

浑善达克沙地地表沉积物含铁矿物经向变化特征及其环境意义

郭凤战¹, 迟云平^{1,2}, 谢远云^{1,2}, 康春国³, 刘若男¹, 孙磊¹, 吴鹏¹, 魏振宇¹, 刘海金¹

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025

3. 哈尔滨学院地理系, 哈尔滨 150086

摘要 【目的】开展沙地表层沉积物气候代用指标与气候因子的相关性研究, 是确定不同气候代用指标可靠性与适用性的关键。【方法】沿浑善达克沙地东西向共采集 32 个地表沉积物样品, 通过色度、赤铁矿/针铁矿 (Hm/Gt)、磁化率与现代气候因子 (Mean Annual Precipitation, MAP 和 Mean Annual Temperature, MAT) 的相关分析, 探讨各指标与气候因子的关系。【结果】红度 (a^*)、黄度 (b^*) 与降水呈负相关关系, 与温度呈正相关关系, b^*/a^* 与气候因子同样表现出良好的相关关系, 指示其对降水和温度的敏感性; 而亮度 (L^*) 的气候指示意义不明显, 植被可能是其变化的直接因素。赤铁矿、Hm/Gt 值与年均降水表现为负相关关系, 与年均温则为正相关关系, 其可作为沙地水热条件变化的有效代用指标。磁化率在浑善达克沙地表现出复杂性和特殊性, 物源可能是其变化的主要影响因素。【结论】通过分析沙地地表沉积物含铁矿物经向变化特征及其与气候参数的关系, 为明确气候代用指标的环境意义提供重要参考。

关键词 浑善达克沙地; 色度; Hm/Gt; 磁化率; 地表沉积

第一作者简介 郭凤战, 男, 1996 年出生, 硕士, 第四纪地质与环境变化, E-mail: gzf980815@163.com

通信作者 迟云平, 男, 副教授, 第四纪地质与环境演化, E-mail: 1982cyp@163.com

中国分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

现代亚洲夏季风边界线附近分布着广袤的沙漠/沙地景观, 是揭示干旱事件成因以及亚洲季风环流演变的重要载体^[1-2], 气候变化与中国北方干旱—半干旱地区沙漠/沙地景观发育密不可分^[3]。亚洲季风的波动及其相应的降水和温度在不同空间尺度上的分布变化对区域环境演变产生了重要影响, 并通过大气粉尘排放反馈^[4-6]。中国北方沙地地表沉积物蕴含着丰富的气候信息, 通过了解气候代用指标与气候之间的关系可有效反演该区域古气候及亚洲季风的演化过程。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者在探究沉积物化学、物理及生物 (如色度、孢粉

收稿日期: 2024-03-23; 收修改稿日期: 2024-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171006, 41601200); 黑龙江省自然科学基金项目 (ZD2023D003); 哈尔滨师范大学博士启动基金项目 (XKB201418) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, 42171006, 41601200; Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, No. ZD2023D003; Doctoral Launch Foundation of Harbin Normal University, No. XKB201418]

组合、植硅体、地球化学和磁化率)^[7-14]等代用指标与气候因子之间的关系方面做了大量工作,并建立了良好的对应关系。色度作为沉积物最直观的特征之一,与气候因子密切相关,在气候与环境变化研究中得到广泛应用^[7]。而沉积物中赤铁矿、针铁矿的形成和含量同样与环境变化关系显著,且二者比值可有效指示东亚季风区气候干/湿变化^[11]。磁化率对沉积物中磁性矿物含量较为敏感,主要受降水等气候因素的影响,能够反映区域降水^[15-17]。

浑善达克沙地位于我国北方沙漠/黄土边界和干旱—半干旱气候的过渡地带,沙地的区域气候类型、地形地貌以及水热状况组合具有的自身独特性,是开展气候变化研究的理想载体^[12]。前人通过对浑善达克沙地风成沙—古土壤序列的研究表明,太阳辐射和东亚季风对浑善达克沙地影响显著,全新世中早期气候湿润,区域发育古土壤,风力较弱,植被固定,以低洼地区的浅湖或河流为特征^[18]。而全新世晚期夏季风减弱,气候干旱,风成活动强烈导致风成沙广泛发育,总体上呈现出一种渐进的干旱化趋势,即气温下降,但略有回升,湿度持续不断降低^[18-20]。先前学者对东亚季风重建的记录,揭示出中国北方半干旱沙漠地区受到温度和降水协同作用的影响^[21-22],但是未能分离温度和降水各自的影响信号。此外,常用的气候指标与现代气候参数间的关系尚不明确,相对于其他地区而言,浑善达克沙地还未展开类似的研究,这限制了我们对区域古气候进行详细模拟重建以及季风演化等方面的研究。

因此,本研究对浑善达克沙地地表沉积物样品进行色度、赤铁矿/针铁矿(Hm/Gt)以及磁化率等分析,明确沙地各气候代用指标的空间变化特征,探讨各个指标与气候因子的关系。研究结果对于认识浑善达克沙地不同指标与现代气候因子的关系,重建浑善达克沙地古环境变化及研究亚洲干旱化演化历程都具有重要意义。

1 研究区概况

浑善达克沙地是中国四大沙地之一(图1),位于内蒙古锡林郭勒盟中部和西南部,沙地大致从东南向西北方向分布,面积约29 500 km²,海拔高度介于1 000~1 500 m。其中固定—半固定沙丘占沙丘总面积的98%,而活动沙丘仅占2%^[23]。该地区的气候受温暖湿润的东南季风和干燥的西北季风影响,属于中温带大陆性气候,处于干旱—半干旱过渡带。年平均降水量在185~400 mm之间,年均温1.3 °C~5.1 °C,全年降雨量多集中在7—9月^[24]。该地由东向西年降水量呈现递减趋势,全区风速强劲,年平均风速为3.2~5.5 m/s。

