕厚远等, 1994; 刘青松和邓成龙, 2009; Zan *et al.*, 2011; 李平原等, 2012; 宋扬等, 2012; Dai *et al.*, 2016)。大多数情况下, 温暖湿润的气候条件有利于生成超顺磁和单畴的磁性矿物, 从而使磁化率增强(Heller and Liu, 1986; Maher *et al.*, 1994)。这在中国黄土高原的黄土—古土壤系

列中尤其明显, 由成土作用产生的细粒磁性矿物主导着土壤磁性, 因而可以用中国黄土高原的黄土—古土壤序列的磁化率指示东亚夏季风的强弱(An *et al.*, 1991; 刘秀铭等, 1993; 安芷生等, 2006; 郭雪莲等, 2011); 而在其他沉积物中的变化机制及气候意义还尚不明确。现代表土磁化率与气候因子关系的研究发现, 磁化率与气温和降水的关系在不同地区表现迥异: 在黄土高原及其以东地区, 表土磁化率和年均降水量、年均气温呈明显的正相关关系, 在长江流域以南地区为负相关关系, 显示中国东部季风区表土磁化率与降水量的关系存在一个阈值, 大概在1100~1500mm时亚铁磁性矿物增多, 二者呈正相关关系(Thompson and Oldfield, 1986; Maher *et al.*, 1994; Balsam *et al.*, 1999; Long *et al.*, 2011), 而在此之上亚铁磁性矿物转变为顺磁性(纤铁矿)和反铁磁性(针铁矿)等矿物, 二者呈负相关关系(华南地区)(刘

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-03-01; 录用日期: 2024-05-07; 网络出版日期: 2024-05-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0704); 国家自然科学基金项目(41972213)

秀铭等,2012);在东部沿海地区,频率磁化率与降水量的关系更为敏感(邱世藩等,2014)。在黄土高原以西地区,新疆及其周边地区表土磁化率变化则复杂多样(Thompson and Oldfield, 1986),祁连山以北的戈壁沙漠地区,在年降水量小于200~300 mm时,表土磁化率与降水量没有明显的关系,但大于200~300 mm时呈正相关关系(李平原等,2013),频率磁化率表现得更为明显(魏海涛等,2008);在塔里木盆地南部,表土磁化率与年均气温和年均降水量无明显关系(Zan *et al.*, 2011),在天山地区主要与风力强弱(搬运的外来磁性颗粒的多少)有关(郭雪莲等,2011;Zan *et al.*, 2012)。而磁化率与海拔的关系,仅对塔里木盆地南部表土做过探索,显示磁化率随海拔的升高而减小(Zan *et al.*, 2011)。

色度是度量沉积物颜色的指标,主要与所含有有机质、矿物质、水分以及生物活动等有关。从全国土壤的规律分布可以看出,色度具有明显的区域性,降水、气温不同,土壤的颜色也存在很大差异(杨胜利等,2001;苗运法等,2013;严永耀等,2017)。20世纪60年代以前已经开始研究土壤颜色定量化及其与致色矿物、环境的关系,特别是土壤颜色与铁氧化物、有机质的关系,以及土壤颜色和气候关系。色度指标包括红度(a^*)、黄度(b^*)和亮度(L^*):红度主要受控于赤铁矿,赤铁矿可以在过量的水(或湿度高)、热环境中由铁的水合物氧化而成(Torrent *et al.*, 1983; Fernandez *et al.*, 1988; Sun *et al.*, 2011),较高的红度值一般指示蒸发量大于降水量的干燥温暖气候;黄度主要受针铁矿影响(潮湿的环境中经强磁性矿物还原而成)(Chen *et al.*, 2010),较高的黄度值常指示易于针铁矿形成的湿润气候;亮度反映沉积物的明亮程度,主要受碳酸盐和有机质含量影响,随着碳酸盐(易形成于干旱气候环境)含量增加而变亮,随有机质(温度湿润环境)含量增加而变暗(Fernandez *et al.*, 1988; Balsam *et al.*, 1999; Giosan *et al.*, 2002; 吴艳宏和李世杰,2004; Sun *et al.*, 2011; 田庆春等,2012; 苗运法等,2013)。根据前人研究,在半湿润—湿润地区,红度与降水、气温表现出良好的正相关关系,在西北干旱—半干旱地区红度对于气候变化不敏感(杨胜利等,2001);而在对新疆青海地区表土色度研究中发现红度、黄度、亮度与降水呈负相关关系,与气温无明显关系(苗运法等,2013)。与磁化率一样,色度也存在地区迥异性,由于成壤环境、母岩类型等

的差异,色度对不同区域的敏感性也不同。

综上所述,磁化率、色度作为气候代用指标,它们与气候环境因子之间的关系需更多的研究资料来分析。祁连山因其独特的地理位置和地形地貌,是开展表土磁化率和色度变化机制研究的理想地区。前人已用树木年轮(Gou *et al.*, 2005)、孢粉(Zhang *et al.*, 2018)、冰芯(Yao *et al.*, 1996)、粒度(艾丽等, 2010)、有机碳(邬光剑,2001)等指标积累了祁连山地区大量的降水、气温、湿度等近现代气候变化研究资料,为开展磁化率、色度指标变化提供了参考资料。本文通过对祁连山西段表土样品进行磁化率、色度测量,结合该区域的年均降水量、年均气温和海拔资料,尝试构建磁化率、色度指标与气候因子、海拔之间的关系,为祁连山西段及青藏高原周边地区的气候环境变化研究提供参考,也可为研究过去气候环境变化提供依据。

1 研究区概况

祁连山地处青藏高原东北边缘地区($35^{\circ}50' \sim 39^{\circ}19' N$, $94^{\circ}10' \sim 103^{\circ}04' E$),东西长约800 km,南北宽200~400 km,平均海拔4 km以上,与河西走廊相比,相对高差平均在2 600 m以上,整体呈北西—南东走向。祁连山位于东部季风区与西部干旱区的过渡地带,冬季盛行西北寒冷气流,夏季盛行东南暖湿气流,气候类型主要包括温带大陆性气候、高原大陆性气候和高寒半干旱气候,年均气温低于 $4^{\circ}C$,年降水达400 mm,由东向西气温逐渐降低、降水逐渐减少。

研究区域主要在祁连山西段,该地区长期受青藏和内蒙古两大高原荒漠气候以及西风环流的影响,对气候的变化敏感,属于高寒半干旱气候(车宗玺等,2018)。祁连山西段年均气温多在 $-3^{\circ}C$ 以下,几乎没有无霜期(张卫国,2023);降水量(低于100 mm)远低于祁连山东部地区,年蒸发量则大于东段(张军周,2018)。降水量的空间差异造成草原、草甸植被覆盖东多西少。研究区由北向南主要包括走廊南山、托勒山、托勒南山、大雪山、野马南山、党河南山等山系;由黑河谷地、托莱河谷地、疏勒河谷地、哈拉湖盆地、喀克吐郭勒谷地、肃北盆地、党河盆地等形成了盆谷相间的地貌格局;分布着石羊河、黑河、托来河、疏勒河、党河、哈尔腾河、鱼卡河、塔塔棱河、阿让郭勒河等多条水系。研究区土壤类型多样,主要包括山地棕钙土、山地栗钙土、山地草原土、山

地灰褐土、山地草甸土,局部分布有高山荒漠石质土和高山冰沼土,且北坡主要分布有棕荒漠土带—山地灰钙土带—山地栗钙土带—高山寒漠土带,南坡主要分布有灰棕荒漠土带—高山棕钙土带—高山寒漠土带(陈慧等,2018;杨海江,2023)。祁连山西段植被分布有高原河谷灌丛(主要优势种有助果沙棘(*Hippophae neurocarpa*)、具鳞水柏枝(*Myricaria squamosa*)、西北沼委陵菜(*Potentilla salesonviana*)等)、高寒草原(紫花针茅(*Stipapurpurea*)是主要优势种)、高寒草甸(优势种以蒿草为主)等(陈桂琛等,1994)。

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集

采样点位于北祁连西段及山前的嘉峪关、玉门等地和南祁连党河南山的清水沟、乌里沟等地区(图1a),地理范围为38°~40° N、95°~98° E,海拔1 500~4 300 m。样品采集时选择人类活动影响较小、地形稳定平坦、潜育化作用或水流扰动影响较弱的地区,首先对样点周边的环境进行观察,开挖采坑后去除地表1.0~1.5 cm的土壤,用不锈钢铁锹采集1.5~10 cm的土壤装入布袋内,样品为混合样品,重约3 kg,由3个子样混合而成。表土采集环境多为荒漠和戈壁,样品多沿山坡按照一定的海拔(50~100 m;图1b,c)和距离(平坦地域20~100 km;图1c)采集,保证了样品的空间分布代表性,共采集样品53个。本文通过ArcMap进行克里金插值得到了祁连山西段表土分布的年均气温(图2a)、年均降水量(图2b)、海拔(图2c)的等值线图。

2.2 表土特征

将每个样品与孟塞尔比色卡对比,结果显示51个样品呈黄棕色、2个样品呈深灰色,样品颜色深浅不一。根据土纲(中国科学院南京古土壤所中国土壤信息系统土壤分类数据)分类标准,样品中6个属于漠土,2个属于水成土,14个为半水成土,31个为高山土。各采样区表土特征分述如下。

(1) 嘉峪关地区,共采集4个样品,均为黄棕色漠土。样品颗粒分选中等,粒度以粉砂级颗粒为主,粗砂和细砾级颗粒次之,粗砂级颗粒磨圆度以次圆状为主,细砾磨圆为次棱角—棱角状。采样点所处地貌为山前平原,荒漠环境,土壤生产力差,植被稀疏,发育零散低矮灌木,气候干燥(图3a,b)。

