

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

马永法^{1,2)}, 詹涛¹⁾, 杨业¹⁾, 杨会丽³⁾, 刘进峰³⁾, 梁彦霞¹⁾, 黄荣富¹⁾, 张俊¹⁾

1) 黑龙江省生态地质调查研究院, 黑龙江哈尔滨, 150030;

2) 中国地质大学(武汉), 湖北武汉, 430074;

3) 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京, 100029

内容提要:东北平原东部荒山(HS)剖面是我国东北地区的第四纪典型剖面, 针对该剖面的色度研究未见报道。在该剖面北约 50 m 处进行钻探, 通过该钻孔——天恒山(THS)钻孔对该区哈尔滨组黄土-古土壤地层开展了高分辨率的色度研究, 与烧失量进行了相关性分析, 并与磁化率、粒度曲线对比。结果显示, 亮度(L^*)主要受控于有机质含量。黄度(b^*)在整个黄土-古土壤地层中变化特征明显, 与磁化率曲线旋回的相似性较好, 可能与土壤中铁氧化物的种类和含量关系密切, 同时还受控于有机质含量。由于红度(a^*)和 b^* 具有一定的相关性, 认为它们具有较为一致的致色物质, 可能受控于相近的气候因子。 a^* 可能并不能很好地作为该区气候代用指标。 L^* 、 b^* 、 a^*/b^* 可以作为较高纬度东北平原东部黄土地层良好的气候代用指标, 并结合磁化率、粒度指标共同反映了该地区中—晚更新世以来的古气候变化过程, 能较好重建该地区古气候环境的演化历史。经分析, 以天恒山(THS)钻孔 28.3 m 为界, a^* 和 b^* 发生明显变化, 反映了沉积环境的显著改变, 可能指示松嫩古湖于 476 ka 消亡。

关键词: 色度; 黄土-古土壤; 气候变化; 松嫩古湖演化; 东北平原

土壤颜色是土壤最直观显著的特征之一, 反映了土壤在可见光波段的反射光谱特征, 其与土壤有机质含量、氧化铁含量、质地、黏粒含量、水分、黏土矿物类型等理化性状密切相关(Li Yue et al., 2014)。土壤颜色不仅可以反映土壤发育的程度(Kovda, 1998), 还可以反映土壤的结构和沉积环境, 更是作为地层对比的依据(Liu Tungsheng et al., 1985; Ding Min et al., 2010)。黄土沉积物颜色变化的实质是对地质历史时期温湿条件旋回变化的反映(Liu Feng et al., 2015)。在黄土高原千年尺度和万年尺度的黄土古气候研究中土壤颜色能很好地反映亚洲季风和全球气候变化的特征(Fang Xiaomin et al., 1999; Yang Shengli et al., 2001a, 2001b; Chen Jun et al., 2002; Yang Shengli et al., 2003; Sun Youbin et al., 2011; Wang Qiansuo et

al., 2016)。

东北平原位于东亚季风区东北边缘, 纬度较高, 受高纬因素影响明显, 是研究高低纬相互作用的良好区域。荒山黄土剖面是该区典型的第四纪剖面之一, 20 世纪 70 年代以来, 国内外学者对其做了大量工作, 在年代(Wei Qi, 1979; Sun Jianzhong et al., 1982; Wu Xihao et al., 1984; Chu Benjun et al., 1988; Ye Qixiao, 1991)、成因(Pavlinov et al., 1956; Xia Yumei et al., 1983; Chu Benjun et al., 1988; Cao Zhen et al., 2014; Wei Chuanyi et al., 2015; Wu Peng et al., 2020)、地层划分(Zhan Tao et al., 2018; Wang Yong et al., 2020)、重矿物特征(Wang Jiabin et al., 2020)、地球化学特征(Du Huirong et al., 2020; Wei Zhenyu et al., 2020; Zhang Yuexin et al., 2020)等方面取得了重要进

注: 本文为国家自然科学基金基础研究中心项目(编号 41888101)和黑龙江省国土资源科研类项目(编号 201407)联合资助的成果。

收稿日期: 2020-11-27; 改回日期: 2021-05-24; 网络发表日期: 2021-06-23; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 马永法, 男, 1980 年生。博士研究生, 水工环高级工程师, 第四纪地质专业, 研究方向为第四纪地质环境 and 环境工程。E-mail: 80902601@qq.com。通讯作者: 詹涛, 男, 1981 年生。水工环教授级高级工程师, 第四纪地质专业, 研究方向为第四纪地质环境。E-mail: hljzhantao@163.com。

引用本文: 马永法, 詹涛, 杨业, 杨会丽, 刘进峰, 梁彦霞, 黄荣富, 张俊. 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. 地质学报, 95(11): 3519~3531, doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021193.
Ma Yongfa, Zhan Tao, Yang Ye, Yang Huili, Liu Jinfeng, Liang Yanxia, Huang Rongfu, Zhang Jun. 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. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3519~3531.