研究区植被具有显著的地带性，由东向西依次为疏林草地、灌丛和荒漠草地^[25]。

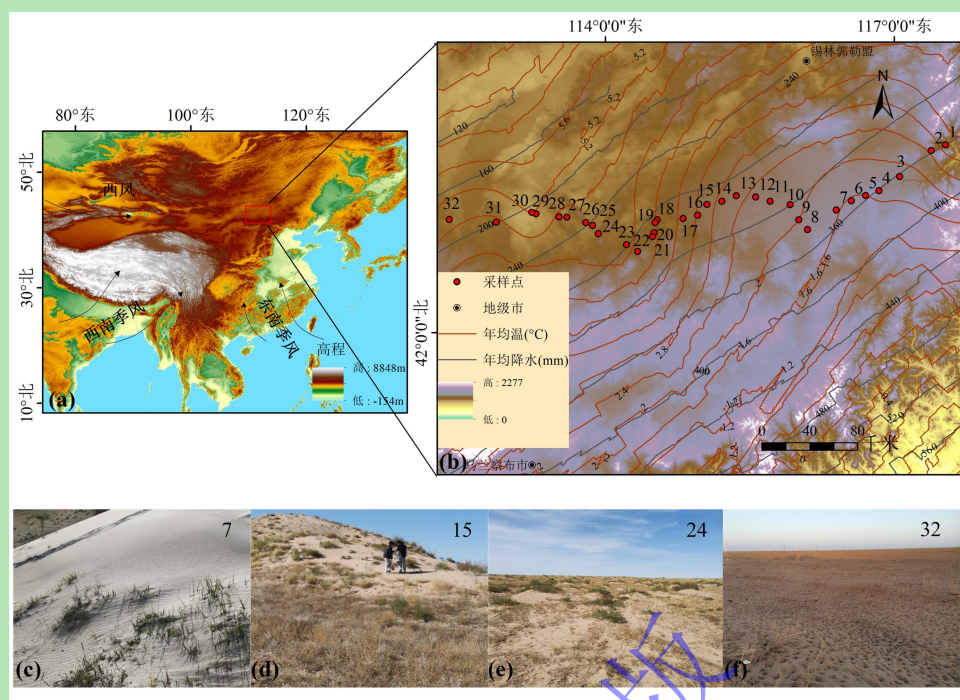


图1 研究区概况图

(a) 东亚地区 DEM 图；(b) 研究区等温线、等降水量线图；(c~f) 采样点 7, 15, 24, 32 地形地貌特征图

Fig.1 Maps of study area

(a) DEM map of East Asia; (b) isothermal and isoprecipitation lines in the study area; Topographic map of 7, 15, 24, 32 sampling points

2 材料与方法

2.1 样品采集

地表沉积物样品的采集横穿浑善达克沙地腹地，主要沿克什克腾旗—桑根达来—乌兰查布苏木—赛罕乌力吉苏木—苏尼特右旗一线东西向进行取样。采样点的经度范围 $112^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ ，纬度范围为 $42^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ ，共采取固定—半固定沙等风成沙样品 32 个（图 1b 中表示为 1~32），为了突出样品的代表性，采样时清除表层 0~5 cm 沙土，采集 5~10 cm 样品，同时记录采样点的经纬度坐标。采样位置最大程度上远离道路、城镇和人类活动频繁的区域，尽可能避免人为扰动的影响。

2.2 分析及数据处理方法

漫反射光谱分析（Diffuse Reflectance Spectroscopy, DRS），将样品在实验室自然风干后，筛选出 $<63\ \mu\text{m}$ 的组分，从而避免粒度组分对实验的影响。对样品进行 DRS 分析，在测试前，用硫酸钡粉末进行仪器校正。称取约 1 g 处理好的样品均匀的铺满在测试皿中，确保样品完全覆盖玻片后压紧固定，使用 Agilent Technologies 公司的 Cary 4000 UV-Vis

型紫外—可见分光光度计，以 1 nm 为间隔对 300~800 nm 的可见光波段进行扫描，将获取的样品反射率（R%）进行一阶导数计算，用以计算赤铁矿、针铁矿的峰值高度及二者的比值^[26-27]。DRS 分析测试在哈尔滨师范大学光电带隙材料教育部重点实验室开展。

色度分析采用美能达 CM700d 分光测色仪进行，使用 CIEL*a*b*表色系统来描述土壤的颜色变化，表色系统主要是通过亮度（L*）、红度（a*）和黄度（b*）来定量描述样品的颜色变化^[28]。其中 L*代表亮度，变化于 0（黑）和 100（白）之间；a*代表红度，变化于-60（绿色）和 60（红色）之间；b*代表黄度，变化于-60（蓝色）和 60（黄色）。样品颜色测量前，首先利用仪器自带的标准测试白板及黑板对仪器背景进行校正，然后称取适量 <math> < 63 \mu\text{m}</math> 的样品均匀地覆盖在测试皿上，采用玻璃片压实样品，为避免测试存在误差，每个样品选择 3 个区域进行测试，取平均值作为该样品最终的 L*、a*和 b*值。

使用英国 Bartington MS2B 磁化率仪进行磁化率测试，将样品自然风干后置于弱磁性盒中进行称重，随后进行低频磁化率（470 Hz）和低频磁化率（4 700 Hz）的测试，对每个样品进行两次测试取平均值，作为测试得到的低频磁化率（ χ_{lf} ）和高频磁化率（ χ_{hf} ），并由此计算出百分比频率磁化率（ $\chi_{fd}\%$ ），计算公式为：

$$\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} * 100 \quad (1)$$

色度和磁化率实验在哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室进行。

本研究使用的气象数据源自于 WorldClim 数据集 www.worldclim.org，空间分辨率为 1 km²，版本为 2.1，时间是 1970~2000 年。使用 ArcGIS 软件对采样点进行普通克里金插值，获得相应的年均降水量（Mean Annual Precipitation, MAP）、年均温（Mean Annual Temperature, MAT）。

3 结果

3.1 色度变化特征

通过对 32 个地表样品的测试，获得了浑善达克沙地现代地表沉积物色度的空间变化特征（图 2a~c），结果表明 a*、b*的变化范围较小，从东部到西部整体呈现增高的趋势，其中 a*的最小值为 3.87，最大值 8.26，波动区间为 3.87~8.26，平均值为 6.03。而 b*的最小值为 9.89，最大值为 17.44，波动区间为 9.89~17.44，平均值为 14.19。整体上 b*的变

化幅度高于 a^* ，且 a^* 与 b^* 之间的相关性较强。 L^* 的变化范围不大，从东部到西部无明显变化规律，最大值为 59.54，最小值为 48.8，波动区间为 48.8~59.54，平均值为 54.72。

3.2 漫反射光谱变化特征

漫反射光谱一阶导数不仅能够识别赤铁矿和针铁矿，而且可以对其进行半定量分析 [29-30]。研究表明，赤铁矿、针铁矿一阶导数峰值的高低与含量有关 [31]。浑善达克沙地表层沉积物漫反射光谱的一阶导数具有三个特征峰，指示了样品中赤铁矿和针铁矿的含量。其中针铁矿主峰在 535 nm，次峰在 435 nm 附近；赤铁矿的峰值在 565 nm 附近。但针铁矿主峰易受基体效应和赤铁矿一阶导数特征峰影响，因此常用次峰来指示针铁矿的含量。如图所示（图 2g~i），赤铁矿一阶导数峰高介于 0.08~0.19 之间，平均峰高为 0.14，针铁矿一阶导数峰高介于 0.06~0.09 之间，平均峰高为 0.07。Hm/Gt 值介于 1.2~2.73 之间，平均值为 1.85，呈现出自东向西增加的趋势。

3.3 磁化率变化特征

磁化率测试结果表明（图 2d, f），低频磁化率（ χ_{lf} ）与高频磁化率（ χ_{hf} ）变化方向相同，从东部到西部整体呈现增高的趋势，且东部变化幅度较小，西部变化幅度较大，低频磁化率的变化范围介于 $2.26 \times 10^{-8} \sim 37.61 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $13.41 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。高频磁化率的变化范围介于 $2.05 \times 10^{-8} \sim 36.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $12.81 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，整体值较低。百分比频率磁化率（ $\chi_{fd}\%$ ）的变化范围介于 0.27~16.21，平均值为 7.64，从东到西趋势不明显。