(2) 玉门地区,共采集17个样品,均为黄棕色高山土。样品颗粒分选良好,以粉砂级颗粒为主,细砂级颗粒次之,少量样品含细砾,砾石磨圆度主要为次圆状。采样点所处地貌为山前平原或坡地,荒漠环境,土壤生产力差,植被稀疏,发育少量低矮灌木,气候干燥(图3c,d)。

(3) 北祁连西段地区,共采集13个样品,多为黄棕色高山土。样品颗粒分选良好,粉砂级颗粒含量占绝大多数,细砂级颗粒次之;个别样品以细砂级颗粒为主,采样点所处地貌为山前坡地或山间河谷,荒漠环境,土壤生产力差,植被稀疏,发育稀疏低矮灌木,气候干燥(图3e,f)。

(4) 党河南山地区,其中清水沟共采集4个样品,均为黄棕色高山土,样品颗粒分选中等,粒度以粉砂级颗粒为主,粗砂和细砾级颗粒次之,粗砂级颗粒磨圆度以次圆状为主,细砾级颗粒以次棱角—棱角状为主,地貌为山前坡地,戈壁环境,毗邻雪山,土壤生产力很差,无植被分布,有大量砾石,气候干燥,环境荒凉。乌里沟共采集15个样品,基本为黄棕色半水成土,样品分选差,半数粒度以粉砂级颗粒为主,粗砂级颗粒次之,个别含细砾级颗粒;剩余样品粒度均以粗砂级颗粒为主,细砾、细砂级颗粒次之,粗砂级颗粒磨圆度以次圆状—圆状为主,细砾级颗粒以次棱角—棱角状为主,地貌为山坡,戈壁环境,无植被分布,分布有大量砾石(图3g,h)。

2.3 实验方法

磁化率测量步骤:(1)样品经自然晾干后,去除明显的植物残体和砾石,称取约8 g,装入2 cm×2 cm×2 cm的磁学专用样品盒,并称重;(2)使用Bartington磁化率仪(MS2)测量,测量前先测背景值,校验仪器精度,然后测量样品的低频体积磁化率(470 Hz)、高频体积磁化率(4 700 Hz),每个样品测量3次,取平均值;(3)最后计算出样品的低频质量磁化率(χ_{lf})、高频质量磁化率(χ_{hf})和频率磁化率百分比 $\chi_{fr}\%=(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}\times 100$ 。

色度测量步骤:(1)样品经自然晾干并去除明显的植物残体和砾石后,称取5~7 g,置于玛瑙研钵中磨至200目;(2)保证背景光源恒定,称取2~3 g样品放于白色参照板上压实压平,使用SPDA-503型色度仪进行测量,每个样品测量5次后取平均值,获得色度值(红度、黄度、亮度)。以上实验在兰州大学地质科学与矿产资源学院地球物理实验室完成。

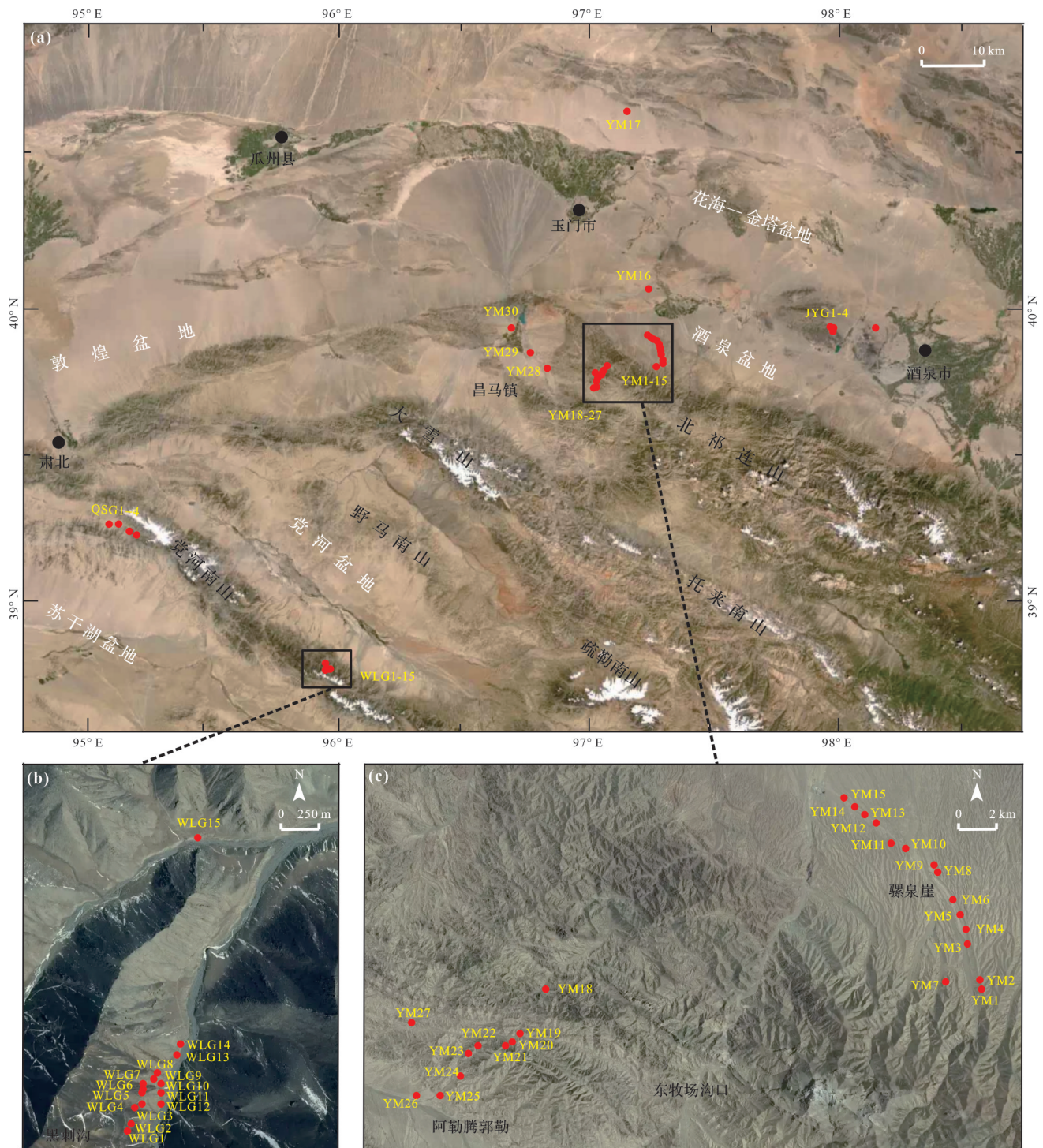


图1 祁连山西段表土采样点分布图

Fig.1 Distribution of surface soil sampling points in the western Qilian Mountains

由于研究区没有气象站,利用美国气候诊断中心(CDC)网站的祁连山西段1981—2012年间气温与降水格点数据,并处理得各点的年均降水量(MAP)与年均气温(MAT)数据。气候数据具体处理方法:运用Excel软件, $MAP = \sum_{\alpha=1}^m [\sum_{\beta=1}^n (MAP_d \times 31)]$;

$MAT = \sum_{\alpha=1}^m (\sum_{\beta=1}^n MAT_d) / 12 - 273.15$ (MAP为某采样点年均降水量; MAP_d 为日均降水量; MAT为某采样点年均气温; MAT_d 为日均气温; α 为年数; β 为月数; $12 \geq n \geq 1, n$ 为整数; $33 \geq m \geq 1, m$ 为整数。)

