

DOI: 10.11766/trxb202206180326

陈雅敏, 宋效东, 刘峰, 叶明亮, 张楚, 张甘霖. 青藏高原表土磁化率空间分布特征及影响因素. 土壤学报, 2024, 61(2): 361–371.
CHEN Yamin, SONG Xiaodong, LIU Feng, YE Mingliang, ZHANG Chu, ZHANG Ganlin. Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Magnetic Susceptibility of Topsoil on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 361–371.

青藏高原表土磁化率空间分布特征及影响因素*

陈雅敏^{1, 2}, 宋效东¹, 刘峰¹, 叶明亮^{1, 2}, 张楚^{1, 2}, 张甘霖^{1, 1, 3†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理科学重点实验室, 南京 210008)

摘要: 土壤磁化率是古环境重建的常用代用指标, 对表土磁化率与现代环境的关系研究有助于理解磁化率产生差异的原因。当前, 区域尺度上土壤磁化率变化成因认识尚不清楚, 限制了磁化率作为古环境重建重要代用指标的精准应用。本研究系统调查了青藏高原的 254 个样点表层(发生层 A 层)土样, 测定土壤磁化率和其他土壤属性, 结合母质、气候、地形和植被等数据, 阐明青藏高原地区土壤磁化率空间变化特征及其主要影响因素。结果表明: (1) 不同母质类型之间, 表层土壤磁化率(χ_{lr})无显著差异, 百分频率磁化率($\chi_{rd}\%$)差异显著, 表现为黄土和砂页岩风化物>冰碛物和结晶盐风化物, 其他母质类型之间无显著差异; 不同土地利用之间, 表层土壤 χ_{lr} 无显著差异, $\chi_{rd}\%$ 差异显著: 森林和旱地>草地>荒地。(2) 各因子对土壤磁化率影响表现为植被>理化性质>地形>母质。(3) 空间分布上, χ_{lr} 与 $\chi_{rd}\%$ 均呈现由东南向西北降低的趋势。此外, χ_{lr} 和 $\chi_{rd}\%$ 的空间分布规律与青藏高原植被分区相吻合。因此, 磁化率能更好地指示植被空间分布。

关键词: 青藏高原; 表土; 磁化率; 气候

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Magnetic Susceptibility of Topsoil on the Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Yamin^{1, 2}, SONG Xiaodong¹, LIU Feng¹, YE Mingliang^{1, 2}, ZHANG Chu^{1, 2}, ZHANG Ganlin^{1, 2, 3†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】 Soil magnetic susceptibility is a commonly used proxy index for paleoenvironment reconstruction. The study on the relationship between topsoil magnetic susceptibility and the modern environment is helpful to understand the reasons for the difference in magnetic susceptibility. Researchers around the world had conducted numerous studies on the correlation

* 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0306-02)、国家自然科学基金项目(42130715)、中国科学院青年创新促进会项目(2021310)共同资助 Supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No. 2019QZKK0306-02), the National Natural Science Foundation of China (No. 42130715), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2021310)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 陈雅敏(1991—), 女, 福建泉州人, 博士研究生, 主要从事土壤资源演变与评价研究。E-mail: ymchen@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-06-18; 收到修改稿日期: 2023-02-28; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-09-07

between soil magnetic susceptibility of sediments and modern soils in different regions and environmental factors. However, previous studies mainly focused on the correlation between soil magnetic susceptibility and climate. This correlation between soil magnetic susceptibility and climate was inconsistently recognized by different researchers because climate is only one of the influencing factors for the variation of soil magnetization rate. The main controlling factors of soil development and soil magnetic susceptibility may vary from region to region, and the magnetic susceptibility reflects the combined effect of multiple environmental factors. At present, the lack of understanding of the causes of soil magnetic susceptibility changes at the regional scale limits the accurate application of magnetic susceptibility as an important proxy index for paleoenvironmental reconstruction. Thus, we hypothesized that(1)the spatial distribution patterns of soil magnetic susceptibility in different regions can respond to environmental variables besides climate and(2)the Normalized Difference Vegetation Index(NDVI), which is the result of the combined effect of climate, topography and soil, can better respond to magnetization rates. 【Method】The Qinghai-Tibet Plateau is the youngest natural geographic unit in the world with closely integrated horizontal and vertical zonation, influencing regional and global energy and water cycles. It is one of the areas where global changes have had the most significant impact on the land surface because it had undergone six major geological tectonic events and has a variety of parent rock types. The natural environment of the Qinghai-Tibet Plateau is harsh and large-scale soil sampling is very difficult, so regional magnetic studies are limited. In this study, 254 soil samples from the surface layer(layer a of the occurrence layer)of the Qinghai-Tibet Plateau were systematically investigated to determine the soil magnetic susceptibility and other soil properties. Combined with the data of parent material, climate, topography and vegetation, the spatial variation characteristics of soil magnetic susceptibility in the Qinghai-Tibet plateau were clarified and its main influencing factors were analyzed. 【Result】The results showed that: (a)There was no significant difference in low-frequency magnetic susceptibility χ_{lf} of topsoil between different parent materials and the difference of percentage frequency magnetic susceptibility $\chi_{fd}\%$ was significant. Specifically, the weathering of loess and sand shale > weathering of aeolian sand, moraine and crystalline salt, and there was no significant difference between other parent material types. Among different land uses, there was no significant difference in topsoil, but a significant difference in topsoil $\chi_{fd}\%$: forest and upland > grassland > wasteland.(b)The influence of each principal component on soil magnetic susceptibility was of the order vegetation component > soil physical property component > terrain component > parent material component.(c)Spatially, the variation law of soil magnetic susceptibility was most consistent with that of vegetation normalization index, χ_{lf} and $\chi_{fd}\%$ in the Southeast both showed higher values. Also, the spatial distribution of χ_{lf} decreased from Southeast to Northwest, the high-value area was located on the southeast edge while the low-value area was located in the middle. Similarly, the spatial distribution of $\chi_{fd}\%$ showed a high value in the southeast area and a low value in the western area. 【Conclusion】Our study shows that magnetic susceptibility can better reflect the spatial distribution characteristics of the vegetation index.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Topsoils; Magnetic susceptibility; Climate