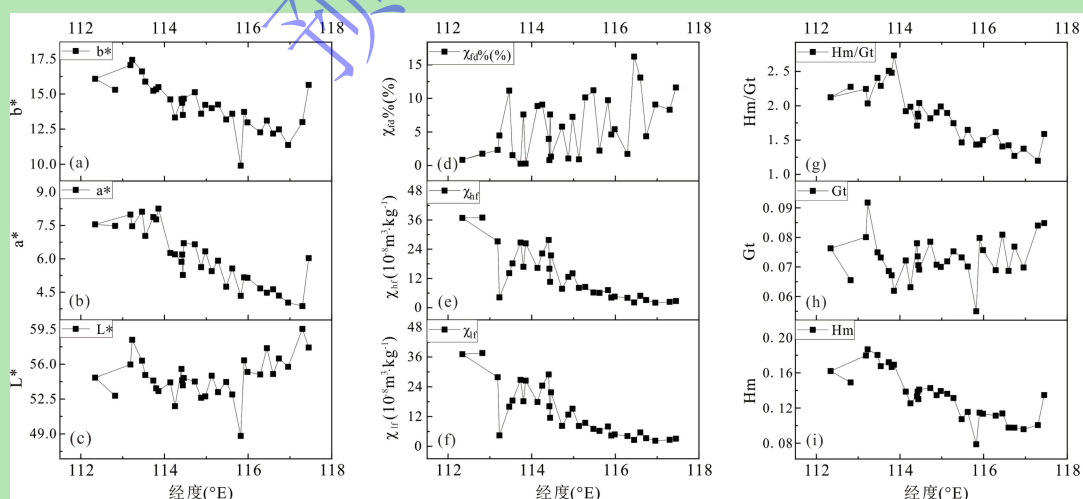


图 2 浑善达克沙地地表沉积物色度、磁化率及 DRS 空间变化图

(a~c) 色度指标变化图；(d, f) 磁化率指标变化图；(g~i) Hm/Gt 变化图及 Gt、Hm 一阶导数峰高变化图

Fig.2 Spatial variation of chromaticity, magnetic susceptibility and DRS of surface sediments in Otindag

Sandy Land

(a-c) chromaticity index change diagram; (d,f) magnetic susceptibility index change diagram; (g-i) Hm/Gt change diagram and Gt, Hm first derivative peak height change diagram

4 讨论

4.1 色度参数与气候因子之间的关系

前人研究表明, 不同地区色度蕴含的环境信息并不相同。例如, 在我国西北干旱区地表沉积物 L^* 与 a^* 、 b^* 之间的相关性虽然较低, 但 a^* 和 b^* 之间具有很好的相关性, 且各指标与降水之间相关性均较好^[32]。在青藏高原、新疆及青海等地表层沉积物 a^* 和 b^* 与降水之间存在着明显的负相关, 而与温度之间没有明显的相关性^[33-34]。但是在云南, 土壤 a^* 与气候因子之间的关系并不明显, 反而 L^* 与降水和温度呈现较好的相关性, 能够更好地反应气候变化^[35]。在古气候重建方面, 中国呼伦贝尔沙地、黄土高原地区全新世以来的风成堆积物, 其 a^* 可以作为区域气候的代用指标, a^* 的增加代表着夏季风的增强, 意味着该地区的气候趋于温暖湿润^[36-37]。相反, a^* 越小, 则说明夏季风在减弱, 气候以冷干为主。

将浑善达克沙地土壤 a^* 、 b^* 值与气候参数进行相关性分析, 结果显示 a^* 和 b^* 与年均降水之间表现出明显的负相关关系 (相关系数分别为 -0.88 和 -0.77 , $P < 0.01$) (图 3b, c), 与温度之间表现出明显的正相关关系 (相关系数分别为 0.89 和 0.82 , $P < 0.01$) (图 3e, f)。在色度指标中, a^* 值改变与赤铁矿等致色矿物有关, 赤铁矿的形成由脱水反应决定, 短时降雨及持续干燥的气候条件, 使土壤具有较强的氧化性, 有利于赤铁矿的形成^[38]。在持续湿润的条件下, b^* 更容易受由硅酸盐中的氧化铁或其它母质的溶解沉淀而形成的针铁矿的影响^[39]。相对而言, 该研究区 a^* 和气候因子间的相关性优于 b^* 。研究表明, 在降雨增多、气温上升等其他因素作用下, 矿物逐渐分解, 并伴随着富硅铝矿物与铁氧化物的形成, 导致土壤的 a^* 和 b^* 接近同步增强^[40]。研究区 a^* 和 b^* 相关性明显 (相关系数为 0.87 , $P < 0.01$) (表 1), 这说明 a^* 和 b^* 很可能是由相似的气候因子控制, 这一点在其他相似地区也得到了验证^[32]。此外, 研究区 a^* 与 MAP 呈显著的负相关关系, 这一点与中国南方粤闽地区相似, 但两者形成机制可能不同^[41]。由于 a^* 与 MAT 呈显著的正相关关系, 且研究区 MAT 与 MAP 空间上呈反向变化, 正是鉴于这种独特气候变化以及母质因素, 所以我们认为温度和物源可能是 a^* 的影响因素。

此外, 虽然 b^* 与针铁矿的含量关系十分紧密, 但是一些研究发现, 在当针铁矿含量

较少时，两者之间的相关性会变差^[42]。而且在沉积过程中黄铁矿、褐铁矿的生成以及其他含铁矿物也会影响 b^* 的变化^[42]。浑善达克沙地降水量较少，蒸发量很高，地表长期处于干燥的环境中，促使了赤铁矿的生成，进而导致 a^* 值的增加。 b^*/a^* 为黄度与红度的比值，它能较好地反映土壤中针铁矿与赤铁矿（Gt/Hm）相对含量的比值^[43]。将 b^*/a^* 与气候参数相关性分析， b^*/a^* 与 MAP 呈正相关关系（相关系数为 0.78， $P < 0.01$ ）， b^*/a^* 与 MAT 呈负相关关系（相关系数为 -0.74， $P < 0.01$ ）（表 1）。研究表明，针铁矿/赤铁矿值越高，说明该地区的气候比较潮湿，反之，则说明该地区的气候比较干燥^[44]。这一点与浑善达克沙地水热条件相吻合。因此浑善达克沙地 a^* 、 b^* 和 b^*/a^* 可以作为气候变化的有效代用指标，且 a^* 在该研究区比 b^* 对气候因子的响应更加敏感。

对 L^* 与气候因子进行相关性分析结果显示， L^* 与年均降水和年均温之间几乎没有相关性，这表明气候因子可能不是浑善达克沙地 L^* 值的变化直接控制因素。研究认为，在气候变化的条件下， L^* 与有机质含量和碳酸钙含量关系更为密切^[45-46]。在干燥的气候条件下，降雨减少，有机物质生成减少， L^* 增加；在降水、气温升高的条件下，有利于植物的生长，提高了有机质含量，进而导致 L^* 降低。而对于 L^* 与碳酸钙含量的关系，黄土的研究显示出两者显著的正相关性^[47]，但在干旱一半干旱的沙地中 L^* 与碳酸钙含量之间的关系似乎更复杂，不同类型的沙丘与碳酸钙含量有直接关系，固定沙丘碳酸钙含量明显高于半固定及流动沙丘的含量^[48]。此外，受生物作用的影响，有机质参与的生物矿化也对碳酸钙含量产生了重要的影响^[49]。由此看来，浑善达克沙地地表沉积物 L^* 没有表现出明显的随气候变化的趋势，表明气候不是其变化的直接因素；相较气候因素而言，沙地植被覆盖不同导致的表土有机质变化可能是其 L^* 变化的直接因素。这一认识与我们野外的观察是相符合的，研究样品主要采自固定一半固定沙丘，其上覆植被具有一定的差异，植被及其下伏表土有机质含量对 L^* 的变化产生了直接的影响，并掩盖了气候的信息。综上所述，我们认为浑善达克沙地色度部分指标一定程度上反映了该地区现代气候因子的空间变化， a^* 、 b^* 和 b^*/a^* 能够作为气候变化的有效代用指标，且 a^* 在该研究区比 b^* 对气候因子的响应更加敏感；而 L^* 的变化主要受植被的直接影响，其蕴含的气候含义则表现的不明显。