运用回归分析方法建立气候因子(年均降水量、

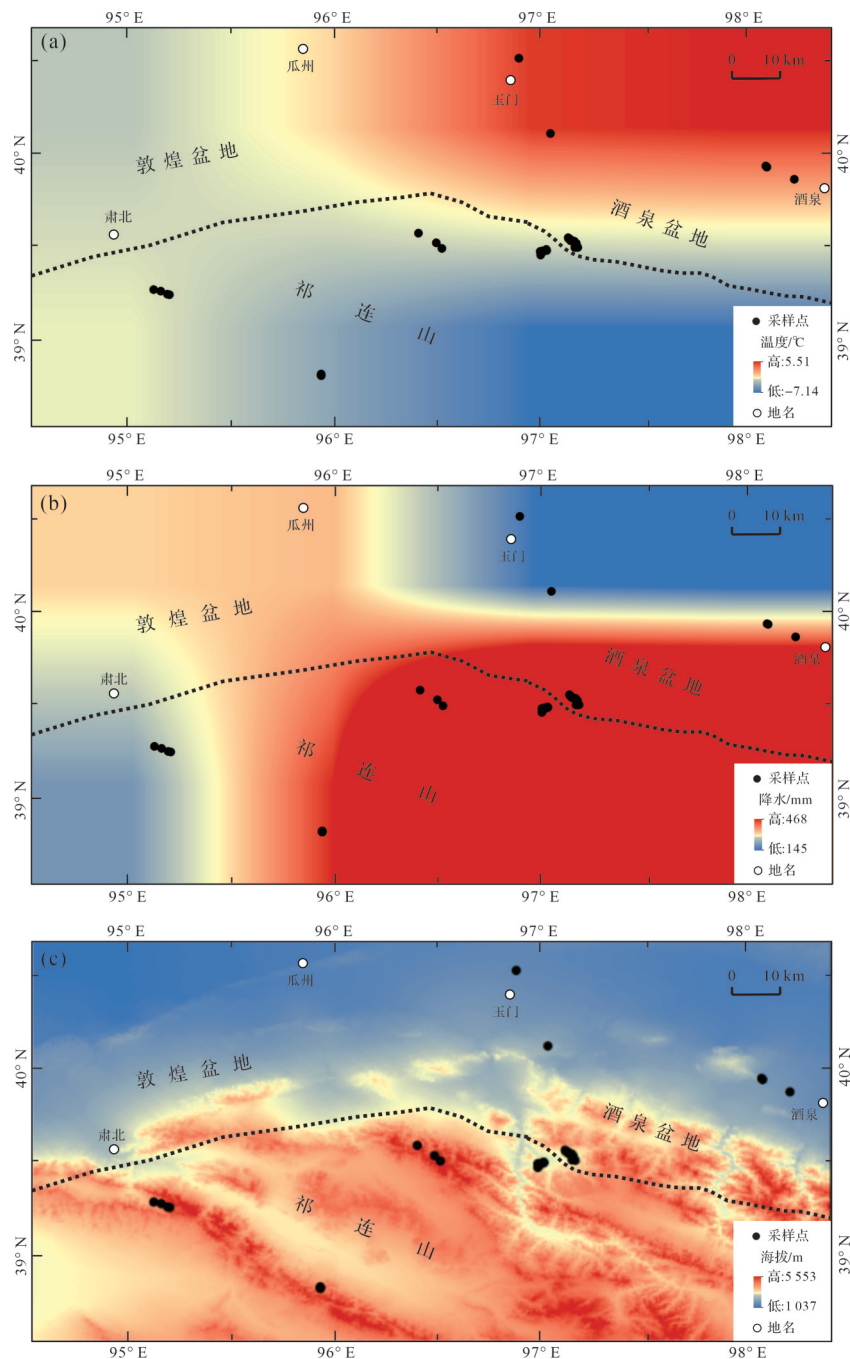


图2 祁连山西段表土采样点年均气温(a)、年均降水量(b)和海拔(c)等值线分布图

Fig.2 Contour map of mean annual temperature (a), mean annual precipitation (b), and elevation (c) in the western Qilian Mountains

年均气温)、海拔与磁化率、色度之间的关系:首先在Excel中进行数据处理,然后运用Origin软件进行回归分析。

3 结果

3.1 磁化率特征

祁连山西段表土的磁化率值空间变化较大,低

频磁化率值(χ_{lf})介于 $5.90 \times 10^{-8} \sim 91.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 平均值为 $31.18 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; 高频磁化率值(χ_{hf})介于 $6.07 \times 10^{-8} \sim 91.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 平均值为 $30.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; 频率磁化率百分比($\chi_{fd}\%$)均低于 5.92%, 平均值为 0.57%(忽略两个偏差较大值)(表1)。与黄土高原及其周边地区(χ_{lf} 平均值为 $92.83 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, $\chi_{fd}\%$ 平均值为 6.9%)(宋扬等, 2012)、青藏高原东部表土磁化

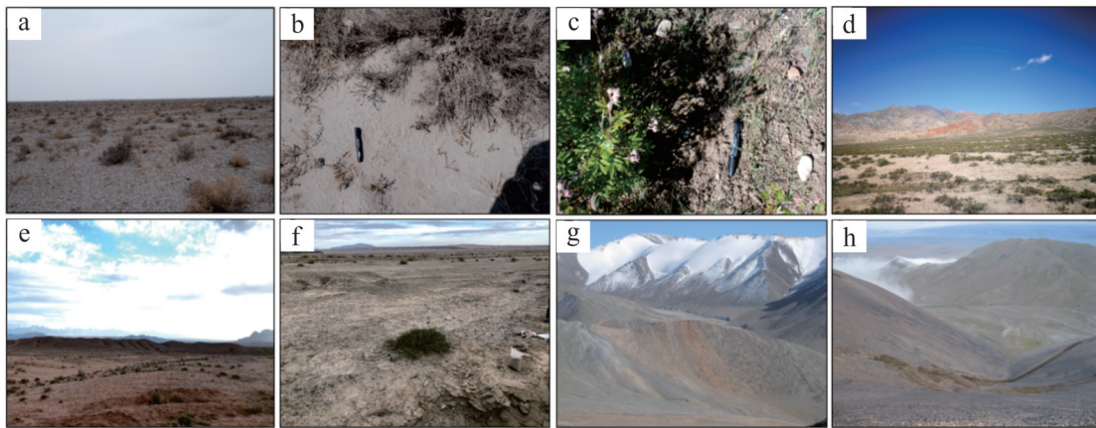


图3 采样点环境特征

Fig.3 Environmental characteristics of the sampling points

率值(χ_{lf} 平均值为 $54.88 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, $\chi_{lf}\%$ 平均值为 6.62%) (陈慧等, 2018)、川西高原西南部(χ_{lf} 平均值为 $42.32 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (陈梓炫等, 2019) 相比, 祁连山西段表土的磁化率值明显较低。

祁连山西段表土磁化率值空间上由北祁连向南祁连呈减小趋势(图4)。其中, 嘉峪关地区表土样品磁化率平均值最高, 为 $65.93 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; 玉门地区为 $33.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; 北祁连山西段为 $29.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; 党河南山表土样品磁化率平均值最低, 为 $22.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。

3.2 色度特征

主要运用 CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) 表色系统, 该系统由红度 (a^*)、黄度 (b^*)、亮度 (L^*) 三个参数组成 (Robertson, 1977; Bureau central de la CIE, 1978): 亮度 (L^*) 表示沉积物的明暗程度, 受土壤湿度、粗糙度、有机质、碳酸盐含量、铁氧化物等因素影响, 其值介于 0 (黑)~100 (白), 数值越大颜色越浅; 红度 (a^*) 主要受沉积物中铁的氧化物影响, 特别是致色矿物赤铁矿, 其值介于 -60 (绿)~60 (红), 数值越大颜色越红; 黄度 (b^*) 主要受沉积物中致色矿物针铁矿影响, 其值介于 -60 (蓝)~60 (黄), 数值越大颜色越黄 (杨胜利等, 2001; Sun *et al.*, 2011; Robertson, 1977; 高鹏坤等, 2015)。

祁连山西段表土色度参数红度 (a^*) 值介于 2.13~10.13, 平均值为 7.57; 黄度 (b^*) 值介于 15.17~32.43, 平均值为 24.54; 亮度 (L^*) 值介于 45.77~61.77, 平均值为 55.34 (表1)。与青藏高原中南部 (a^* 平均值为 5.1, b^* 平均值为 16.1, L^* 平均值为 55.4) (宋瑞卿等, 2016)、青藏高原东部 (a^* 平均值为 5.95, b^* 平均值为 16.07, L^*

平均值为 47.22) (陈梓炫等, 2022) 表土色度值相比, 研究区表土 a^* 值和 b^* 值较高, L^* 值相对较复杂。

研究区表土色度值在空间上变化不明显(图5), 去除个别偏差较大的样品, 嘉峪关地区表土的 a^* 值和 b^* 值低于其他地区。

4 讨论

本文尝试用线性回归、多项式回归、对数回归、S型曲线模型回归方法建立磁化率、色度与气候因子、海拔的关系 (吕厚远等, 1994), 最终根据曲线的拟合效果选择拟合度较好、拟合方程较简单、相关性较好的线性回归和多项式回归(表2)。

4.1 磁化率及其环境意义

经过低频磁化率与年均气温、年均降水量、海拔间的回归分析(图6), 选择相关系数较大、回归离差较小的回归关系, 如下:

$$\text{磁化率与年均降水量: } \chi_{lf} = -0.4\text{MAP} - 0.0006\text{MAP}^2 + 79.23 \quad (1)$$

$$R_{\text{MAP}}^2 = 0.37, F = 51.29 > F_{0.05(1,51)} = 3.41$$

$$\text{磁化率与年均气温: } \chi_{lf} = 1.10\text{MAT} + 0.23\text{MAT}^2 + 26.02 \quad (2)$$

$$R_{\text{MAT}}^2 = 0.36, F = 19.00 > F_{0.05(1,51)} = 3.41$$

$$\text{磁化率与海拔: } \chi_{lf} = -0.00965H + 61.12 \quad (3)$$

$$R_H^2 = -0.49, F = 51.01 > F_{0.05(1,51)} = 3.41$$

式中: χ_{lf} 为低频质量磁化率, MAP 为年均降水量 (mm), MAT 为年均气温 ($^{\circ}\text{C}$), H 为海拔 (m)。经 F 检验得到式(1)、式(2)、式(3)的函数关系均高度显著, 拟合曲线详见图6。

表1 祁连山西段表土磁化率、色度和环境因素

磁化率和色度参数	嘉峪关表土			玉门表土			北祁连山西段表土			党河南山表土			全部样品		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
$\chi_{lf}/\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	90.45	34.91	65.93	45.74	20.31	33.14	40.06	6.05	29.96	91.79	5.90	22.95	91.8	5.90	31.18
$\chi_{hf}/\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	88.51	34.70	64.15	45.94	19.74	33.69	39.45	6.43	29.11	91.36	6.07	22.75	91.36	6.07	30.95
$\chi_{01}/\%$	3.78	0.67	2.47	2.86	-41.36	-1.20	-34.61	-9.57	2.16	5.92	-2.91	0.95	34.61	-41.36	-0.43
a^*	7.00	6.30	6.50	9.53	6.03	8.09	8.20	2.13	6.72	10.13	5.33	7.91	10.13	2.13	7.57
b^*	18.30	15.80	17.25	26.87	23.37	25.55	27.17	15.17	23.91	32.43	22.70	25.60	32.43	15.17	24.54
L^*	58.50	55.60	56.58	61.77	50.40	55.48	61.40	45.77	55.16	60.47	48.47	55.09	61.77	45.77	55.34
MAT/ $^{\circ}\text{C}$	8.71	8.69	8.70	8.71	-7.14	-5.28	8.71	-7.14	-5.29	-0.07	-4.40	-3.50	8.71	-7.14	-3.80
MAP/mm	95.13	69.34	75.79	468.20	69.34	421.30	468.20	69.34	385.90	244.50	136.2	221.70	468.22	69.34	296.37
H/m	1 700	1 625	1 672	3 080	1 670	2 535	3 240	2 100	2 672	4 242	3 790	4 145	4 242	1 625	3 353