土壤磁化率是环境作用和成土过程的产物。磁化率的大小与有机质、土壤含水量、氧化铁含量及形态等土壤属性有关,广泛应用于环境变化历史的重建^[1]。在大空间尺度上,土壤磁化率是母质、地形、气候和植被等要素对土壤属性影响的结果,其因环境因子的空间变化而呈一定规律地变化^[2]。

目前,国内外学者对不同地区沉积物和现代土壤的磁化率与环境因素之间的相关性进行了大量报道,相关研究重点围绕土壤磁化率及相关磁学指标与气候之间相关性^[3-4]。中国表层土壤磁化率的研究表明,磁化率与年均降水量和年均气温呈显著相关

性,因此可用于古气候重建工作。中国黄土高原的研究普遍认为,土壤磁化率随着降水和气温的增加而增加,因为降水和气温的增加促进土壤铁氧化物形成^[5]。但是,这与美国阿拉斯加黄土的研究结果相反^[6]。中国红壤区也发现,土壤磁化率随降水增加而减少的现象^[7]。

不同学者对磁化率与气候之间的相关性认识不一致,因为气候仅是土壤磁化率变化的影响因素之一。在海南岛的研究发现,玄武岩发育的土壤磁化率高于其他母岩发育的土壤 1~2 个数量级^[8]。在英格兰的研究发现,地形和排水是影响土壤磁化率的

主要因素，滞水条件下 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} 导致土壤磁性减弱。还有研究发现，植被通过向土壤输送有机质影响土壤磁化率，富含有机质的土壤铁磁性矿物溶解，高矫顽力矿物相对富集^[9]。因此，不同区域的土壤发育和磁化率的主控因素可能存在差异，磁化率是多种环境要素综合作用的结果。

青藏高原是世界上最年轻且水平地带性和垂直地带性紧密结合的自然地理单元，影响区域与全球的能量和水分循环；因经历 6 次大地质构造活动，母岩类型多样，是全球变化对地表影响最显著的地区之一。本文系统调查了青藏高原范围内 254 个表层（发生层 A 层）土壤样品，旨在理解该区土壤磁化率空间变化格局，以及多种环境因素对表层土壤磁化率的可能影响机制，以期土壤磁化率能作为其他环境变量的代用指标。假设：（1）土壤磁化率的空间变异与气候、土壤等环境因素呈显著相关性；（2）植被指数是气候、地形和土壤等要素共同作用的结果，能更好地反映磁化率。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

青藏高原分布范围大致为 $24.8\text{—}39.2^\circ\text{N}$ ， $74.9\text{—}104.3^\circ\text{E}$ ，海拔 $864\sim 5\,712\text{ m}$ ，属于高寒山地气候，是全球气候变化最敏感的地区之一。采样点的年平均温度分布在 $-4\sim 12^\circ\text{C}$ 、年平均降水量分布在 $40\sim 790\text{ mm}$ ，南部边缘为古热带植物区，东南部为中国-喜马拉雅森林植物亚区，柴达木盆地为亚洲荒漠植物亚区，腹地为青藏高原植物亚区^[10]，坡度为 $0\sim 25^\circ$ ，主要土壤类型为新成土和锥形土^[11]。

根据典型土壤类型面积百分比估测主要土壤类型样点数，尽量选择不易积水、不易受侵蚀和堆积的地形且远离人为干扰的样点，采集发生层 A 层的土壤。共采集 254 个表土样品，这些样本能够代表研究区主要的土壤类型。研究区中北部因道路不可达，故没有布设样点。

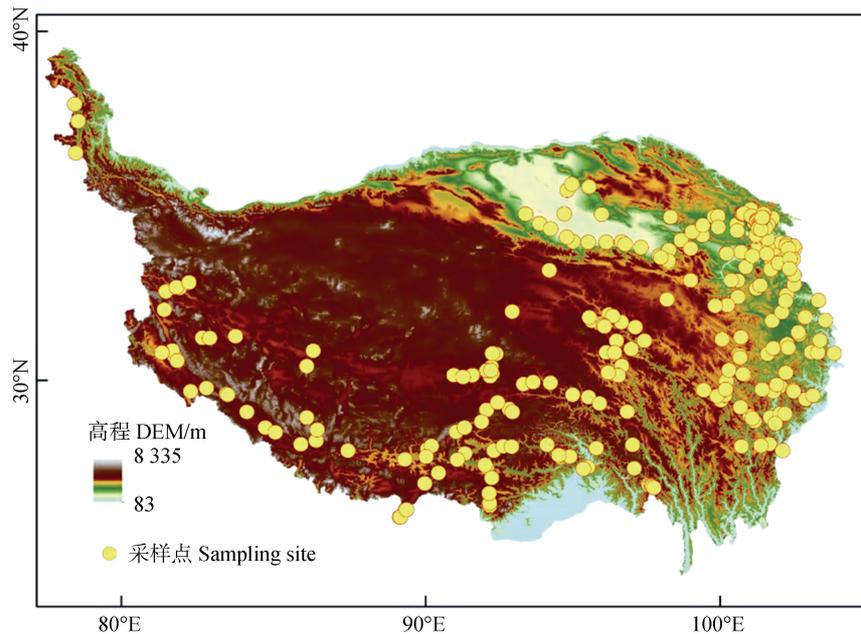


图 1 研究区表层采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in the surface soil layer of the research area

1.2 磁化率和其他土壤属性测定

采集的土样在室内经自然风干、去杂和研磨过不同孔径筛后，用于土壤理化属性的测定。其中，颗粒组成采用吸管法测定；pH 采用电位法测定；有机碳采用重铬酸钾外加热法测定；全磷采用钼锑抗比色法测定；阳离子交换量（CEC）采用乙酸铵

（ $\text{pH}7.0$ ）-EDTA 交换法测定^[12]。本文使用 P-XRF（Amptek, Bedford, MA, USA）测定了土壤样品中 K、Ca、Fe、Si 和 Ti 等主要元素浓度，测量时间为 2 min。土壤游离氧化铁和 pH 分别采用傅立叶变换红外光谱仪（Nicolet iS50, Thermo Scientific, USA）和 pH 计（METTLER TOLEDO, USA）测定。