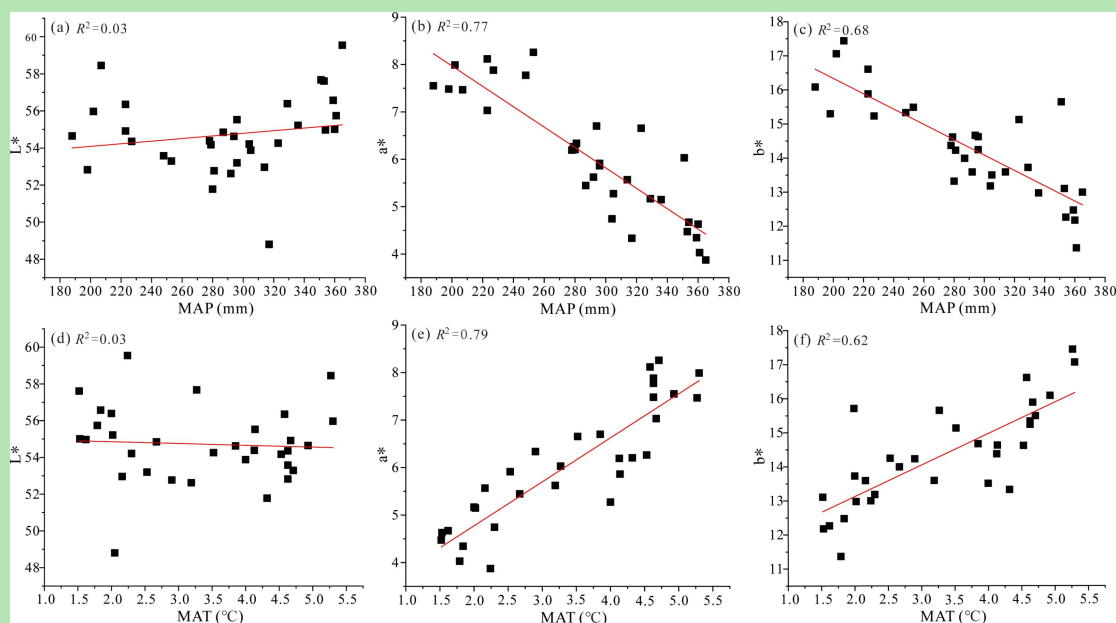


图3 色度各参数与气候因子相关性分析

(a) L*与MAP; (b) a*与MAP; (c) b*与MAP; (d) L*与MAT; (e) a*与MAT; (f) b*与MAT

Fig.3 Analyses of correlations between chromaticity parameters and climatic factors

(a) L* vs. MAP; (b) a* vs. MAP; (c) b* vs. MAP; (d) L* vs. MAT; (e) a* vs. MAT; (f) b* vs. MAT

表1 各指标的相关性分析结果

Table 1 Correlation analysis of each index

指标	MAP	MAT	经度	χ_{if}	$\chi_{if}^{\%}$	L*	a*	b*	b*/a*	Hm/Gt
MAP	1									
MAT	-0.87**	1								
经度	0.95**	-0.89**	1							
χ_{if}	-0.77**	0.76**	-0.82**	1						
$\chi_{if}^{\%}$	0.51**	-0.36*	0.61**	-0.47**	1					
L*	0.18	-0.06	0.27	-0.33	0.39*	1				
a*	-0.88**	0.89**	-0.86**	0.73**	-0.38	-0.10	1			
b*	-0.77	0.82**	-0.72**	0.52**	-0.20	0.30	0.87**	1		
b*/a*	0.87**	-0.74**	0.81**	-0.73**	0.49**	0.53**	-0.87**	-0.55**	1	
Hm/Gt	-0.85**	0.84**	-0.85**	0.74**	-0.49*	-0.26	0.94**	0.73**	-0.89**	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 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

4.2 漫反射光谱特征和气候之间的关系

赤铁矿、针铁矿作为一种普遍存在于沉积物中的矿物，其蕴含的环境信息对古环境的重建具有重要意义^[50]。赤铁矿是水铁矿在温热、干燥环境中经脱水重组而成；而针铁矿是在湿润的环境下，从水溶液中直接生成的^[50]。两者之间存在着一定的竞争关系，其生成速度受环境因子的影响，也就决定了赤铁矿与针铁矿的相对比例^[51]。鉴于赤铁矿和针铁矿对水热变化特征敏感的特征，将研究区赤铁矿和针铁矿的一阶导数峰高与气候因子进行相关性分析，发现赤铁矿与年均降水之间为负相关关系，与温度之间为正相关关系（相关系数分别为-0.87、0.89， $P < 0.01$ ）（图 4b, e），这与赤铁矿需要温暖干燥的形成条件相吻合^[52]。而针铁矿与气候因子之间相关性较低（图 4a, d），可能原因是针铁矿主要

是由母质分解沉淀形成的，并不受气候条件的控制^[53-55]。

由于风成沉积物母质的矿物含量不同，单一的针铁矿、赤铁矿含量无法很好地指示温度或降水的变化，因此常采用二者比值（Hm/Gt）指示区域气候环境的变化^[56]。对 Hm/Gt 比值与气候参数进行相关性分析，结果显示该区域 Hm/Gt 比值与年均降水之间呈现负相关关系(相关系数为 -0.68 ， $P < 0.01$)（图 4c），与年均温之间呈现正相关关系(相关系数为 0.71 ， $P < 0.01$)（图 4f）。Hm/Gt 比值对气候变化敏感，在沉积物古降水重建中得到了充分应用，Hm/Gt 高值指示了区域气候干旱，低值指示湿润的气候环境^[55]。前人研究表明，中国黄土高原蓝田盆地黄土—古土壤序列中 Hm/Gt 比值已被应用于古降水重建，较大的 Hm/Gt 比值指示了较小的降水量；较小的 Hm/Gt 值则反映了较大的降水量^[57]；在中亚伊犁盆地黄土剖面中，Hm/Gt 比值可有效指示黄土干湿条件的演变，较低的 Hm/Gt 比值表明环境潮湿，反之亦然^[58]。热力学实验显示，当水活度相同时，高温对针铁矿转化为赤铁矿有利；但在同样的温度下，高湿度对赤铁矿转化为针铁矿有利^[53,56]。浑善达克沙地西部降水比东部明显减少，而温度东西部高于中部，大致呈马鞍形分布，与 Hm/Gt 比值变化相一致，这也表明 Hm/Gt 比值与气温、降水量之间存在着紧密的联系，可以作为有效的气候变化指标，反映沙地水热条件的变化。