注: χ_{lf} 为低频磁化率; χ_{hf} 为高频磁化率; $\chi_{01}/\%$ 为频率磁化率百分比; a^* 为红度; b^* 为黄度; L^* 为亮度; MAT 为年均气温; MAP 为年均降水量; H 为海拔。

研究区表土磁化率与年均降水量(MAP)、年均气温(MAT)、海拔(H)的复相关系数分别为0.64、0.52、-0.49。其中,磁化率与MAP、MAT的关系存在一个阈值(约0 $^{\circ}\text{C}$ 和300 mm),低于阈值磁化率与MAP、MAT呈负相关关系,反之呈正相关关系(图6a, b)。磁化率与海拔呈负相关关系,为更好地观察磁化率与海拔的关系,通过拟合发现样品点在海拔1 600~3 300 m($R=-0.53$),磁化率与海拔呈较显著负相关关系;分布在海拔3 700~4 300 m,相关关系较弱($R=-0.21$)(图6c),但整体趋势一致。

低频磁化率是物质在外部磁场作用下的磁化能力,与物质所含磁性矿物的种类、含量及粒径有关。土壤的低频磁化率能反映样品的总磁性特征及亚铁磁性矿物含量,是磁性矿物含量的粗略反映(二者数值呈正相关关系)(刘青松和邓成龙,2009;邱世藩等,2014;崔红佳,2023)。祁连山西段表土的磁化率与年均降水量、年均气温的关系和吕厚远等(1994)(MAP=1 100 mm, MAT=15 $^{\circ}\text{C}$)研究黄土高原及其周边地区表层土壤与气候关系的结果都存在一个阈值,但阈值不同。这可能与祁连山西段复杂的地形条件或影响该区的气候格局与东边黄土高原明显不同有关,需进一步扩大采集范围、增加采集数量。研究区表土的磁化率与海拔呈线性负相关关系,且1 600~3 300 m、3 700~4 300 m海拔内磁化率变化趋势一致,海拔升高,温度降低,表土成壤程度减弱,样品所含磁性矿物减少或强磁性矿物被还原为弱磁性矿物(Dearing *et al.*, 1996),磁化率值减小。综上,在祁连山西段,表土磁化率的变化原因需要综合考虑气候和地形因素。

4.2 色度及其环境意义

前人常用红度(a^*)、黄度(b^*)分别表征沉积物中赤铁矿、针铁矿的相对含量(Torrent *et al.*, 1983; Fernandez *et al.*, 1988; Sun *et al.*, 2011;李超和杨守业,2012;冯力威等,2015;陈杰等,2018;陈梓炫等,2020)。通常针铁矿与赤铁矿共存,但针铁矿普遍存在于任何气候条件下的土壤中(Childs *et al.*, 1979)。通过对祁连山西段表土的亮度(L^*)与红度(a^*)、黄度(b^*)进行相关分析发现: L^* 与 b^* 有较显著相关关系($R=0.67$),表明研究区 b^* 对 L^* 影响较大,土壤中针铁矿相对含量较赤铁矿多,这与土壤颜色整体呈黄棕色所对应(宋瑞卿等,2016;陈杰等,2018;吴开钦,2022)(图7)。

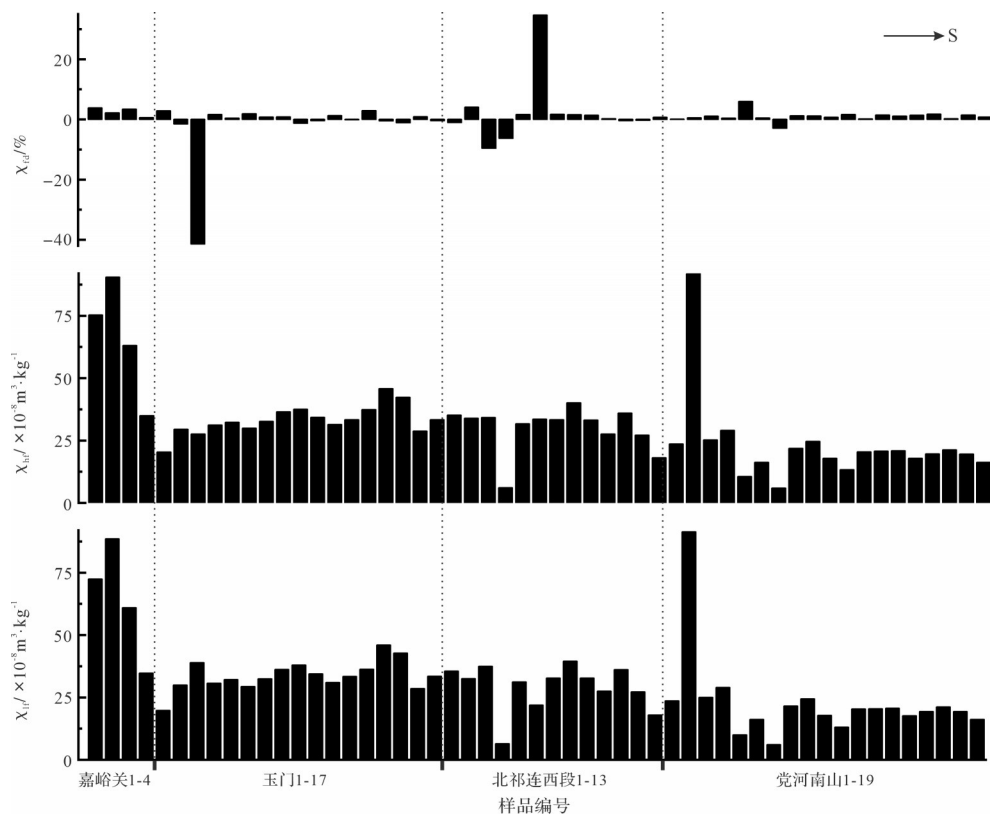


图4 祁连山西段表土磁化率柱状图

Fig.4 Surface soil magnetic susceptibility in the western Qilian Mountains

经过祁连山西段表土色度(a^* 、 b^* 、 L^*)和年均降水量(MAP)、年均气温(MAT)、海拔(H)的回归分析得到: a^* 与MAP、MAT、 H 的复相关系数分别为0.39、0.36、0.32(图8a1~a3), b^* 与MAP、MAT、 H 的复相关系数分别为0.57、0.61、0.41(图8b1~b3), L^* 与MAP、MAT、 H 的复相关系数分别为0.07、0.13、0.22(图8c1~c3)。

前人研究认为沉积物的 a^* 指示温度变化, b^* 表示土壤发育程度, L^* 指示东亚夏季风强度(李越等,2014;李杨等,2018;马永法等,2021),但干冷的干旱一半干旱区 a^* 对降水、温度的响应不敏感, b^* 通常与 a^* 变化一致(杨胜利等,2001)。祁连山西段表土色度与年均降水量、年均气温的关系整体较复杂,这可能是由于研究区的土壤形成受气候和地形的综合影响。为更好地观察祁连山西段地形对色度的影响,拟合发现色度与海拔的回归关系整体不明显,但海拔分段后的关系较整体明显:海拔1 600~3 300 m表土色度与海拔的关系较海拔3 700~4 300 m显著(图8a3,b3,c3)。其中,表土 L^* 与海拔的线性负相关关系比较明显,且对低海拔区域更敏感($R=-0.94$),亮度

随海拔升高而减小。在祁连山西段,随着海拔升高,降雨及空气中水汽增多,土壤所含有有机质增加,土壤颜色变暗, L^* 变小(严永耀等,2017)。

4.3 磁化率与色度

磁化率和色度常作为重要的气候代用指标,广泛用于古气候重建。沉积物磁化率的主要贡献者磁铁矿、磁赤铁矿氧化形成赤铁矿或还原形成针铁矿或纤铁矿,赤铁矿能使土壤变红、针铁矿或纤铁矿能使土壤变黄(Singh and Gilkes, 1992)。为了更好地进行古气候研究,前人将综合两个指标进行分析(杨胜利,2001)。

进行表土磁化率与色度的相关分析得出磁化率与 a^* 、 b^* 、 L^* 的相关系数分别为-0.47、-0.41、0.31,红度、黄度与磁化率的相关关系更加明显(图9),且祁连山西段表土磁化率值低于青藏高原东部、南部等地区,这是因为祁连山复杂的气候与地形,影响磁化率的磁性矿物同时影响着 a^* 、 b^* (李浩等,2021)。

相较于色度(a^* 、 b^* 、 L^*),研究区所有样品(1 600~4 300 m)的磁化率与海拔关系更显著;样品分布在1 600~3 300 m时, L^* 与海拔呈显著负相关关系, b^* 、 χ_{lf}