展,但鉴于色度指标在黄土高原区域重建古气候环境变化方面的重要作用,这项工作在该区尚未开展。本文以该剖面上的钻孔(THS)为研究对象,结合磁化率、粒度等常用指标,探讨该区哈尔滨组黄土-古土壤色度指标的古气候意义,为研究中一晚更新世东亚夏季风影响下的东北地区的环境变迁提供重要依据。同时,野外观察发现该区哈尔滨组和荒山组的沉积物颜色有差异,对其色度进行对比分析,结合粒度特征,佐证了哈尔滨组为风成堆积,而荒山组属于河湖相沉积物的判断(Zhan Tao et al.,2018),进而推测了哈尔滨组风成堆积的物源,以期对松嫩古湖的演化研究提供指示。

1 研究区概况和实验方法

1.1 研究区概况与样品采集

东北平原东部属半湿润温带大陆性季风气候,四季分明,冬长夏短,全年平均降水量 569.1 mm,平均气温约 3.5℃,冬季受西伯利亚-蒙古高压的影响,夏季受太平洋东南季风的影响,强劲的冬季风成为该区沙尘堆积的主要动力。HS 剖面位于黑龙江省哈尔滨市道外区团结镇知青公园内,其东侧为长白山脉支脉张广才岭的西麓滨东丘陵,西侧与东北平原腹地相接,北邻松花江干流(图 1;Ye Qixiao,1991),是我国东北地区第四系典型剖面。

THS 钻孔(126°47′27.77″E,45°47′26.29″N)位于 HS 剖面北约 50 m,采用双管单动内衬塑料套管取芯技术进行钻探取芯,钻探深度 104 m。本文主要对上部约 50 m 地层进行研究,其中 0~28.3 m 为哈尔滨组,28.3~49.2 m 为荒山组(Zhan Tao et al.,2018),岩芯描述中分别用 S 和 L 来表示古土壤和黄土层,其岩性特征如下(Zhan Tao et al.,2018):

- (1)0~0.7 m,黑色表土层,含大量植物根系。
- (2)0.7~28.3 m,棕黄色黏土质粉砂与棕黑色粉砂质黏土互层,标记 S0(0.7~3.7 m)、L1(3.7~5.7 m)、S1(5.7~8.2 m)、L2(8.2~11.7 m)、S2(11.7~13.3 m)、L3(13.3~16.6 m)、S3(16.6~18.4 m)、L4(18.4~22.4 m)、S4(22.4~24.2 m)、L5(24.2~28.3 m),棕黑色层具有土壤形态特征,大部分层位呈中等发育,粒状,干时松软,有些层位具有钙质菌丝体、黑色铁锰胶膜、根孔等。

- (3)28.3~49.2 m,总体呈现棕黄色粉砂质黏土,其间夹青灰色、灰绿色和棕黑色黏土层。28.3~29.05 m:棕色黏土层,颜色偏黑,有机质含量较高,



图 1 东北平原东部 THS 钻孔和 HS 剖面的地理位置(据 Zhan Tao et al.,2018)

Fig. 1 Location of the THS core and HS section in the eastern part of the Northeast China Plain (after Zhan Tao et al.,2018)

铁质斑状浸染。29.805~31.335 m:黄棕色粉砂质黏土层,局部铁、锰斑状浸染。31.335~33.075 m:棕色粉砂质黏土,颜色偏暗,局部呈块状铁锈浸染。33.075~38.925 m:灰绿色粉砂质黏土,局部黑色物质填充裂隙,棕褐色铁锈条带状浸染。38.925~40.2 m:棕黄色粉砂质黏土,粉砂含量增加。40.2~40.9 m:棕色粉砂质黏土,局部有棕黑色层层位,有机质含量增加。40.9~42.9 m:棕色粉砂质黏土层,较上层黏粒含量增加。42.9~44.725 m:棕色粉砂质黏土层,青灰色较明显。44.725~47.45 m:棕黄色粉砂质黏土。47.45~48.725 m:棕色粉砂质黏土,颜色偏暗。48.725~50.125 m:棕黄色粉砂质黏土,铁、锰斑状浸染。

对 THS 钻孔的岩芯自上而下以 10 cm 间距共采集了 492 个样品,用于色度、烧失量和磁化率等指标的测试。粒度为以前研究测试的数据(Zhan Tao et al.,2018)。同时,2016 年 7 月,在 HS 剖面上采取年龄样,在哈尔滨组 S0 下部埋深 0.8 m 处和 L1 下部埋深 3.3 m 处采集了光释光(OSL)年代学样品 2 个,在剖面上的哈尔滨组 L5 底部埋深约 28 m 处和荒山组顶部埋深约 29.5 m 处采集了电子自旋共振(ESR)年代学样品 2 个。