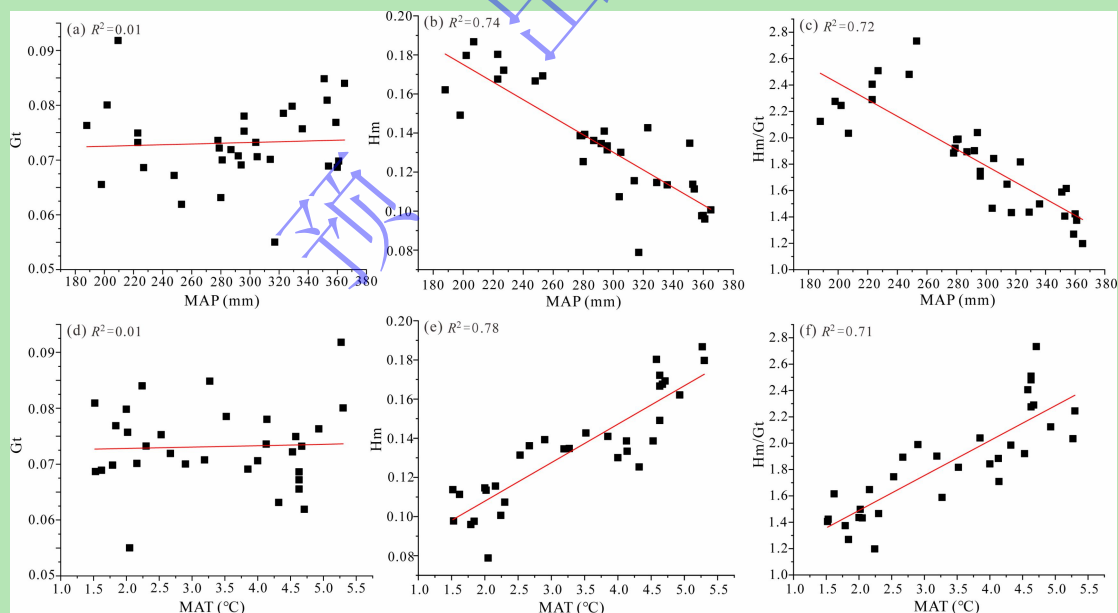


图 4 Gt, Hm 和 Hm/Gt 与气候因子相关性

(a) Gt 与 MAP 相关性分析；(b) Hm 与 MAP 相关性分析；(c) Hm/Gt 与 MAP 相关性分析；(d) Gt 与 MAT 相关性分析；(e) Hm 与 MAT 相关性分析；(f) Hm/Gt 与 MAT 相关性分析

Fig.4 Analyses of correlations between Gt, Hm and Hm/Gt climatic factors

(a) Gt vs. MAP; (b) Hm vs. MAP; (c) Hm/Gt vs. MAP; (d) Gt vs. MAT; (e) Hm vs. MAT; (f) Hm/Gt vs. MAT

4.3 磁化率区域特征及其与气候的关系

磁化率主要受控于成土过程中磁性矿物含量的变化,是物质被磁化难易程度的一个度量,可以进一步指示气候环境的变化^[59]。研究表明,东亚季风对土壤磁学性质的影响很大,磁化率受土壤形成过程的影响,与降水之间存在着显著的正相关关系,因而可以用来指示季风活动的强弱以及源区的变化^[60]。然而,随着研究区范围的不断扩展以及高分辨率的古气候研究,其磁化率值随降水的变化规律在不同地区则表现的不尽相同。

浑善达克地区表层沉积物磁化率(χ_{lf})平均值远低于黄土高原^[61],表明该区域的磁性矿物含量低于黄土高原区。我们对浑善达克沙地表层沉积物磁化率(χ_{lf})与年均降水和年均温之间进行相关性分析发现(图 5b, d),研究区降水量与表土成壤强度变化特征不一致,与降水呈现显著的负相关关系(相关系数为-0.78, $P < 0.01$),与温度呈现显著的正相关关系(相关系数为 0.76, $P < 0.01$),百分比频率磁化率(χ_{fd})与气候因子之间关系均不显著(图 5a, c)。一般认为,沉积物磁化率的变化主要受降水的影响,磁化率值越高,指示区域气候湿润,降水充沛^[59]。而本研究表现出完全相反的变化趋势,对于磁化率与降水的负相关关系目前主要有两种解释,其一是在高纬度地区年蒸发量较低,同时湿度较大,演变成还原条件下的成土过程,在此过程中,磁赤铁矿、磁铁矿等喜氧化环境的强磁性矿物逐步转变为适应其还原环境的弱磁性矿物^[62],进而导致了磁化率值在降水较高的土壤层偏低^[63],如中国东北哈尔滨、阿拉斯加以及西伯利亚地区^[60,62-63]。其二是当年均降水达到 1 000~1 200 mm,磁化率值与降水之间的正相关关系出现了阈值,当达到这个阈值的时候,磁化值最大;超过这个阈值时,磁化率会随着降水的增加而降低^[64]。因沙地表土样品受后期的改造作用微弱,短时间内成壤作用还不足以产生,该研究区较低的磁化率也说明了成壤作用较低,所以气候变化对磁性矿物的改造作用渺小。浑善达克沙地属中温带大陆性气候,年均降水量为 185~400 mm,年蒸发量为 1 640~2 969 mm^[65]。由以上看出该地区远远达不到还原条件下的成土过程,也没有达到高降水量情况下磁化率值与降水之间出现的阈值情况。因而以上两种模式并不足以解释这种负相关关系。

研究表明,百分比频率磁化率相较于质量磁化率能够更好得判断降水的变化,对气候更敏感^[66]。浑善达克沙地百分比频率磁化率与气候因子的相关性表现较差,进一步指示了气候参数并不是其磁化率变化的主要因素。沙漠地区由于气候干燥,磁化率的变化很少受到降雨的影响,而更多地体现了母岩的磁学性质^[67]。母岩在不同的地面应力条件下形成的成土母质,经过不同的物理、化学和生物作用,使其向着成土过程发展,最终随着

风力作用由源区搬运至汇区。随着实验方法的不断扩展，前人运用了多种方法对浑善达克沙地的物源进行了研究。根据沉积物粒度的分析，认为沙地西部是不同类型的风沙物源的汇集区，而沙地中东部南缘和东缘的河流对该区的沙源也有一定的贡献^[68]；依照石英释光信号灵敏度特点，得出该地风沙沉积来自于周围造山带^[69]；根据沙粒中的石英氧同位素分析的结果，确定了该地区的风成沙沉积物为火成岩^[70]；而通过对此沙地碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素的结果，揭示出沙地物源来自燕山褶皱带与中亚造山带^[71]。上述研究表明，浑善达克沙地物源信息较为复杂。综上所述，我们认为气候因素不是磁化率变化的主控因素，而物源的变化可能是其变化的主要因素，单一的使用磁化率、百分比频率磁化率并不能成为研究该区气候变化的理想指标。由此可见，浑善达克沙地的磁化率表现出其特殊性和复杂性，在具体的应用中，需要根据研究区特征进一步明确其环境意义，才能使获得的信息更为准确。