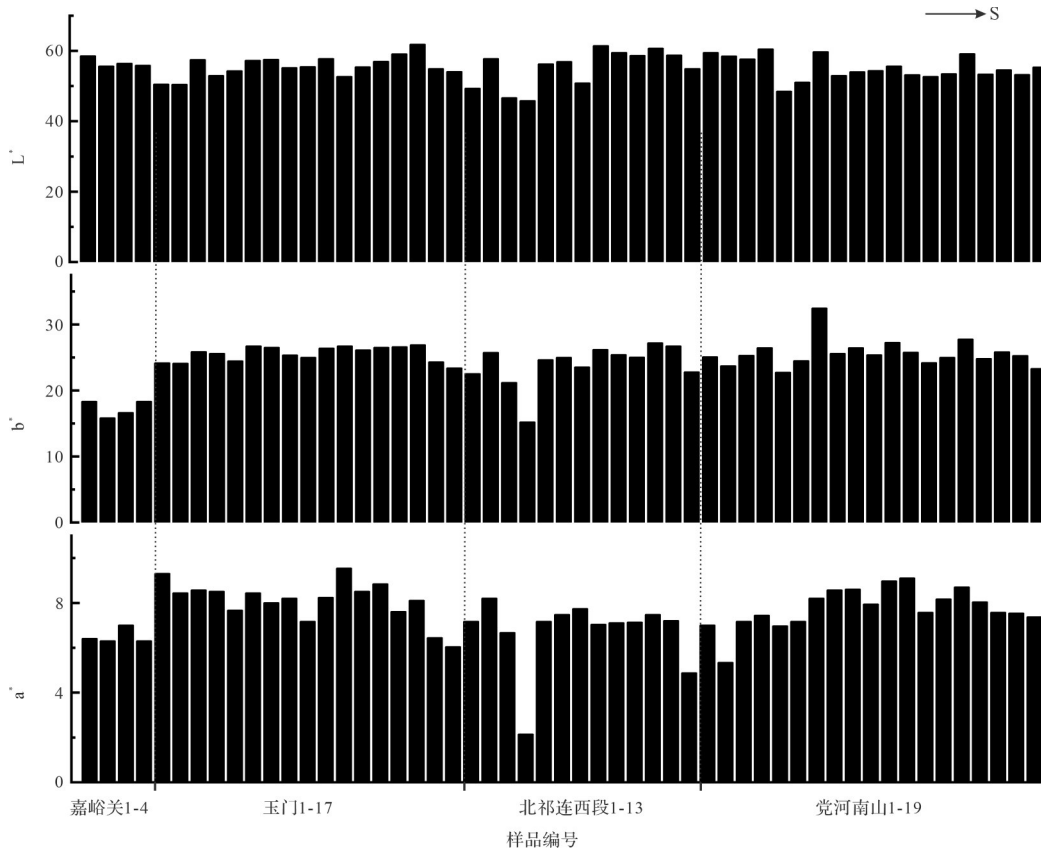


图5 祁连山西段表土色度柱状图

Fig.5 Surface soil chroma in the western Qilian Mountains

表2 祁连山西段表土磁化率、色度与年均降水量、年均气温、海拔多种回归分析方法的比较

Table 2 Comparison of multiple regression analysis methods of surface magnetic susceptibility, colorimetry, mean annual precipitation, mean annual temperature, and altitude in the western Qilian Mountains

回归方法	$\chi_{lf}/\times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$			a^*			b^*			L^*		
	MAP/mm	MAT/ $^{\circ}\text{C}$	H/m	MAP/mm	MAT/ $^{\circ}\text{C}$	H/m	MAP/mm	MAT/ $^{\circ}\text{C}$	H/m	MAP/mm	MAT/ $^{\circ}\text{C}$	H/m
线性回归	$R^2=0.013$	$R^2=0.17$	$R^2=0.239$	$R^2=0.046$	$R^2=0.108$	$R^2=0.051$	$R^2=0.078$	$R^2=0.772$	$R^2=0.104$	$R^2=0.018$	$R^2=0.019$	$R^2=0.029$
多项式回归	$R^2=0.373$	$R^2=0.364$	$R^2=0.265$	$R^2=0.119$	$R^2=0.093$	$R^2=0.050$	$R^2=0.301$	$R^2=0.353$	$R^2=0.173$	$R^2=0.035$	$R^2=0.023$	$R^2=0.018$
对数回归	$R^2=0.212$	—	$R^2=0.267$	$R^2=0.078$	—	$R^2=0.070$	$R^2=0.254$	—	$R^2=0.262$	$R^2=0.038$	—	$R^2=0.012$
S型曲线回归	$R^2=0.252$	—	$R^2=0.519$	$R^2=0.993$	—	$R^2=0.129$	$R^2=0.327$	$R^2=0.999$	$R^2=0.061$	$R^2=0.053$	—	$R^2=0.122$

注: χ_{lf} 为低频磁化率; a^* 为红度; b^* 为黄度; L^* 为亮度;MAT为年均气温;MAP为年均降水量;H为海拔。

次之;样品分布在3 700~4 300 m时, a^* 和 L^* 与海拔的关系更显著(图6c、图8a3,b3,c3、表3)。

4.4 祁连山西段表土与其他地区对比

我国地域广阔、气候复杂,不同气候带环境不同,沉积物的磁化率与色度也存在差异(表4)。

4.4.1 磁化率差异性对比

吕厚远等(1994)研究黄土高原、华南以及新疆地区表土磁化率与气候参数关系时发现:磁化率

与温度、降水量的关系存在一个阈值(约11 $^{\circ}\text{C}$ 和1 110 mm),低于阈值时磁化率与气候参数呈正比、成之呈反比(吕厚远等,1994)。而祁连山西段表土磁化率与气候参数也存在一个阈值(约0 $^{\circ}\text{C}$ 和300 mm),低于阈值时二者呈反比、反之呈正比。与黄土高原相比,祁连山西段表土磁化率较低,与气候因子关系更复杂,这与两地气候及地形地貌差异有关,青藏高原海拔较高,温度较低,减少了水分的蒸

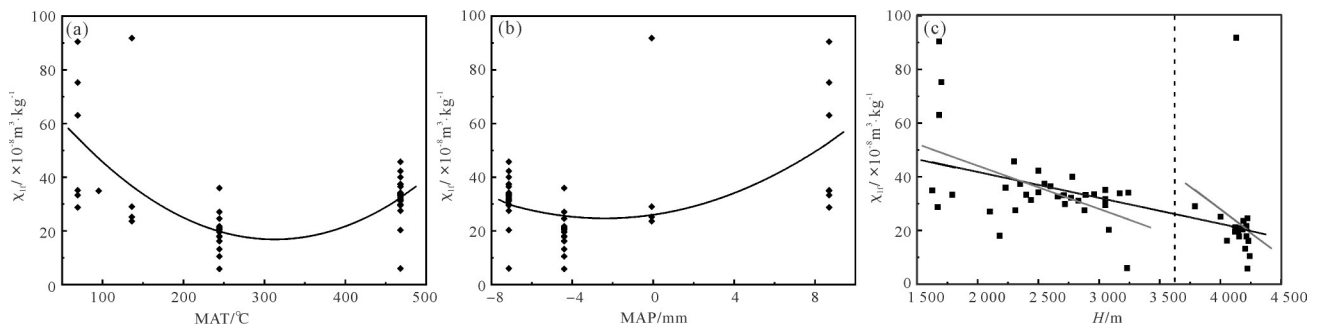


图6 祁连山西段表土磁化率与年均降水量(a)、年均气温(b)、海拔(c)的回归分析曲线

Fig.6 Regression analysis curve of surface soil magnetic susceptibility with mean annual precipitation (a), mean annual temperature (b) and altitude (c) in the western Qilian Mountains

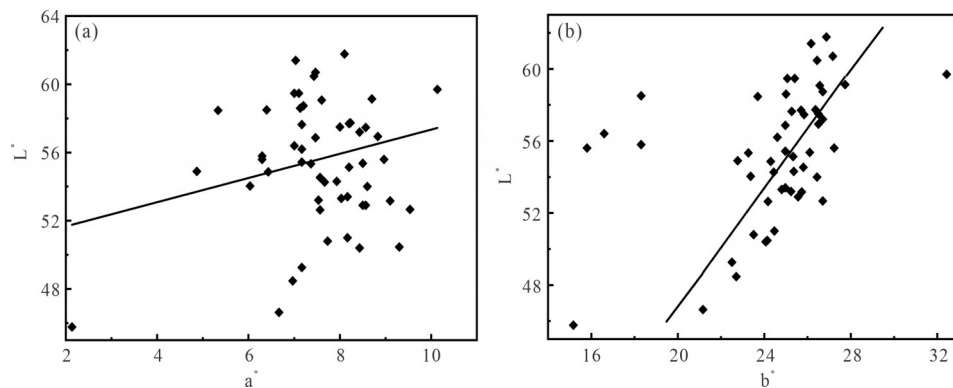


图7 祁连山西段表土亮度与红度(a)、亮度与黄度(b)的相关分析图

Fig.7 Correlation analysis of brightness and redness (a), brightness and yellowness (b) of surface soil in the western Qilian Mountains

发,同时也抑制了成壤作用。陈慧等(2018)研究青藏高原东部川西高原表土磁化率发现磁化率与气候参数呈正比关系,与本研究结果存在差异。这可能源于祁连山西段长期受西风影响,而川藏高原地处青藏高原以东、南接云贵高原物源丰富,地理位置与所受风系的不同决定了磁化率的差异。

4.4.2 色度差异性对比

杨胜利等(2001)对全国表土色度研究发现 L^* 与气候参数无明显关系;温热地区 a^* 随降水、温度增加而显著增大、干冷地区 a^* 与气候参数无明显关系。而祁连山西段气候干冷,表土色度与年均降水量、年均气温的关系不明显,这进一步验证了其研究认识。苗运法等(2013)对新疆天山地区表土色度的研究表明 a^* 与 b^* 关系密切,受制于相同气候因子,但 a^* 、 L^* 与气候参数的关系均不显著。这与本文的研究结果相近,祁连山与天山地区同处西北内陆干旱区,气候环境相似。