在空气干燥的条件下,将土壤样品放置在 2 cm 的正方体塑料盒中,进行磁性测定。使用卡帕桥多频磁化率仪 (AGICO MFK1 FA) 在 976 Hz (低频磁化率, χ_{lf}) 和 15 616 Hz (高频磁化率 χ_{hf}) 的双重频率下测量特定质量 (6 g) 的磁感应强度 (magnetic susceptibility, χ)。卡帕桥系列是测量磁化率的主要仪器,测量精度要较 Bartington 磁化率仪高,预计会成为下一代磁化率仪器的主流^[13]。 χ_{lf} 为低频磁化率, χ_{hf} 为高频磁化率, χ_{fd} 为频率磁化率, $\chi_{fd}\%$ 为百分频率磁化率。 $\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf}$, $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100$ 。本研究随机选取 7 个样品,分别用 AGICO MFK1 FA (低频磁化率 χ_{lf-K} , 高频磁化率 χ_{hf-K}) 和 Bartington (低频磁化率 χ_{lf-B} , 高频磁化率 χ_{hf-B}) 磁化率仪器测定磁化率,发现二者测得磁化率数值之间的关系为: $\chi_{lf-B} = 1.2\chi_{lf-K} + 0.02$, $R^2 = 0.999$;

$\chi_{fd}\%-B = 10^{-3}\chi_{fd}\%-K + 10^{-4}$, $R^2 = 0.998$ 。所有的磁化率测量均在中国科学院南京地理与湖泊研究所磁化率分析实验室进行。

1.3 地质和气候数据

根据相关研究结论,本研究收集了 11 种驱动土壤演化的环境变量 (表 1)。气候变量为 1970—2020 年的均值,从 WorldClim2 数据库中获得^[14],分辨率为 1 km。地形变量来自 90 m SRTM DEM (Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI), 2018), 在 SAGA GIS^[15-16] 中计算得出。表层地质 (土壤母质) 用 30 m 水平分辨率的 Landsat8 ETM + Band7 (2.08~2.35 μ m 的短波红外) 和黏土矿物指数 (Band5/Band7) 表示^[17]。植被使用 2000—2017 年每月最大归一化植被指数 (NDVI) 的平均值、最大值和最小值来表示。

表 1 青藏高原气候、母质、地形和植被等环境协变量的分辨率和来源

Table 1 Scale/resolution and source for environmental covariates of climate, parent material, terrain and vegetation

类别 Category	协变量 Covariate	描述 Description	分辨率 Scale/resolution	来源 Source
气候 Climate	MAT	年均气温	1 km	RESDC ^①
	MAP	年均降水量	1 km	RESDC
	Max MAP	最高年均降水量	1 km	RESDC
	Min MAP	最低年均降水量	1 km	RESDC
	Max MAT	最高年均气温	1 km	RESDC
	Min MAT	最低年均气温	1 km	RESDC
	Aridity	干旱系数	1 km	RESDC
母质 Parent material	Rock type	岩石类型	1 : 2.5 M	RESDC
地形 Terrain	DEM	海拔	90 m	Jarvis et al. ^[18]
	Slope	坡度	90 m	Conrad et al. ^[15]
	Slopelength	坡长	90 m	Conrad et al. ^[15]
	Curvature	曲率	90 m	Conrad et al. ^[15]
植被 Vegetation	NDVImean	归一化植被指数平均值	30 m	USGS ^②
	NDVImax	归一化植被指数最大值	30 m	USGS
	NDVimin	归一化植被指数最小值	30 m	USGS

①RESDC: 中国科学院资源环境科学与数据中心 (Data Center for Resources and Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences);

②USGS: 美国地质调查局, <https://www.usgs.gov/>

1.4 统计分析

采用 Pearson 方法分析了 254 个样品的磁化率与环境变量以及土壤属性的相关性。使用对数正态变换将 χ_{lf} 数据转换为卡方分布 $P < 0.05$ 的正态分布数据 $\log_{10}\chi_{lf}$ 。用已测量的土壤磁化率与环境变量构建随机

森林 (RF) 模型, 预测 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的空间分布图。RF 的预测性能通过平均误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 的 10 折交叉验证来评估。使用 R 软件 (版本 3.5.1, <http://cran.r-project.org/>) 的 “randomForest” 包实现土壤磁化率制图。采用主

成分分析和逐步回归的方法分析土壤磁化率的主控因子。采用 Excel 2017 进行数据整理, R 3.6.3 进行基本特征分析和绘图。

2 结 果

2.1 表层土壤磁化率统计特征

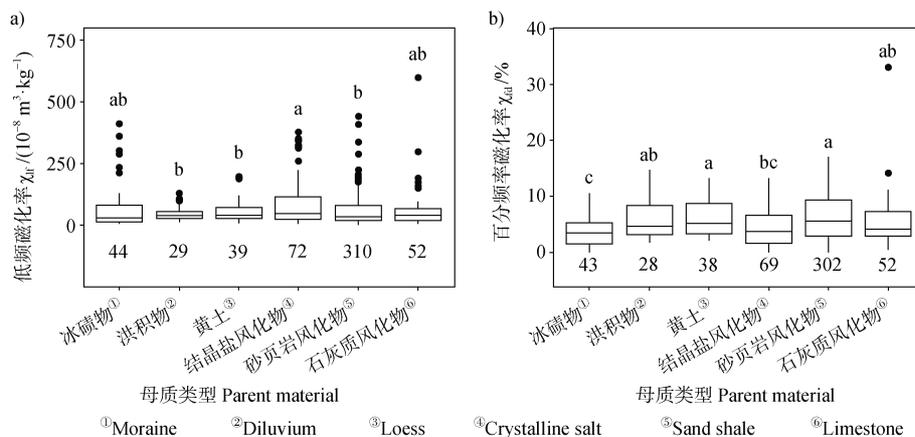
青藏高原表层土壤磁化率变幅较大, χ_{lf} 变化范围

为 $3.0 \times 10^{-8} \sim 5.979 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $6.23 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; $\chi_{fd}\%$ 变化范围为 $0 \sim 17.3\%$, 均值为 5.2% (表 2)。 χ_{lf} 的极大值位于拉萨市。除了结晶盐风化物以外, 不同母质类型之间, 表层土壤 χ_{lf} 无显著差异; $\chi_{fd}\%$ 差异显著: 黄土和砂页岩风化物 > 风沙、冰碛物和结晶盐风化物, 其他母质类型之间无显著差异 (图 2)。不同土地利用类型之间, 表层土壤 χ_{lf} 无显著差异, $\chi_{fd}\%$ 差异显著: 森林和旱地 > 草地 > 荒地 (图 3)。