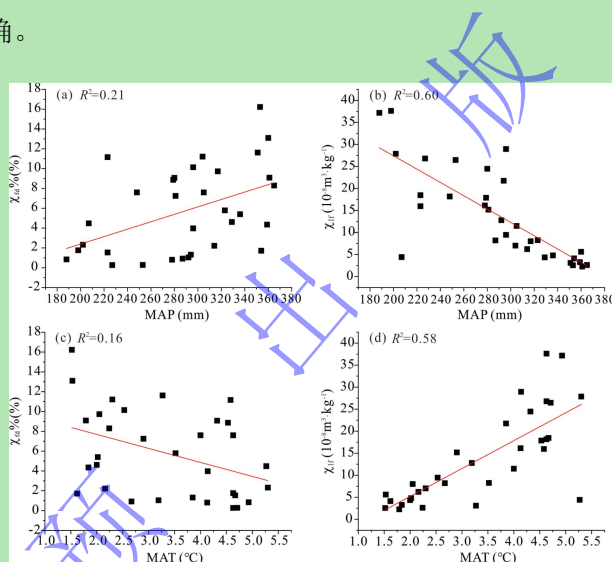


图5 磁化率与气候因子相关性

(a) $\chi_{fd}\%$ 与 MAP 相关性分析；(b) χ_{if} 与 MAP 相关性分析；(c) $\chi_{fd}\%$ 与 MAT 相关性分析；(d) χ_{if} 与 MAT 相关性分析

Fig.5 Analyses of correlations between magnetic susceptibility and climatic factors

(a) $\chi_{fd}\%$ and MAP; (b) χ_{if} and MAP; (c) $\chi_{fd}\%$ and MAT; (d) χ_{if} and MAT

5 结论

(1) 色度与气候因子相关性分析表明， a^* 、 b^* 和 b^*/a^* 与气候因子之间具有较好的相关性，表明三者都能够作为气候变化的有效代用指标，且 a^* 对气候因子的响应更加敏感；而 L^* 与气候参数的相关性较差，揭示出其变化主要受植被的直接影响，而对于气候的指示意义不明显。

(2) 漫反射光谱显示，赤铁矿对气候因子的响应程度高于针铁矿；Hm/Gt 比值与年

均降水之间呈现负相关关系,与年均温之间呈现正相关关系。揭示了赤铁矿和 Hm/Gt 值对降水、温度的敏感性,可以有效反映沙地水热条件的变化。

(3) 磁化率在该区域没有表现出与气候的良好对应关系,表明气候不是其变化的主要因素;物源可能是沙地磁化率变化的主要因素,进一步表明沙地磁化率变化的复杂性和特殊性,在沙地应用磁化率进行气候环境研究时需慎重考虑。

致谢 漫反射光谱实验得到了哈尔滨师范大学光电带隙材料教育部重点实验室刘悦婕老师的帮助,色度、磁化率实验得到了哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室研究生张悦仪和王蜜娇的帮助,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 孙继敏,丁仲礼,刘东生,等.末次间冰期以来沙漠-黄土边界带的环境演变[J].第四纪研究,1995,15(2):117-122. [Sun Jimin, Ding Zhongli, Liu Tungsheng, et al. Environmental changes in the desert-loess transitional zone of North China since beginning of the last interglacial[J]. Quaternary Sciences, 1995, 15(2): 117-122.]
- [2] 董光荣,李森,李保生,等.中国沙漠形成演化的初步研究[J].中国沙漠,1991,11(4):23-32. [Dong Guangrong, Li Sen, Li Baosheng, et al. A preliminary study on the Formation and evolution of deserts in China[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(4): 23-32.]
- [3] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.
- [4] Yang S L, Ding Z L, Li Y Y, et al. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(43): 13178-13183.
- [5] Xu Z W, Mason J A, Xu C, et al. Critical transitions in Chinese dunes during the past 12,000 years[J]. Science Advances, 2020, 6(9): eaay8020.
- [6] Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science[J]. Aeolian Research, 2011, 2(4): 181-204.
- [7] Ding Z Y, Lu R J, Wang L D, et al. Early-Mid Holocene climatic changes inferred from colors of Eolian deposits in the Mu Us Desert[J]. Geoderma, 2021, 401: 115172.
- [8] Liu B, Zhao H, Jin H L, et al. Quantitative estimates of Holocene precipitation from Aeolian sand-palaeosol sequences across the Ordos Plateau, northern China, based on surface soil geochemistry[J]. CATENA, 2023, 229: 107232.
- [9] Xu Q H, Cao X Y, Tian F, et al. Relative pollen productivities of typical steppe species in northern China and their potential in past vegetation reconstruction[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(6): 1254-1266.
- [10] Lu H Y, Wu N Q, Yang X D, et al. Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China I: Phytolith-based transfer functions[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(9/10): 945-959.
- [11] Shen X B, Hong H L, Huang S M, et al. Terrestrial paleoclimate changes recorded by Pleistocene red earth deposits at the Gaolingpo Paleolithic site, Bose Basin, South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, 614: 111438.
- [12] Liu X K, Lu R J, Lü Z Q, et al. Magnetic susceptibility of surface soils in the Mu Us Desert and its environmental significance[J]. Aeolian Research, 2017, 25: 127-134.
- [13] Chen Y Y, Lu H Y, Yi S W, et al. A preliminary quantitative reconstruction of precipitation in southern Mu Us sandy land at

- margin of Asian monsoon-dominated region during Late Quaternary[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(3): 301-310.
- [14] Sun Y B, Liang L J, Bloemendal J, et al. High-resolution scanning XRF investigation of Chinese loess and its implications for millennial-scale monsoon variability[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016, 31(3): 191-202.
- [15] 刘秀铭, 刘东生, Shaw J. 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 Xiuming, Liu Tungsheng, Shaw J. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(3): 281-287.]
- [16] 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]
- [17] 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 Tungsheng, Heller F, et al. Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(1): 42-50.]
- [18] Chen D X, Lu R J, Ma L, et al. Holocene climate change in the Hunshandake Sandy Land, Northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 643: 112182.
- [19] Fan J W, Xiao J L, Wen R L, et al. Carbon and nitrogen signatures of sedimentary organic matter from Dali Lake in Inner Mongolia: Implications for Holocene hydrological and ecological variations in the East Asian summer monsoon margin[J]. *Quaternary International*, 2017, 452: 65-78.
- [20] 梁玉莲. 内蒙锡盟桑根达来 3600 年来的植被及环境演变[J]. *中国沙漠*, 1991, 11(2): 33-38. [Liang Yulian. Vegetation and environment changes since 3600 B. P. in Sanggandalai Region of Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 1991, 11(2): 33-38.]
- [21] Zhou Y W, Han Z Y, Li X S, et al. Sandy loess records of precipitation changes and monsoon migrations in the Hunshandake sandy land since the last glacial maximum[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33(9): 945-957.
- [22] Goldsmith Y, Broecker W S, Xu H, et al. Northward extent of East Asian monsoon covaries with intensity on orbital and millennial timescales[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(8): 1817-1821.
- [23] 刘璐, 谢远云, 迟云平, 等. 地球化学组成对浑善达克沙地与科尔沁沙地风化和沉积循环特征及其物源的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(4): 192-206. [Liu Lu, Xie Yuanyun, Chi Yunping, et al. Geochemical compositions of the Onqin Daga Sand Land and Horqin Sand Land and their implications for weathering, sedimentation and provenance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(4): 192-206.]
- [24] Sun J M, Zhang M Y, Liu T. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D10): 10325-10333.
- [25] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6): 65-77. [Qi Danhui, Yang Hongxiao, Lu Qi, et al. Biodiversity of plant communities and its environmental interpretation in the Otindag Sandy Land, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6): 65-77.]
- [26] Jiang Z, Liu Q, Colombo C, et al. Quantification of Al-goethite from diffuse reflectance spectroscopy and magnetic methods[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1): 131-144.
- [27] 李香钰, 方小敏, 杨一博, 等. 3Ma 以来黄土高原朝那黄土-红粘土序列赤铁矿记录及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(4): 700-708. [Li Xiangyu, Fang Xiaomin, Yang Yibo, et al. Hematite record of 3Ma loess-red clay sequences in the central Chinese loess plateau 3Ma and its paleoclimatic significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 700-708.]
- [28] Robertson A R. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Research & Application*, 1977, 2(1): 7-11.
- [29] Cudahy T J, Ramanaidou E R. Measurement of the hematite: Goethite ratio using field visible and near-infrared reflectance