研究区样品测量结果显示,土壤水热条件良好

时,成壤速率越快,所含细磁性矿物越多,磁化率值越高,颜色越深。随着环境变化,土壤中的磁性矿物也会发生转换,进一步导致磁化率与色度的变化,在一定程度上决定了磁化率、色度的指示意义(郭雪莲等,2011;李平原等,2012,2013)。现代土壤作为古土壤的延续,研究它的磁化率、色度与气候参数间的关系也能很好地还原古气候变化。迄今为止,磁化率、色度与海拔间的关系研究较少,本文研究揭示出磁化率与海拔呈负相关关系、亮度(L^*)与海拔关系较显著,但仍需进一步研究与验证。

5 结论

(1) 表土磁化率值变化幅度较大,由北祁连向南祁连呈减小趋势。磁化率与年均降水量、年均气温的关系低于阈值(约 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 300 mm)时呈负相关,反之呈正相关。磁化率与海拔呈负相关,且在低海拔区域($1\ 600\sim 3\ 300\text{ m}$)更显著。

(2) 表土色度与年均降水量、年均气温无明显关

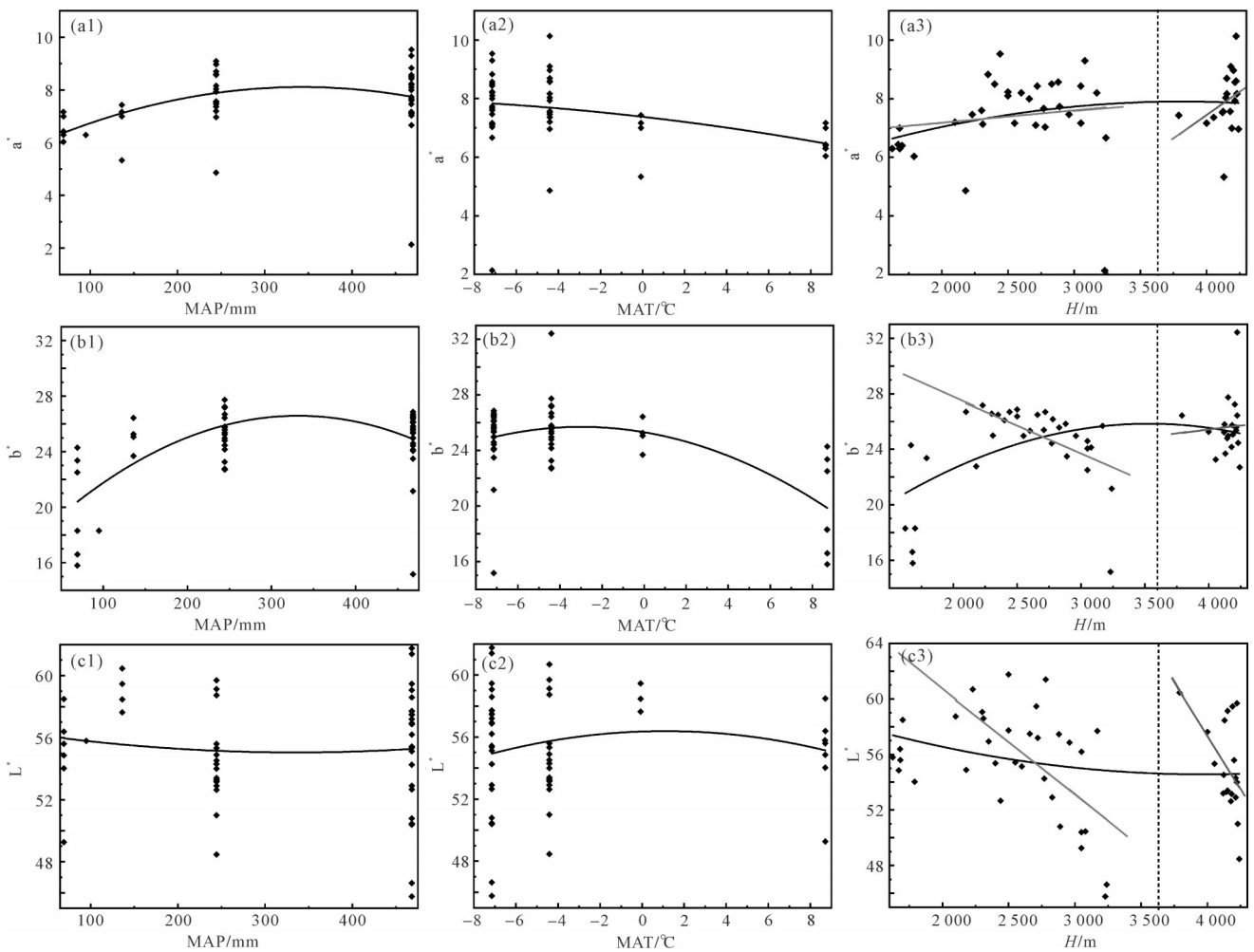


图8 祁连山西段表土红度、黄度、亮度与年均降水量、年均气温、海拔的回归曲线

Fig.8 Regression curves of redness, yellowness, and brightness of surface soil with mean annual precipitation, mean annual temperature, and altitude in the western Qilian Mountains

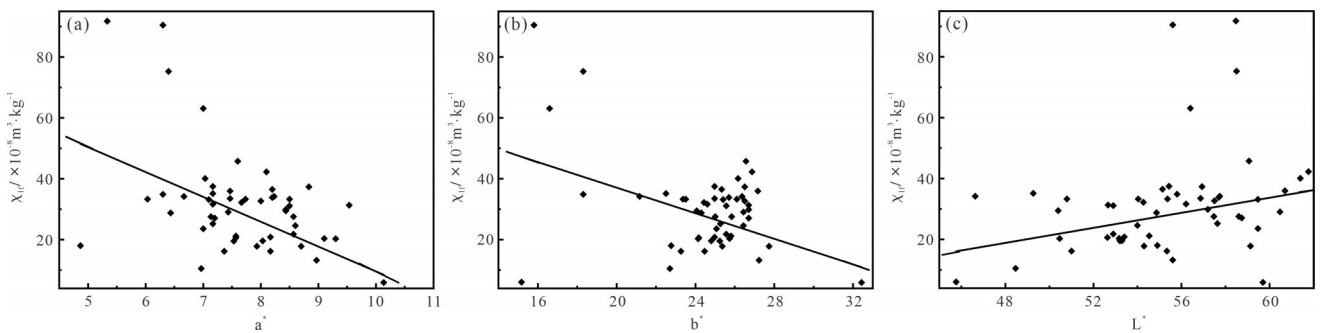


图9 祁连山西段表土磁化率与红度(a)、黄度(b)、亮度(c)的相关曲线

Fig.9 Correlation curves of surface soil magnetic susceptibility with redness (a), yellowness (b), and brightness (c) in the western Qilian Mountains

系;亮度与海拔呈较显著负相关,在低海拔区域(1 600~3 300 m)更敏感。

(3) 表土磁化率与红度、黄度关系较显著,这与磁化率和色度均受沉积物中铁氧化物影响有关。整

体而言,相较于色度,磁化率能更好地反映研究区气候变化;在低海拔区域(1 600~3 300 m),亮度与海拔的关系更明显,黄度、磁化率次之;在高海拔区域(3 700~4 300 m)红度、亮度与海拔的关系更显著。

表3 祁连山西段表土磁化率、色度与海拔的关系

Table 3 Relationship between surface soil magnetic susceptibility, chroma, and altitude in the western Qilian Mountains

海拔/m	$\chi_{lf}/\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	a^*	b^*	L^*	样品数/个	相对范围
1 600~3 300	$R=-0.53$	$R=0.43$	$R=-0.56$	$R=-0.94$	34	低海拔样品
3 700~4 300	$R=-0.21$	$R=0.57$	$R=0.06$	$R=-0.50$	19	高海拔样品
1 600~4 300	$R=-0.50$	$R^2=0.05$	$R^2=0.17$	$R^2=0.02$	53	全部样品

注： χ_{lf} 为低频磁化率； a^* 为红度； b^* 为黄度； L^* 为亮度。

表4 中国不同地区表土磁化率、色度与气温、降水的关系对比

Table 4 Comparison of the relationship between magnetic susceptibility, colorimetry, temperature, and precipitation of surface soil in different regions of China

气候代用指标	研究区	降水	气温	来源
磁化率(χ)	新疆及周边地区	关系复杂,无明显趋势	关系复杂,无明显趋势	吕厚远等,1994
	塔里木盆地南部	无明显关系	无明显关系	Zan et al.,2011
	伊犁地区	呈负相关关系		鄂雪莲等,2011
	西北戈壁沙漠—黄土高原地区	年均降水量高于200~300 mm,磁化率与之呈良好正相关,反之关系不明显		李平原等,2013
	黄土高原及周边地区	呈正相关关系	呈正相关关系	吕厚远等,1994;宋扬等,2012
	黄土高原中部	呈正相关关系		鄂雪莲等,2011
	青藏高原东部	呈较弱正相关关系	呈较弱正相关关系	陈慧等,2018
	川西高原	磁化率先随年均降水量增加而缓慢增大,1 000 mm后磁化率趋于平缓且有下降趋势	关系较差	陈梓炫等,2019
	长江流域以南分布区	呈负相关关系	呈负相关关系	吕厚远等,1994
	中国东部地区	呈弱的负相关关系	呈弱负相关关系	邱世藩等,2014
	海南岛	磁化率先随年均降水量增加而增大,1 440 mm左右磁化率随其增加而减小		Long et al.,2011
红度(a^*)	干旱—半干旱区	无明显关系	无明显关系	杨胜利等,2001
	亚热带—热带	呈良好的指数关系	呈良好的指数关系	
色度	新疆青海地区	呈负相关关系	无明显关系	严永耀等,2017
	西北干旱区(新疆天山地区)	无明显关系	红度与温度有较好关系	苗运法等,2013
黄度(b^*)	干旱—半干旱区	呈显著正相关关系	呈显著正相关关系	杨胜利等,2001
亮度(L^*)	干旱—半干旱区	无明显关系	无明显关系	杨胜利等,2001
	亚热带—热带			

需要说明的是,要在祁连山西段建立单一指标与气候因素的变化关系,还需考虑局地气候、地形甚至原岩对磁化率、色度指标的影响。

致谢 感谢三位审稿专家和编辑部老师对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References)

艾丽,吴建国,刘建泉,等. 2010. 土壤有机碳和全氮含量及其与海拔、植被和气候要素的关系:以祁连山中段北坡为研究对象[J]. 中国园艺文摘,26(3):27-34. [Ai Li, Wu Jianguo, Liu Jianquan, et al. 2010. The soil organic carbon and total nitrogen content on the

northern slope of Qi Lian Mountain and its relationship with altitude, vegetation and climatic factors[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 26(3): 27-34.]