表 2 本文数据集的统计信息

Table 2 Summary statistics for the datasets discussed in the main text

变量 Parameters	均值 Mean	误差 S.D.	中位数 Median	最小值 Min.	最大值 Max.	偏离度 Skew	峰度 Kurtosis
磁化率 χ_{lf} / ($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	62.3	64.7	42.0	3.0	597.9	3.9	23.8
百分频率磁化率 $\chi_{fd}\%$	5.2	4.2	4.4	0.0	17.2	0.1	-0.5
归一化植被指数平均值 NDVI _{mean}	0.5	0.2	0.6	0.0	0.8	-0.6	-0.9
年均降水 MAP / (mm)	445.4	199.4	463.0	28.7	910.8	-0.4	-0.6
年均气温 MAT / ($^{\circ}\text{C}$)	3.6	4.3	3.0	-5.2	23.7	0.8	1.4
酸碱度 pH	7.8	1.2	8.1	3.4	10.0	-1.1	0.8
有机碳 SOC / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	28.9	25.5	20.8	0.8	113.3	1.1	0.5
黏粒 Clay / %	5.7	8.4	1.3	0.2	48.3	0.2	0.3
粉粒 Silt / %	16.5	21.6	4.9	0.3	68.6	0.1	-0.0
砂粒 Sand / %	12.9	15.3	6.3	0.9	90.2	0.2	0.5
铁 Fe / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	57.0	12.0	57.6	28.7	86.1	-0.1	0.1
游离氧化铁 Free iron oxide / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	22.8	8.1	22.5	8.7	48.9	0.8	0.9



注: 方框和竖线代表每个箱子中的最小值、第 25 百分位、中值、第 75 百分位和最大值。框中的黑色实线表示平均值。黑色实点为异常值, 表示为位于箱线图边缘之外的数据点。竖线下面的数字为样本大小。竖线上方不同小写字母表示不同母质在 $P < 0.05$ 水平上存在显著差异。下同。Note: Boxes and whiskers represent the minimum, 25th percentile, median, 75th percentile, and maximum values in each bin. The black solid lines in the boxes represent the mean values. Black solid points are outliers that are defined as data points located outside the whiskers of the boxplots. The numbers below the whiskers are sample sizes. Different lowercase letters above the whiskers denote significant difference in different parent materials at the $P < 0.05$ level. The same as below.

图 2 对比不同母质之间 (a) χ_{lf} 和 (b) $\chi_{fd}\%$ 的差异

Fig. 2 Comparison of (a) χ_{lf} and (b) $\chi_{fd}\%$ in different parent materials

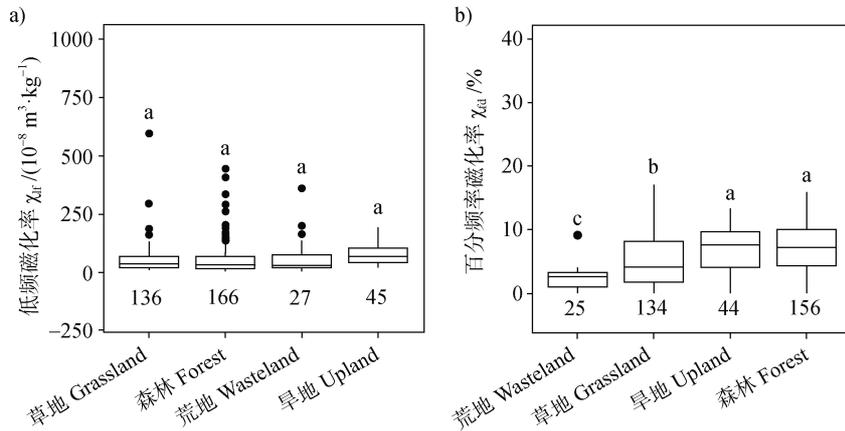


图 3 不同土地利用类型之间 χ_{lf} (a) 和 $\chi_{fd}\%$ (b) 的差异
Fig. 3 Comparison of χ_{lf} (a) and $\chi_{fd}\%$ (b) in different land uses

2.2 土壤磁化率空间分布格局

基于随机森林 (RF), χ_{lf} 的预测精度 RMSE 和 R^2 分别为 51.7 和 0.13。 $\chi_{fd}\%$ 的预测精度 RMSE 和 R^2 分别为 3.4 和 0.30。 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的半变异函数模型最好通过高斯模型拟合 (图 4), 其中参数通过限制最大似然估计。 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的块金值与基台值比率大于 50% (图 4), 表明 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的空间依赖性结构

较弱, 56%~62%的 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 变异性由随机因素组成。RF 在 χ_{lf} ($R^2 = 0.13$) 和 $\chi_{fd}\%$ ($R^2 = 0.30$) 预测方面略优于地理统计空间插值方法 (χ_{lf} 的 $R^2 = 0.09$ 和 $\chi_{fd}\%$ 的 $R^2 = 0.30$), 这主要归因于弱空间依赖结构。因此, 本文用已测量的土壤磁化率 (χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$) 与环境变量之间的关系, 构建 RF 模型, 用于绘制 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的空间分布图 (图 4)。