1.2 实验方法

CIELAB 表色系统是目前最主要的颜色描述和测量系统之一,与常用的 Munsell 系统不同,它可以定量表示颜色的变化(Vodyanitskii et al., 2016)。该表色系统使用 L^* 、 a^* 、 b^* 这三个参量描述任何均匀连续的颜色空间。其中: L^* 代表亮度,变化于黑(0)与白(100)之间; a^* 代表红度,变化于红和绿之间($+a^*$ 为红色方向, $-a^*$ 为绿色方向); b^* 代表黄度,变化于黄与蓝之间($+b^*$ 为黄色方向, $-b^*$ 为蓝色方向)。本文采用该表色系统以上三个参数来描述黄土-古土壤的颜色变化。

色度在柯尼卡美能达公司制造的 CM-700d 分光测色仪上测量,其中测试参数为 CIE D65 标准光源(色温为 6500 K),观察视野为 10° ,孔径为 8 mm。仪器采用镜面反射光和漫反射光(SCI)测量模式,光谱反射率标准偏差小于 0.1%,色度值的标准差值 ΔE^*_{ab} 小于 0.04。色度测试的具体步骤如下:① 用玛瑙研钵将烘干的样品碾磨至 200 目以下;② 使用零校正盒 CM-A182 进行仪器零位校准后,取 CM-A177 白色反光板进行白板测量校正;③ 取样品 0.5 g 左右放于载玻片凹槽中压实、压平。随机选择三个表面平整的区域测试三次,获得 L^* 、 a^* 、 b^* 以及 400~700 nm 反射光谱数据,然后分别取平均值。样品前处理与测试在中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室完成。

结合前人的研究成果(Chen Zhong et al., 2007; Ye Wei, 2001; Sui Yuzhu, 2006; Li Xinxin et al., 2014; Lan Jianghu et al., 2020),有机质和碳酸盐含量变化采用烧失量法确定。将样品的高温烧失量烧失温度分别设定为 550°C 和 950°C ,并且为保证烧失彻底,确定 550°C 高温灼烧 2 h, 950°C 高温灼烧 4 h,得到的样品烧失量分别代表有机质和碳酸盐的含量变化趋势,其在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成。磁化率采用捷克 Agico 公司生产的 KLY-3 卡帕桥磁化率仪测量,在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。

光释光(OSL)样品的前处理在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室释光年代学实验室完成。对经氟硅酸刻蚀后细颗粒($4\sim 11\ \mu\text{m}$)石英组分采用简单多片再生法(Simple Multiple Aliquot Regenerative Dose, SMAR)或者称感量变化校正多片再生法(Sensitivity-corrected

Multiple Aliquot Regenerative Dose, SMAR)进行蓝光释光(BLSL)的等效剂量(ED)的测试。本批样品的 U、Th 和 K 含量在经标定的 ORTEC 公司产的 GEM70P4-95 型高纯锗仪器上完成测试,进而计算出各样品所吸收的环境剂量率(D)。根据年龄(A)=等效剂量(ED)/剂量率(D)计算出样品的年龄。

电子自旋共振(ESR)的样品根据性状不同取一定数量的原样品称重,放入干燥箱中烘干(温度 40°C)。烘干前后称重,并计算含水量。先进行石英提取,然后每个样品称小样 10 份(每份样品称重 0.25 g)送北京大学放射化学学院钴源实验室进行样品人工辐照,之后在德国布鲁克公司生产的 EMX1/6 型 ESR 信号测量谱仪上对辐照后的样品进行 ESR 信号测量确定古剂量,然后在核工业北京地质研究院分析测试中心采用 ELEMENT 等离子体质谱分析仪进行环境剂量测试,最后根据公式 A 年龄(ka)=P 古剂量(GY)/D 年剂量(GY/ka),计算样品的年龄。以上实验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。

2 THS 钻孔哈尔滨组色度变化特征与古气候意义

2.1 实验结果

2.1.1 亮度 L^* 的变化特征

THS 钻孔哈尔滨组 L^* 的平均值为 60.17,变化范围 45.98~66.90。古土壤层 S0、S1、S2、S3、S4, L^* 的平均值分别为 55.52、57.09、59.46、53.20、55.97;黄土层 L1、L2、L3、L4、L5, L^* 的平均值分别为 61.88、62.24、62.99、62.29、63.96。哈尔滨组整体上 L^* 由大到小依次为: $L5>L3>L4>L2>L1>S2>S1>S4>S0>S3$,表现出古土壤层值小,黄土层值大的特点,随着黄土-古土壤地层的变化,钻孔 L^* 呈现出规律性的波动。