- spectrometry in channel iron deposits, western Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44(4): 411-420.
- [30] Jiang Z X, Liu Q S, Colombo C, et al. Quantification of Al-goethite from diffuse reflectance spectroscopy and magnetic methods[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1): 131-144.
- [31] Ji J F, Chen J, Balsam W, et al. High resolution hematite/goethite records from Chinese loess sequences for the last glacial-interglacial cycle: Rapid climatic response of the East Asian Monsoon to the tropical Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(3): L03207.
- [32] 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.]
- [33] 严永耀, 安聪荣, 苗运法, 等. 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*, 2017, 40(2): 355-364. [Yan Yongyao, An Congrong, Miao Yunfa, et al. Relationship between color index of modern surface sediment and climate parameters in the region of Xinjiang and Qinghai[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 355-364.]
- [34] 宋瑞卿, 朱芸, 吕镔, 等. 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*, 2016, 11(1): 14-20. [Song Ruiqing, Zhu Yun, Lü Bin, et al. Topsoil color and its environmental significance in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(1): 14-20.]
- [35] 姬红利, 周文君, 张一平, 等. 云南土壤色度与海拔及气候的关系研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(S2): 352-358. [Ji Hongli, Zhou Wenjun, Zhang Yiping, et al. Relationship between soil color and climatic factors in Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2013, 35(S2): 352-358.]
- [36] 赵延卓, 谢远云, 康春国, 等. 呼伦贝尔沙地风成砂-古土壤剖面记录的全新世气候变化[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(5): 85-96. [Zhao Yanzhuo, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Holocene climate change recorded by paleosol profile in Hulun Buir Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5): 85-96.]
- [37] Chen Y M. Climate instability during the last glaciation recorded in the Yuanbu loess section[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(4): 453-459.
- [38] 王杰民, 闫宝华, 吴松, 等. 柴达木盆地东北部中新世沉积物色度记录的气候变化[J]. *甘肃地质*, 2012, 21(1): 6-11. [Wang Jiemin, Yan Baohua, Wu Song, et al. Climate changes recorded by colors of the Miocene sediments in northeast Qaidam Basin[J]. *Gansu Geology*, 2012, 21(1): 6-11.]
- [39] Wang Q S, Song Y G, Zhao Z J, et al. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last glacial-interglacial cycle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 116: 132-138.
- [40] 程瑜, 乔彦松, 刘宗秀, 等. 甘肃灵台县秦红粘土的磁性地层及其色度记录[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(2): 391-398. [Cheng Yu, Qiao Yansong, Liu Zongxiu, et al. Magnetostratigraphy and chroma records of a red clay Formation near Lingtai county of Gansu province[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 391-398.]
- [41] Tang J M, Lü B, Liu X, et al. Chromaticity characteristics of soil profiles in the coastal areas of Fujian and Guangdong, southern China and their climatic significance[J]. *Quaternary International*, 2023, 649: 38-45.
- [42] 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 significance to paleoclimatology[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(2): 15-23.]
- [43] 郑兴芬, 吕镔, 陈梓炫, 等. 不同空间范围土壤色度的纬向变化特征及其气候意义[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1186-1196. [Zheng Xingfen, Lü Bin, Chen Zixuan, et al. Latitudinal variation characteristics of soil color in different spatial extents and their climatic significance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1186-1196.]
- [44] 赵晨蕾, 王朝文, 姬凯鹏, 等. 柴达木盆地早始新世大暖期古土壤中赤铁矿和针铁矿的定量分析及其气候意义[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(1): 54-66. [Zhao Chenlei, Wang Chaowen, Ji Kaipeng, et al. The quantification of the hematite and goethite and its climate significance in the paleosols during Early Eocene Climatic Optimum, Qaidam Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(1): 54-66.]

- [45] 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): 110-110. [Peng Shuzhen, Guo Zhengtang. Characteristic of luminosity of the Late Tertiary red earth in Xifeng area[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(1): 110-110.]
- [46] 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.]
- [47] 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.
- [48] 陈宇轩, 丁国栋, 高广磊, 等. 呼伦贝尔沙地风沙土有机质和碳酸钙含量特征[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (4): 104-111. [Chen Yuxuan, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Content characteristics of organic matter and calcium carbonate of Aeolian soils in Hulun Buir Sandy Land[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 104-111.]
- [49] Tang J, Tang X X, Qin Y M, et al. Karst rocky desertification progress: Soil calcium as a possible driving force[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1250-1259.
- [50] 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 (增刊1): 175-181. [Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Transformation functions of soil color and climate[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(Suppl.1): 175-181.]
- [51] 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, (2): 221-229. [Ji Junfeng, Chen Jun, 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.]
- [52] Chen T H, Xie Q Q, Xu H F, et al. Characteristics and Formation mechanism of pedogenic hematite in Quaternary Chinese loess and paleosols[J]. CATENA, 2010, 81(3): 217-225.
- [53] Pineau A, Kanari N, Gaballah I. Kinetics of reduction of iron oxides by H₂: Part II. Low temperature reduction of magnetite[J]. Thermochimica Acta, 2007, 456(2): 75-88.
- [54] Trolard F, Tardy Y. The stabilities of gibbsite, boehmite, aluminous goethites and aluminous hematites in bauxites, ferricretes and laterites as a function of water activity, temperature and particle size[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(4): 945-957.
- [55] Wu Y, Qiu S F, Fu S Q, et al. Pleistocene climate change inferred from multi-proxy analyses of a loess-paleosol sequence in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 154: 428-434.
- [56] 陈宇东, 李海侠, 张小凌, 等. 云南热带亚热带发育于弱磁性砂岩的土壤磁性特征及其环境意义[J]. 热带地理, 2023, 43 (11): 2229-2240. [Chen Yudong, Li Haixia, Zhang Xiaoling, et al. Soil magnetic characteristics of weakly magnetic sandstones in tropical and subtropical Yunnan and their environmental significance[J]. Tropical Geography, 2023, 43(11): 2229-2240.]
- [57] Sun H Y, Song Y G, Chen X L, et al. Holocene dust deposition in the Ili Basin and its implications for climate variations in Westerlies-dominated Central Asia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 550: 109731.
- [58] 杨云淇, 殷科, 王朝文, 等. 漫反射光谱赤铁矿和针铁矿定量研究进展[J]. 矿物学报, 2020, 40 (1): 92-100. [Yang Yunqi, Yin Ke, Wang Chaowen, et al. Advances of the research on quantification of hematite and goethite using diffuse reflectance spectroscopy[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(1): 92-100.]
- [59] 李平原, 刘秀铭, 郭雪莲, 等. 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, 2013, 33 (2): 360-367. [Li Pingyuan, Liu Xiuming, Guo Xuelian, et al. The magnetic susceptibility properties of top soil's in Gobi-Loess Plateau, Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(2): 360-367.]
- [60] 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山黄土的成因: 粒度、地球化学、磁化率、沉积和地貌特征的整合记录[J]. 地球