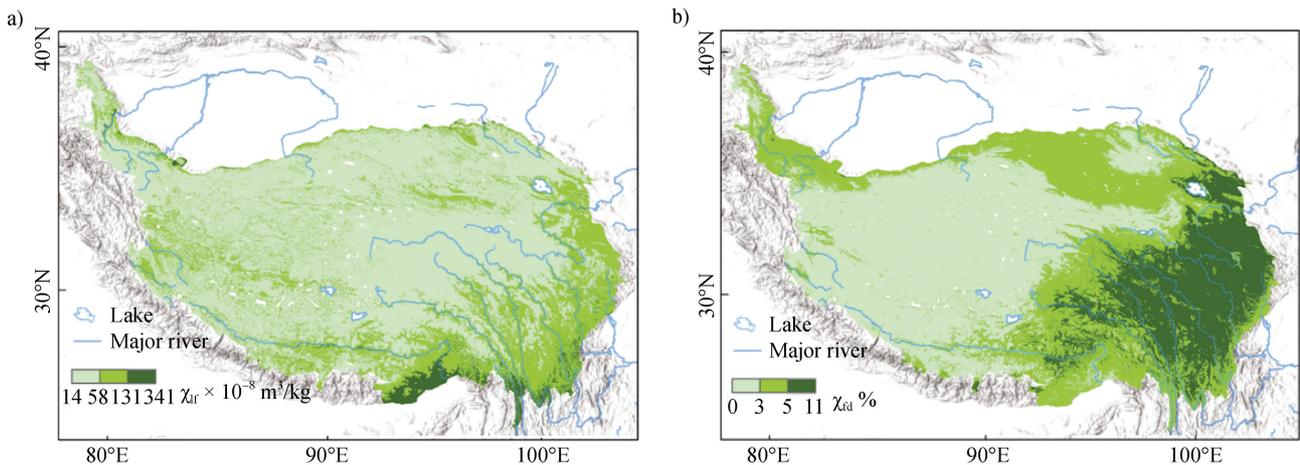


图 4 基于随机森林模型模拟的表层土壤 (发生层 A 层) χ_{lf} (a) 和 $\chi_{fd}\%$ (b) 空间分布图
Fig. 4 Maps of χ_{lf} (a) and $\chi_{fd}\%$ (b) predicted by the random forest analyses in topsoils (occurrence layer A)

宏观上, 东南部的 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 均显示较高的值 (图 4)。 χ_{lf} 空间分布呈由东南向西北降低的趋势, 高值区位于东南部边缘, 低值区位于腹地。 $\chi_{fd}\%$ 空间分布规律与 χ_{lf} 相似, 高值区位于东部偏南, 低值区位于西部。小尺度地形上, χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的空间分布显示许多细节, 主要是由于环境变量的变化对 RF 模型预测的影响, 比如在河谷地带 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的值较周边海拔较高的地点高。

2.3 土壤磁化率空间分布的影响因素

2.3.1 青藏高原环境因素的空间分布与磁化率的关系 青藏高原 MAP、MAT、DEM 和 NDVI 具有明显的空间分布规律 (图 5)。MAP 呈弧形带状分布, 由东向西递减; MAT 大尺度地形区呈由南往北递减, 小尺度地形区呈与 DEM 相匹配的分布规律——随海拔升高而递减。NDVI 大尺度地形区上呈由东南向西北递减趋势, 小尺度地形区呈与 DEM 相匹

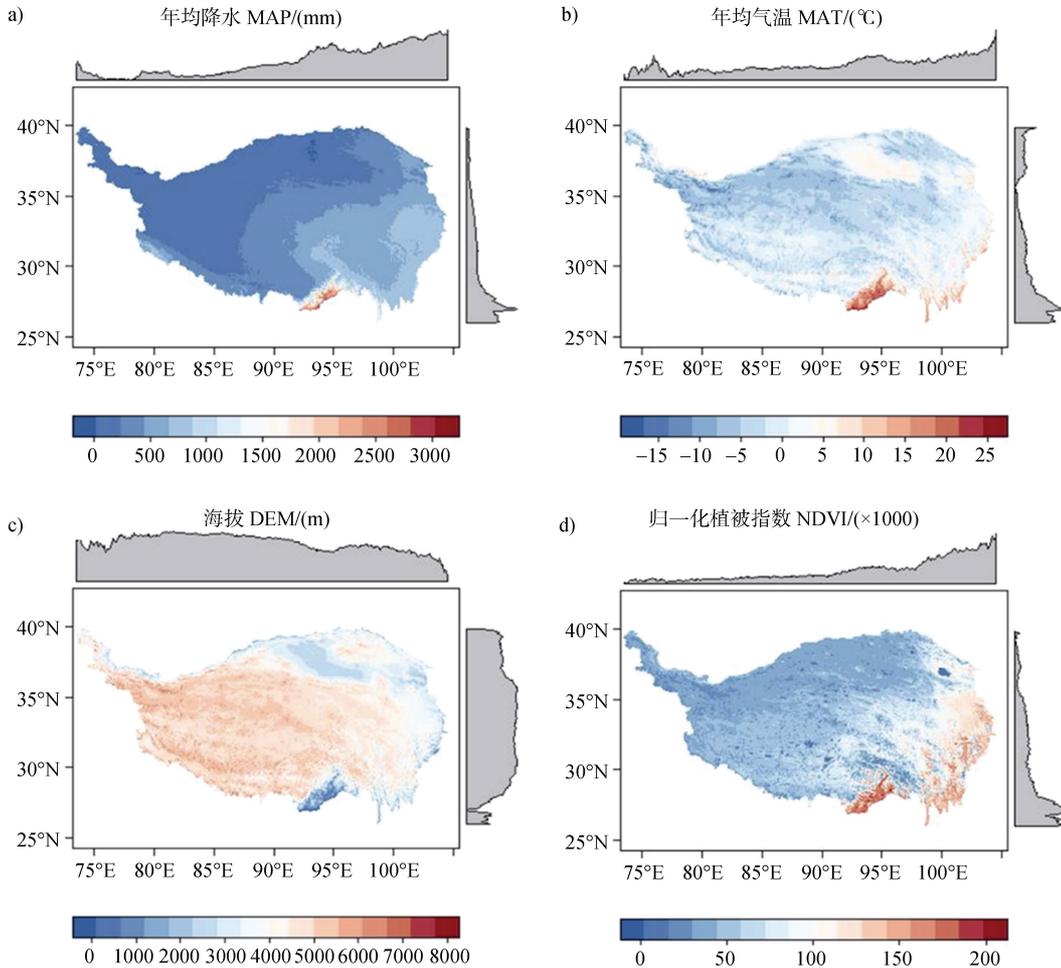


图 5 青藏高原各环境因子空间分布

Fig. 5 Distribution of environmental factors in the Qinghai-Tibet Plateau

配的分布规律，南部边缘为最高，东南部其次，腹地最低，与 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 的空间分布规律吻合。