安芷生,张培震,王二七,等. 2006. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究,26(5):678-693. [An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. 2006. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene[J]. Quaternary Sciences, 26(5): 678-693.]

车宗玺,李进军,汪有奎,等. 2018. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J]. 生态学报,38(1):105-111. [Che Zongxi, Li Jinjun, Wang Youkui, et al. 2018. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(1): 105-111.]

- 陈桂琛,彭敏,黄荣福,等. 1994. 祁连山地区植被特征及其分布规律[J]. 植物学报, 36(1): 63-72. [Chen Guichen, Peng Min, Huang Rongfu, et al. 1994. Vegetation characteristics and its distribution of Qilian Mountain region[J]. Acta Botanica Sinica, 36(1): 63-72.]
- 陈慧,杨胜利,成婷,等. 2018. 青藏高原东部表土磁化率特征与环境意义[J]. 冰川冻土, 40(6): 1187-1194. [Chen Hui, Yang Shengli, Cheng Ting, et al. 2018. The magnetic susceptibility of top soil in the eastern Tibetan Plateau: Features and environmental implications[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 40(6): 1187-1194.]
- 陈杰,杨太保,曾彪,等. 2018. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J]. 沉积学报, 36(2): 333-342. [Chen Jie, Yang Taibao, Zeng Biao, et al. 2018. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir loess section, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(2): 333-342.]
- 陈梓炫,吕镔,郑兴芬,等. 2019. 川西地区表土磁学性质及其环境意义[J]. 土壤学报, 56(3): 661-671. [Chen Zixuan, Lü Bin, Zheng Xingfen, et al. 2019. Topsoil magnetic properties and its environmental significance in west Sichuan[J]. Acta Pedologica Sinica, 56(3): 661-671.]
- 陈梓炫,吕镔,郑兴芬,等. 2020. 基于漫反射光谱和色度的土壤中赤铁矿和针铁矿半定量探讨[J]. 土壤, 52(5): 1083-1091. [Chen Zixuan, Lü Bin, Zheng Xingfen, et al. 2020. Semi-quantitative study on hematite and goethite in soils based on diffuse reflectance spectrum and chroma[J]. Soils, 52(5): 1083-1091.]
- 陈梓炫,杨胜利,栗娅婷,等. 2022. 青藏高原东部表层土壤色度的空间变化特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 42(4): 171-180. [Chen Zixuan, Yang Shengli, Su Yating, et al. 2022. Spatial variation of surface soil color in the eastern Tibetan Plateau and its environmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 42(4): 171-180.]
- 崔红佳. 2023. 黑土区坡耕地土壤磁性时空分异特征与理化性质的关系研究[D]. 大连: 辽宁师范大学: 1-47. [Cui Hongjia. 2023. Soil magnetic spatiotemporal heterogeneity and its relationship with physical and chemical properties on Black Soil farmland hill-slope[D]. Dalian: Liaoning Normal University: 1-47.]
- 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. [Feng Liwei, Wu Kening, Zha Lisi, et al. 2015. Chroma characteristics and its climatic significance of Yangshao culture relic[J]. Ecology and Environmental Sciences, 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. [Gao Pengkun, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. 2015. Chroma characteristics and its significances of the Chafangcun loess-paleosol profile in southeast Shaanxi, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(3): 537-542.]
- 郭雪莲,刘秀铭,吕镔,等. 2011. 天山黄土区与黄土高原表土磁性特征对比及环境意义[J]. 地球物理学报, 54(7): 1854-1862. [Guo Xuelian, Liu Xiuming, Lü Bin, et al. 2011. Comparison of topsoil magnetic properties between the loess region in Tianshan Mountains and Loess Plateau, China, and its environmental significance[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(7): 1854-1862.]
- 李超,杨守业. 2012. 长江沉积物中赤铁矿和针铁矿的漫反射光谱分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(增刊): 11-19. [Li Chao, Yang Shouye. 2012. Hematite and goethite distribution in the Yangtze River sediments by using diffused reflectance spectroscopy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 37(Suppl.): 11-19.]
- 李浩,张玉柱,李意愿,等. 2021. 沉积物特征与旧石器遗址的形成过程[J]. 人类学学报, 40(3): 363-377. [Li Hao, Zhang Yuzhu, Li Yiyuan, et al. 2021. Sediment characteristics and the formation processes of Paleolithic sites[J]. Acta Anthropologica Sinica, 40(3): 363-377.]
- 李平原,刘秀铭,郭雪莲,等. 2013. 西北戈壁沙漠—黄土高原区表土磁化率特征及其意义[J]. 第四纪研究, 33(2): 360-367. [Li Pingyuan, Liu Xiuming, Guo Xuelian, et al. 2013. The magnetic susceptibility properties of top soil's in Gobi-Loess Plateau, Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 33(2): 360-367.]
- 李平原,刘秀铭,刘植,等. 2012. 腾格里沙漠边缘表土磁学性质及其意义[J]. 第四纪研究, 32(4): 771-776. [Li Pingyuan, Liu Xiuming, Liu Zhi, et al. 2012. The magnetic properties of topsoil from the edge of Tengger Desert, and its environmental significance[J]. Quaternary Sciences, 32(4): 771-776.]
- 刘秀铭,刘东生,Shaw J. 1993. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 13(3): 281-287. [Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Shaw John. 1993. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance[J]. Quaternary Sciences, 13(3): 281-287.]
- 刘秀铭,刘植,吕镔,等. 2012. 塞尔维亚黄土的磁学性质及其环境意义[J]. 科学通报, 57(33): 3173-3184. [Liu Xiuming, Liu Zhi, Lü Bin, et al. 2012. Magnetic properties and environmental significance of loess in Serbia[J]. Chinese Science Bulletin, 57(33): 3173-3184.]
- 李杨,方晶,潘隆,等. 2018. 沉积物色度在古环境重建中的应用[J]. 气象科技进展, 8(6): 22-27. [Li Yang, Fang Jing, Pan Long, et al. 2018. Application of sediment chromaticity in paleo-environment reconstruction[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 8(6): 22-27.]
- 李越,宋友桂,王千锁. 2014. 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, 5(2): 67-75. [Li Yue, Song Yougui, Wang Qiansuo. 2014. Chroma characteristics in the Zhaosu loess section and its paleoclimatic significance[J]. Journal of Earth Environment, 5(2): 67-75.]
- 刘青松,邓成龙. 2009. 磁化率及其环境意义[J]. 地球物理学报, 52(4): 1041-1048. [Liu Qingsong, Deng Chenglong. 2009. Magnetic susceptibility and its environmental significances[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(4): 1041-1048.]
- 吕厚远,韩家懋,吴乃琴,等. 1994. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学(B辑), 24(12): 1290-1297. [Lü