- 学报, 2020, 41 (3): 420-430. [Wu Peng, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. The genesis of Huangshan loess in Harbin: Integrated evidence from grain size, geochemistry, magnetization, sedimentation and landform[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(3): 420-430.]
- [61] 宋扬, 郝青振, 葛俊逸, 等. 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, 2012, 32 (4): 679-689. [Song Yang, Hao Qingzhen, Ge Junyi, et al. Quantitative relationships between modern soil magnetic susceptibility and climatic variables of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4): 679-689.]
- [62] 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27 (2): 210-220. [Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng, et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 210-220.]
- [63] 刘秀铭, 刘东生, 夏敦胜, 等. 中国与西伯利亚黄土磁化率古气候记录-氧化和还原条件下的两种成土模式分析[J]. 中国科学 (D辑): 地球科学, 2007, 37 (10): 1382-1391. [Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Hesse P, et al. Two pedogenic models for paleoclimatic records of magnetic susceptibility from Chinese and Siberian loess[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2007, 37(10): 1382-1391.]
- [64] Balsam W L, Ellwood B B, Ji J F, et al. Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: Worldwide data from tropical and temperate climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(19/20): 2732-2744.
- [65] 敖艳红, 裴浩, 王永利, 等. 浑善达克沙地遥感监测研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30 (1): 33-39. [Ao Yanhong, Pei Hao, Wang Yongli, et al. Monitoring on land cover dynamics of Hunshandake Sandland by remote sensing[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(1): 33-39.]
- [66] 陈慧, 杨胜利, 成婷, 等. 青藏高原东部表土磁化率特征与环境意义[J]. 冰川冻土, 2018, 40 (6): 1187-1194. [Chen Hui, Yang Shengli, Cheng Ting, et al. The magnetic susceptibility of top soil in the eastern Tibetan Plateau: Features and environmental implications[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1187-1194.]
- [67] 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.]
- [68] 俞鑫晨, 李鸿威, 杨小平, 等. 浑善达克沙地沉积物粒度特征及其指示意义[J]. 地理学报, 2023, 78 (7): 1809-1824. [Yu Xincheng, Li Hongwei, Yang Xiaoping, et al. Grain size characteristics of sediments in the Hunshandake Sandy Land and its implications[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1809-1824.]
- [69] Lü T Y, Sun J M. Luminescence sensitivities of quartz grains from eolian deposits in northern China and their implications for provenance[J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(2): 181-189.
- [70] Yang X P, Zhang F, Fu X D, et al. Oxygen isotopic compositions of quartz in the sand seas and sandy lands of northern China and their implications for understanding the provenances of aeolian sands[J]. *Geomorphology*, 2008, 102(2): 278-285.
- [71] 谢静, 吴福元, 丁仲礼. 浑善达克沙地的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成及其源区意义[J]. 岩石学报, 2007, 23 (2): 523-528. [Xie Jing, Wu Fuyuan, Ding Zhongli. Detrital zircon composition of U-Pb ages and Hf isotope of the Hunshandake Sandland and implications for its provenance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 523-528.]

The Meridional Variation Characteristics of Iron-bearing Minerals in Surface Sediments of Otindag Sandy Land and its Environmental Significance

GUO FengZhan¹, CHI YunPing^{1,2}, XIE YuanYun^{1,2}, KANG ChunGuo³, LIU RuoNan¹,

SUN Lei¹, WU Peng¹, WEI ZhenYu¹, LIU HaiJin¹

1. School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2. Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions of Harbin Normal University Key Laboratory of Heilongjiang Province, Harbin 150025, China

3. Department of Geography, Harbin University, Harbin 150086, China

Abstract: [Objective] The study of the relationship between climate proxies and climate factors in sandy surface sediments is highly significant when determining the reliability and applicability of climate proxies. [Methods] In this study, 32 samples of surface sediments were collected over a large spatial scale in Otindag Sandy Land. By analyzing correlations between chroma, Hm/Gt, magnetic susceptibility and modern climate factors (average annual precipitation and average annual temperature), the relationships between each index and climate factors and their environmental significance are discussed. [Results] The results show that the variation range of a^* and b^* is small, and that the overall trend from east to west is increasing: the minimum value of a^* is 3.87, the maximum value is 8.26, and the average value is 6.09. The minimum value of b^* is 9.49, the maximum is 17.44, and the average is 14.24. a^* and b^* were negatively correlated with precipitation (correlation coefficients -0.88 and -0.77, $P < 0.01$), and positively correlated with temperature (correlation coefficients 0.89 and 0.82, $P < 0.01$), indicating that both a^* and b^* could be used as effective proxy indicators of climate change, with a^* being the more sensitive to climate factors. The variation range of L^* was small, and no obvious change rule from east to west was evident. The maximum value was 59.54, minimum value 48.8, and the average value was 54.69. The relationship between L^* and climate factors is not obvious, and its change is mainly directly affected by vegetation; it does not appear to have any obvious indicative significance for climate. The peak value of the first derivative of hematite ranges from 0.08 to 0.19, with an average of 0.14. The peak value of the first derivative of goethite ranges from 0.06 to 0.09, with an average of 0.07. The value of hematite/goethite (Hm/Gt) ranged from 1.2 to 2.73 (average 1.88), and showed an increasing trend from east to west. The correlation between hematite and climate factors is higher than it is for goethite. The ratio of Hm/Gt is negatively correlated with average annual precipitation (correlation coefficient -0.85, $P < 0.01$), and positively correlated with average annual temperature (correlation coefficient 0.84, $P < 0.01$), which reveals the sensitivity of both hematite and Hm/Gt to precipitation and temperature. It effectively reflects changes of hydrothermal conditions in sandy land. In low-frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}) and high-frequency magnetic susceptibility (χ_{hf}), the variation direction of hf amplitude shows a constantly increasing trend from east to west. The percentage frequency magnetic susceptibility does not change significantly from east to west. The magnetic susceptibility of the region does not correlate well with climate factors. The source of the sand material may be the main factor in its variation, emphasizing the complexity and specificity of sand magnetic susceptibility changes. [Conclusions] a^* , b^* , and b^*/a^* are all effective alternative indicators for studying regional climate, whereas L^* is influenced by vegetation, resulting in ambiguous climate information. Hematite and Hm/Gt values correlate well with climate parameters and are ideal indicators of moisture and heat changes in sandy land. The surface magnetic susceptibility of sandy land is less affected by climate, reflecting the complexity and specificity of magnetic susceptibility changes in sandy land.

Key Words: Otindag Sandy Land; color; Hm/Gt; magnetic susceptibility; surface deposition