3.3.2 土壤磁化率的影响因素 通过对土壤磁化率与对应环境因子和土壤属性进行 Pearson 相关分析（图 6）发现， χ_{lf} 对数转化后的 $\text{Log}_{10}\chi_{lf}$ 与土壤母质代表性物质（Fe 和 Ti）的相关性最高，与 SOC 和 TN 呈显著负相关；与小尺度地形区上的坡度（Slope）和坡长（Slopelength）呈显著正相关；与气候（MAP 和 MAT）无显著相关。除了与土壤属性和地形显著相关外， $\chi_{fd}\%$ 还与气候（MAP 和 MAT）和植被指数（NDVI）显著相关，相关性土壤属性 > 植被指数 > 气候因子 > 地形因子。

3.3.3 土壤磁化率的主控因子 土壤磁化率与多种环境因子的相关系数矩阵（图 6）在反映土壤磁化率与各因子之间的关系的同时，也说明多种因子之间存在多重共线性关系。其中，多个环境因子和土壤属性之间相关系数的绝对值大于 0.5，且均为极

显著水平。为了筛选出土壤磁化率的主控因子和确定各因子对土壤磁化率的贡献，采用主成分分析和逐步回归的方法分析土壤磁化率的主控因子。

主成分分析结果显示，前 5 个主成分保留了大部分原影响因子的信息，其特征值 > 1，PC1、PC2 和 PC3 的贡献率均大于 10%，PC4 的贡献率 9%，PC5 的贡献率 6%（表 3）。第一主成分（PC1）主要受植被归一化指数的影响，命名其为植被主成分；第二主成分主要受土壤颗粒（Clay、Silt 和 Sand）的影响，命名其为土壤物理属性主成分；第三主成分主要受 DEM 的影响，命名其为大尺度地形区主成分；第四主成分主要受坡度和坡长的影响，命名其为小尺度地形区主成分；第五主成分主要受土壤铁（Fe）和钛（Ti）的影响，二者在土壤弱风化地区一定程度上反应母质磁性强弱，命名其为母质主成分。前 5 个主成分的累积贡献率 76%。通过表 3 主成分分析结果，各主成分对土壤磁化率影响：植

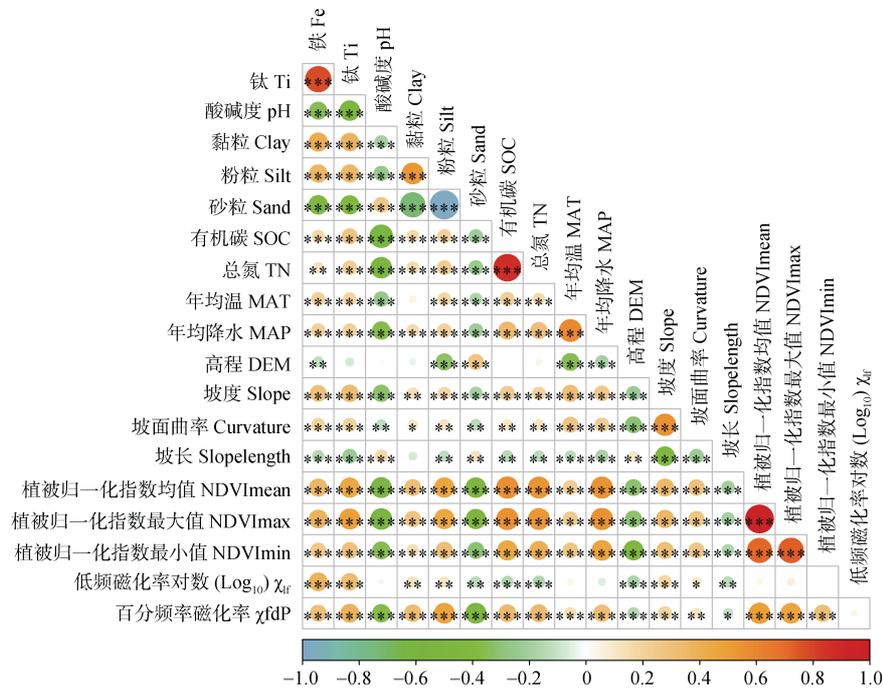


图 6 土壤磁化率与环境影响因素之间的相关性

Fig. 6 Correlation between soil magnetic susceptibility and environmental factors

表 3 土壤磁化率环境影响因素主成分 (PC) 分析

Table 3 Principal component (PC) analysis of environmental factors affecting χ_{fd} and $\chi_{fd}\%$

影响因子 Influence factor	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4	主成分 5 PC5
铁 Fe	0.24	0.30	0.05	0.24	0.48
钛 Ti	0.27	0.21	-0.09	0.23	0.49
酸碱度 pH	-0.26	0.18	0.26	-0.18	-0.04
黏粒 Clay	0.18	0.42	-0.21	-0.16	-0.22
粉粒 Silt	0.25	0.40	-0.04	-0.23	-0.18
砂粒 Sand	-0.25	-0.44	0.08	0.23	0.21
有机碳 SOC	0.26	-0.31	-0.32	0.02	-0.08
全氮 TN	0.27	-0.27	-0.33	0.03	-0.14
年均气温 MAT	0.20	-0.07	0.30	-0.28	0.12
年均降水 MAP	0.21	-0.17	0.23	-0.38	-0.10
海拔 DEM	-0.08	0.05	-0.52	0.17	-0.12
坡度曲率 Curvature	0.15	0.02	0.35	0.23	-0.19
坡度 Slope	0.19	0.07	0.25	0.48	-0.12
坡长 Slope length	-0.12	-0.03	-0.19	-0.42	0.53
归一化植被指数均值 NDVI _{mean}	0.34	-0.16	-0.01	-0.08	0.01
归一化植被指数最大值 NDVI _{max}	0.35	-0.17	0.01	-0.05	0.06
归一化植被指数最小值 NDVI _{min}	0.30	-0.21	0.16	-0.08	0.05
统计参数 Statistical parameter					
特征值 Eigenvalues	2.49	1.50	1.35	1.23	1.04
贡献率 Contribution rate/%	36	13	11	9	6
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	36	50	61	70	76