- Houyuan, Han Jiamao, Wu Naiqin, et al. 1994. Analysis on magnetism and paleoclimate meaning in modern soil of China[J]. *Science in China (Series B)*, 24(12): 1290-1297.]
- 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. [Ma Yongfa, Zhan Tao, Yang Ye, et al. 2021. The indication of chroma characteristics and its palaeoclimatic significance in the Tianhengshan (THS) core from the eastern part of the Northeast China Plain to the evolution of Songnen paleo-lake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3519-3531.]
- 苗运法,杨胜利,卓世新,等. 2013. 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*, 33(4): 77-85. [Miao Yunfa, Yang Shengli, Zhuo Shixin, et al. 2013. Relationship between the color of surface sediments and precipitation in arid Northwest China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(4): 77-85.]
- 邱世藩,欧阳婷萍,朱照宇,等. 2014. 中国东部表层土壤磁化率特征及其指示意义[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 39(10): 1554-1564. [Qiu Shifan, Ouyang Tingping, Zhu Zhaoyu, et al. 2014. Magnetic susceptibility characteristics of weathering-pedogenic topsoil along east part of China and its significance[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 39(10): 1554-1564.]
- 宋瑞卿,朱芸,吕缤,等. 2016. 青藏高原表土的色度特征及其环境意义[J]. *亚热带资源与环境学报*, 11(1): 14-20. [Song Ruiqing, Zhu Yun, Lü Bin, et al. 2016. Topsoil color and its environmental significance in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 11(1): 14-20.]
- 宋扬,郝青振,葛俊逸,等. 2012. 黄土高原表土磁化率与气候要素的定量关系研究[J]. *第四纪研究*, 32(4): 679-689. [Song Yang, He Qingzhen, Ge Junyi, et al. 2012. Quantitative relationships between modern soil magnetic susceptibility and climatic variables of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 32(4): 679-689.]
- 田庆春,杨太保,石培宏,等. 2012. 可可西里BDQ0608钻孔沉积物色度环境意义及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(1): 133-140. [Tian Qingchun, Yang Taibao, Shi Peihong, et al. 2012. Environmental implication of color reflectance of drill hole BDQ0608, Keke Xili region and its influencing factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(1): 133-140.]
- 魏海涛,夏敦胜,陈发虎,等. 2008. 黄土高原及相邻地区表土磁化率与降水量的关系[J]. *冰川冻土*, 30(3): 433-439. [Wei Haitao, Xia Dunsheng, Chen Fahu, et al. 2008. Relationship between the magnetic susceptibility of surface soil and precipitation of Loess Plateau and adjacent area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(3): 433-439.]
- 郭光剑. 2001. 祁连山东段0.8Ma以来的构造隆升与气候变化[D]. 兰州:兰州大学:1-175. [Wu Guangjian. 2001. Tectonic uplifts and climatic changes in eastern Qilian Mountains over the past 0.8Ma [D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-175.]
- 吴开钦. 2022. 我国南方加积型网纹红土网纹形态特征及其与理化性质的关系[D]. 金华:浙江师范大学:1-88. [Wu Kaiqin. 2022. Morphological characteristics of reticulate red earth and their relationship with physicochemical properties in southern China[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-88.]
- 吴艳宏,李世杰. 2004. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 19(5): 789-792. [Wu Yanhong, Li Shijie. 2004. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation[J]. *Advances in Earth Science*, 19(5): 789-792.]
- 杨胜利. 2001. 土壤颜色的气候意义[D]. 兰州:兰州大学:1-99. [Yang Shengli. 2001. Climatic proxy of soil color[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-99.]
- 杨海江. 2023. 祁连山国家级自然保护区生态系统服务评估与适应性管理[D]. 兰州:兰州大学:1-191. [Yang Haijiang. 2023. Assessment and adaptive management of ecosystem services in Qilian Mountain National Nature Reserve[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-191.]
- 严永耀,安聪荣,苗运法,等. 2017. 新疆青海地区现代地表沉积物颜色指标与气候参数关系[J]. *干旱区地理*, 40(2): 355-364. [Yan Yongyao, An Congrong, Miao Yunfa, et al. 2017. Relationship between color index of modern surface sediment and climate parameters in the region of Xinjiang and Qinghai[J]. *Arid Land Geography*, 40(2): 355-364.]
- 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:地球科学*, 31(增刊): 175-181. [Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. 2001. Qualitative to semi-quantitative relationship between topsoil color and climate[J]. *Science China Earth Sciences*, 31(Suppl.): 175-181.]
- 张军周. 2018. 祁连山树木形成层活动及年内径向生长动态监测研究[D]. 兰州:兰州大学:1-134. [Zhang Junzhou. 2018. Cambial phenology and intra-annual radial growth dynamics of conifers over the Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-134.]
- 张卫国. 2023. 祁连山青海云杉林对气候变化的响应与适应[D]. 兰州:兰州大学:1-139. [Zhang Weiguo. 2023. Response and adaptation of Qinghai spruce forest to climate change in the Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1-139.]
- An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 36(1): 29-36.
- Balsam W L, Deaton B C, Damuth J E. 1999. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores[J]. *Marine Geology*, 161(2/3/4): 141-153.
- Bureau central de la CIE. 1978. Recommendations on uniform color spaces, color difference equations and psychometric color terms [M]. Paris: Bureau central de la CIE.
- Chen T H, Xie Q Q, Xu H F, et al. 2010. Characteristics and formation mechanism of pedogenic hematite in Quaternary Chinese loess and paleosols[J]. *CATENA*, 81(3): 217-225.

- Childs C W, Goodman B A, Churchman G J. 1979. Application of mössbauer spectroscopy to the study of iron-oxides in some red and yellow/brown soil samples from New Zealand[J]. *Developments in Sedimentology*, 27: 555-565.
- Dai S, Zhu Q, Huang Y B, et al. 2016. Early Cretaceous climate changes recorded in magnetic susceptibility and color index variations of the Lower Liupanshan Group, central China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 90(3): 1011-1023.
- Dearing J, Livingstone I, Zhou L P. 1996. A Late Quaternary magnetic record of Tunisian Loess and its climatic significance[J]. *Geophysical Research Letters*, 23(2): 189-192.
- Fernandez R N, Schulze D G, Coffin D L, et al. 1988. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4): 1023-1026.
- Giosan L, Flood R D, Aller R C. 2002. Paleooceanographic significance of sediment color on western North Atlantic drifts: I. Origin of color[J]. *Marine Geology*, 189(1/2): 25-41.
- Gou X, Chen F, Yang M, et al. 2005. Climatic response of thick leaf spruce (*Picea crassifolia*) tree-ring width at different elevations over Qilian Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 61(4): 513-524.
- Heller F, Liu T. 1986. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 13(11): 1169-1172.
- Long X Y, Ji J F, Balsam W. 2011. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(F3): F03015.
- Maher B A, Thompson R, Zhou L P. 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 125(1/2/3/4): 461-471.
- Robertson A R. 1977. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Research & Application*, 2(1): 7-11.
- Singh B, Gilkes R J. 1992. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of southwestern Australia[J]. *European Journal of Soil Science*, 43(1): 77-98.
- Sun Y B, He L, Liang L J, et al. 2011. Changing color of Chinese loess: Geochemical constraint and paleoclimatic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6): 1131-1138.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental magnetism*[M]. Boston: Allen & Unwin: 1-227.
- Torrent J, Schwertmann U, Fechter H, et al. 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content[J]. *Soil Science*, 136(6): 354-358.
- Yao T D, Thompson L G, Mosley-Thompson E, et al. 1996. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D23): 29531-29537.
- Zan J B, Fang X M, Nie J S, et al. 2011. Magnetic properties of surface soils across the southern Tarim Basin and their relationship with climate and source materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(3): 290-296.
- Zan J B, Fang X M, Nie J S, et al. 2012. Rock magnetism in loess from the middle Tian Shan: Implications for paleoenvironmental interpretations of magnetic properties of loess deposits in Central Asia [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(10): Q10Z50.
- Zhang J, Huang X Z, Wang Z L, et al. 2018. A Late-Holocene pollen record from the western Qilian Mountains and its implications for climate change and human activity along the Silk Road, northwestern China[J]. *The Holocene*, 28(7): 1141-1150.

Magnetic Susceptibility and Chromaticity Characteristics of Surface Soil in the Western Qilian Mountains and Their Environmental Significance

MA HuanHuan^{1,2}, DAI Shuang^{1,2}, MA XiaoJun^{1,2}, LIU FuTian^{1,2}, DING ZhongZhao^{1,2}, CAO PengJu^{1,2}, FANG XinNan^{1,2}

1. School of Earth Sciences, Lanzhou University & Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province), Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Mineralization and Exploration of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730000, China

Abstract: [Objective] The magnetic susceptibility and chroma of sediments have been widely used as climate proxies to restore the paleoclimate environment. It is important to study the change mechanism of these parameters in different environments for paleoclimate restoration. [Methods] The sampling and measurement of surface soil magnetic susceptibility and chroma were conducted in the western Qilian Mountains, northwestern China. The variation characteristics of magnetic susceptibility and chroma with precipitation, temperature, and altitude and the functional relationship between magnetic susceptibility and chroma and climate factors and altitude were established through regression analysis. [Results] The results showed that: (1) The magnetic susceptibility of surface soil in the western Qilian Mountains showed a significant nonlinear relationship with mean annual temperature and precipitation. When the mean annual precipitation was less than 300 mm and mean annual temperature was lower than 0 °C, the magnetic susceptibility showed a significant negative correlation with them. When the mean annual precipitation was greater than 300 mm and the mean annual temperature was higher than 0 °C, the magnetic susceptibility shows a significant positive correlation. In addition, there was a significant linear negative correlation between magnetic susceptibility and altitude, and the negative correlation between magnetic susceptibility and altitude was more significant in the low altitude region (1 600-3 300 m). Finally, the functional relationship between surface soil magnetic susceptibility, mean annual precipitation, and mean annual moderate altitude in the western Qilian Mountains was established through regression analysis. (2) There is a significant correlation between the brightness of the surface soil in the western Qilian Mountains and the yellowness, indicating that the yellowness has a greater influence on the brightness than the redness in the western Qilian Mountains. The relative content of goethite in the surface soil is higher than that of hematite, corresponding to the overall yellowish brown color of the surface soil. Chroma (brightness, redness, and yellowness) has no evident relationship with temperature and precipitation. Brightness and altitude showed a significant negative correlation, and the low altitude area (1 600-3 300 m) was more sensitive. [Conclusions] In comparison, the magnetic susceptibility of surface soil in the western Qilian Mountains can better reflect the information of climate and elevation in the western Qilian Mountains than chroma. For the changes of magnetic susceptibility, chroma, and altitude, the relationship between brightness and altitude is more significant in the low altitude area (1 600-3 300 m), followed by yellowness and magnetic susceptibility. In the high altitude area (3 700-4 300 m), the relationship between redness and brightness and altitude is more significant. Thus, to establish the relationship between a single index and climatic factors in the western part of Qilian Mountains, it is necessary to consider the influence of local climate, terrain, and even primitive rock on the magnetic susceptibility and colorimetry indexes.

Key words: western Qilian Mountains; topsoil; magnetic susceptibility; chroma; environmental significance

Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), No. 2019QZKK0704; National Natural Science Foundation of China, No. 41972213

Corresponding author: DAI Shuang, E-mail: daisher@lzu.edu.cn