被主成分>土壤物理属性主成分>大尺度地形区主成分>小尺度地形区主成分>母质主成分。

在主成分分析的基础上,通过逐步回归分析(引入变量 P 值为 0.05,剔除变量的 P 值为 0.1)筛选出更准的土壤磁化率主要调控因子。结果表明,对土壤 χ_{lf} 贡献最大的因子为 Fe、SOC、MAP、DEM 和 Slope;对土壤 $\chi_{fd}\%$ 贡献最大的因子为 Fe、Ti、Silt、Sand、TN、MAP、NDVImean 和 NDVImax。

3 讨 论

3.1 环境因子对土壤磁化率的影响

在区域尺度下,土壤磁化率主要受母质、气候、地形、植被和土壤的影响^[19]。这与本研究中土壤磁化率受多种环境因子影响的结果一致。本研究结果表明,土壤磁化率与植被、土壤物理属性、地形和母质之间存在极显著相关性。

土壤磁性矿物的来源首先是母岩的原生矿物,其次是成土过程中产生的次生矿物,前者一般为砂粒或粗粉粒的粒度级;后者一般为稳定单畴(Stable single domain, SSD)粒度或更小,且有黏土的粒度级^[20]。浙江红壤 χ_{lf} 随粒径减小而减小,说明原生矿物残留对浙江红壤磁化率的贡献为主,次生磁矿物为辅^[20-21]。相反,云贵高原土壤磁化率 χ_{lf} 随粒径减小而增大,说明次生矿物对其磁化率变化起主要贡献^[20]。本研究中, χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 均随粒径减少而增大(图 6),说明次生矿物对其磁化率变化同样起主要贡献。

国内外学者已经开展大量表土磁化率与现代气候因子关系的研究^[22]。本研究中, $\chi_{fd}\%$ 与年均降水量和年均气温显著正相关,与黄土高原及周边地区的磁化率与气候的相关性一致,与长江以南地区的磁化率与气候的相关性相反^[23]。已有研究表明,年均降水量低于 1 000~1 500 mm 时,随年均降水量和年均气温的增加,土壤铁氧化物增加,从而促进土壤磁化率增加;而中国南方表层土壤磁化率随年均降水和年均气温的降低而增高,重要原因之一可能是高温多雨的气候使得土壤水饱和,土壤中的磁性矿物易被还原和分解,同时,湿热环境中的强磁性磁铁矿易于转化为弱磁性赤铁矿^[23-25]。 χ_{lf} 与气候的相关性不显著,可能青藏高原次生磁化率对青

藏高原的土壤磁性变化起主要贡献(图 6),或者采样点的实际气候受到海拔的影响,亦或者青藏高原的气象站点稀疏,导致气象资料误差。

在英格兰的研究发现,局部尺度上,地形、土地利用和植被影响土壤形成和铁磁性矿物的累积^[26-30]。本研究中,海拔调控热水在垂直方向上的再分配影响植被^[29],进而间接影响土壤磁化率;土壤磁化率随坡度增加而增加,坡度越大有利于排水,与已有研究一致。该研究表明,地形主要通过调控土壤排水和水热条件再分配,进而影响土壤磁化率^[27]。

自然土壤的表土层,一般具有较高的磁性,与生物成磁作用有关^[22]。本研究中, χ_{lf} 均值和 $\chi_{fd}\%$ 均值为森林>草地>荒地,与已有大多数研究结果一致,且与 NDVI 值变化趋势相吻合(图 7)。土壤有机碳为铁还原菌提供了能量,这些细菌将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,过量的 Fe^{2+} 与铁氢化物反应生成 SP 或 SD 磁铁矿^[27]。此外,本研究中旱地与森林无显著差异,说明本研究区人为活动使表土磁化率增强,与澳大利亚东南部的研究结果一致^[2]。人类活动强烈区域中大多数空气中的氧化铁均以聚集的磁铁矿纳米颗粒的形式存在^[28],这些磁性颗粒随着雨水或者重力作用沉降到表土,增强表土磁性。

3.2 区域尺度土壤磁化率的空间分布

吕厚远等^[23]研究认为,土壤磁化率存在区域尺度上的分布规律。本研究表明,青藏高原土壤 χ_{lf} 空间分布呈东南向西北降低的趋势,高值区位于东南部边缘,低值区位于中部。 $\chi_{fd}\%$ 空间分布规律的趋势与 χ_{lf} 相似,高值区位于东部偏南,低值区位于西部。这主要是由于区域尺度上的土壤磁化率受多种环境因子的影响,本研究中环境因子空间分布趋势(图 6)以及各要素之间的相关分析(图 7)均证明这一点。

值得注意的是,本研究 χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 空间分布规律与青藏高原植被类型分区吻合, χ_{lf} 和 $\chi_{fd}\%$ 值在南部边缘最高,东南部和柴达木盆地其次,腹地最低,分别对应南部边缘古热带植物区,东南部中国-喜马拉雅森林植物亚区,柴达木盆地亚洲荒漠植物亚区,腹地青藏高原植物亚区^[10]。植被对土壤次生磁性矿物的形成产生重要影响(图 3b),比如,森林 $\chi_{fd}\%$ 显著大于荒地,因为森林土壤的透水性和持水性较适中,而荒地处于干旱或半干旱状态,土壤湿度对

土壤矿物转化及生成有重要影响, 当土壤湿度适时, 成壤过程可生成更多磁铁矿与磁赤铁矿等亚铁磁性矿物^[22]。本研究主成分分析表明, 植被是影响土壤属性变异的主要因子, 研究区东南部边缘为NDVI的高值区, 同时是土壤磁化率的高值区, 反映土壤磁化率的分布格局与NDVI关系紧密, 说明磁化率能更好地反映植被空间分布。

4 结论

区域尺度上, 青藏高原土壤磁化率的空间分布规律为沿东南向西北方向递减的变化趋势, 主要受植被、土壤属性、地形和母质的影响。青藏高原表层土壤磁化率受气候影响较小, 受植被的影响更大。未来应在土壤磁化率是否能指示植被的研究上继续探索。

参考文献 (References)

- [1] Gu Y J, Li Y M, Han L, et al. Relationships between surface soil magnetic susceptibility and modern climatic factors in Eastern China and their environmental significance[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 36 (4): 498—509. [谷永建, 李玉梅, 韩龙, 等. 中国东部表土磁化率与现代气候因子的关系及其环境意义[J]. *中国科学院大学学报*, 2019, 36 (4): 498—509.]
- [2] Hu P X, Heslop D, Viscarra Rossel R A, et al. Continental-scale magnetic properties of surficial Australian soils[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103028.
- [3] Zhou Y X, Zhang Z D, Rao J W, et al. Predicting and mapping soil magnetic susceptibility in an agro-pastoral transitional zone: Influencing factors and implications[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: 105352.
- [4] Wei H T, Chen F H. Magnetic characteristics of surface samples from NE Iran, and its paleoenvironmental implications[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42 (1): 261—271. [魏海涛, 陈发虎. 伊朗黄土高原表土磁性特征与古气候指示意义[J]. *第四纪研究*, 2022, 42 (1): 261—271.]
- [5] Han J M, Lü H Y, Wu N Q, et al. The magnetic susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimate reconstruction[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1996, 40 (3): 262—275.
- [6] Liu X M, Xia D S, Liu D S, 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. [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.]
- [7] Zeng Y Y, Zhao B. Paleoclimate implication of magnetic susceptibility in the loess-paleosol will enlighten studying on the paleoclimate of the red soils in Southern China[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35 (5): 1717—1723. [曾永耀, 赵博. 黄土磁化率的古气候意义对研究红土磁化率古气候意义的启示[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35 (5): 1717—1723.]
- [8] Rao Z G, Zhu Z Y, Wu Y, et al. Characteristics and significance of topsoil magnetic susceptibility developed on different parent rocks in South China[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (4): 651—652. [饶志国, 朱照宇, 吴翼, 等. 华南地区发育于不同母岩之上的表土磁化率特征及其意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27 (4): 651—652.]
- [9] Roberts A P. Magnetic mineral diagenesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 151: 1—47.
- [10] Qinghai-Tibet Plateau comprehensive Scientific Investigation Team of Chinese Academy of Sciences. Tibetan vegetation[M]. Beijing: Science Press, 1988[中国科学院青藏高原综合科学考察队[M]. *西藏植被*. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [11] Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Scientific Investigation Team of Chinese Academy of Sciences. Tibetan soil[M]. Beijing: Science Press, 1985.[中国科学院青藏高原综合科学考察队. *西藏土壤*[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [12] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. *土壤调查实验室分析方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [13] Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (4): 1041—1048. [刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (4): 1041—1048.]
- [14] Fick S E, Hijmans R J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37 (12): 4302—4315.
- [15] Conrad O, Bechtel B, Bock M, et al. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8 (7): 1991—2007.
- [16] Olaya V, Conrad O. Chapter 12 geomorphometry in SAGA[M]//*Developments in Soil Science*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 293—308.
- [17] Drury S A. Image interpretation in geology[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1993.
- [18] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled SRTM for globe version 4. Available from CGIAR-CSI SRTM

- 90 m database [DB/OL]. <http://srtm.csi.cgiar.org>, 2008.
- [19] Jordanova N, Jordanova D, Petrov P. Soil magnetic properties in *Bulgaria* at a national scale—Challenges and benefits[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 137: 107—122.
- [20] Lu S G, Zhang Z Y, Yu J Y, et al. Magnetic susceptibility of soils derived from basalt and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36 (4): 544—550. [卢升高, 张子玉, 俞劲炎, 等. 玄武岩发育土壤的磁化率及其机理解析[J]. *土壤学报*, 1999, 36 (4): 544—550.]
- [21] Zeng Y Y, Gao L, Zhao W Q, et al. Study on the paleoclimate implications of magnetic susceptibility of the red soils in Southern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34 (5): 133—139. [曾永耀, 高磊, 赵文青, 等. 中国南方红土磁化率的古气候意义研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34 (5): 133—139.]
- [22] Chen H, Yang S L, Cheng T, 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. [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.]
- [23] Lü H Y, Han J M, Wu N Q, et al. Analysis of modern soil magnetic susceptibility in China and its paleoclimatic significance[J]. *Science in China, Ser B*, 1994, 24 (12): 1290—1297. [吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 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*, 1994, 24 (12): 1290—1297.]
- [24] Long X Y, Ji J F, Barrón V, et al. Climatic thresholds for pedogenic iron oxides under aerobic conditions: Processes and their significance in paleoclimate reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 150: 264—277.
- [25] Torrent J, Liu Q S, Bloemendal J, et al. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess—paleosol sequence, Chinese Loess Plateau[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71 (5): 1570—1578.
- [26] Dearing J A, Hay K L, Baban S M J, et al. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 127 (3): 728—734.
- [27] Blundell A, Dearing J A, Boyle J F, et al. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95 (3/4): 158—188.
- [28] Moteki N, Adachi K, Ohata S, et al. Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating[J]. *Nature Communications*, 2017, 8 (1): 1—11.
- [29] Mayor J R, Sanders N J, Classen A T, et al. Elevation alters ecosystem properties across temperate treelines globally[J]. *Nature*, 2017, 542 (7639): 91—95.
- [30] Huang L M, Shao M A, Chen L M, et al. Evolution characteristics of iron oxides and magnetic susceptibility in stagnic anthrosols along chronosequences[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 1—13. [黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 1—13.]

(责任编辑: 檀满枝)