2.1.2 黄度 b^* 的变化特征

THS 钻孔哈尔滨组 b^* 的平均值为 18.70,变化范围 13.60~23.90。古土壤层 S0、S1、S2、S3、S4, b^* 的平均值分别为 18.23、17.66、18.13、15.91、16.71;黄土层 L1、L2、L3、L4、L5 中, b^* 的平均值分别为 19.71、19.40、19.19、19.92、19.41。哈尔滨组 b^* 由大到小依次为: $L4>L1>L5>L2>L3>S0>S2>S1>S4>S3$,表现出古土壤层值小,黄土层值大的特点,钻孔 b^* 的变化同 L^* 的曲线变化特征相似,趋势与幅度能够进行较好地匹配,都能反映黄

土-古土壤地层的变化。

2.1.3 红度 a^* 的变化特征

THS 钻孔哈尔滨组 a^* 的平均值为 5.91, 变化范围 4.61~7.67。古土壤层 S0、S1、S2、S3、S4, a^* 的平均值分别为 6.28、6.11、5.72、5.35、5.42; 黄土层 L1、L2、L3、L4、L5, a^* 的平均值分别为 6.23、6.15、5.61、6.12、5.69。哈尔滨组 a^* 由大到小依次为: S0>L1>L2>L4>S1>S2>L5>L3>S4>S3。相对 L^* 、 b^* 而言, a^* 的变化特征较复杂, 并未表现出规律性特征, 其曲线变化趋势与 L^* 、 b^* 的变化趋势不太一致。但经分析, 除古土壤 S0 以外, 黄土层 L2 以上层位 a^* 由大到小依次为: L1>L2>S1>S2, 黄土层 L2 以下层位 a^* 由大到小依次为: L4>L5>L3>S4>S3, 这两个层位表现出了黄土层的 a^* 大于古土壤层的特征。

2.1.4 a^*/b^* 的变化特征

THS 钻孔哈尔滨组 a^*/b^* 的平均值为 0.32, 变化范围 0.27~0.37, 自上而下呈现出 a^*/b^* 随着古土壤层与黄土层的变化而规律性波动。古土壤 S0、S1、S2、S3、S4, a^*/b^* 的平均值分别为 0.34、0.35、0.32、0.34、0.33; 黄土层 L1、L2、L3、L4、L5 中, a^*/b^* 的平均值分别为 0.32、0.32、0.29、0.31、0.29。哈尔滨组 a^*/b^* 由大到小依次为: S1>S0>S3>S4>S2=L1=L2>L4>L3=L5, a^*/b^* 值基本表现出古土壤层大于黄土层的特点, 自上而下呈现出 a^*/b^* 随着古土壤层与黄土层波动变化, 曲线整体变化趋势与 L^* 和 b^* 的曲线相反。

2.1.5 烧失量的变化特征

样品的烧失质量占样品净重的百分比即为烧失量。对于 550℃ 高温烧失量, THS 钻孔哈尔滨组的古土壤层 S0、S1、S2、S3、S4, 其平均值分别为 5.51%、4.94%、5.43%、5.46%、5.77%; 黄土层 L1、L2、L3、L4、L5 中, 其平均值分别为 5.32%、5.34%、4.97%、4.81%、5.12%。哈尔滨组烧失量由大到小依次为: S4>S0>S3>S2>L2>L1>L5>L3>S1>L4, 除 S1 的值较小外, 其他层位均表现出古土壤层值大, 黄土层值小的特点, 其曲线整体变化趋势与 L^* 、 b^* 的曲线相反, 与 a^*/b^* 的曲线相似。对于 950℃ 高温烧失量, THS 钻孔哈尔滨组的古土壤层 S0、S1、S2、S3、S4, 其平均值分别为 1.68%、1.07%、1.40%、1.31%、1.56%; 黄土层 L1、L2、L3、L4、L5, 其平均值分别为 1.05%、1.21%、1.37%、1.60%、1.33%。哈尔滨组烧失量

由大到小依次为: S0>L4>S4>S2>L3>L5>S3>L2>S1>L1, 无明显规律性变化。

2.1.6 磁化率的变化特征

THS 钻孔哈尔滨组的古土壤 S0、S1、S2、S3、S4 中, 质量磁化率的平均值分别为 $35.17 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $28.97 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $23.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $21.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $19.12 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 黄土层 L1、L2、L3、L4、L5 中, 质量磁化率的平均值分别为 $42.06 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $36.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $43.24 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $42.21 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $38.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。哈尔滨组质量磁化率由大到小依次为: L3>L4>L1>L5>L2>S0>S1>S2>S3>S4, 显示出古土壤层值小, 黄土层值大的特点, 与中国黄土高原典型黄土-古土壤磁化率变化特征截然相反, 与阿拉斯加、西伯利亚的黄土-古土壤磁化率变化特征相一致 (Begét et al., 1989, 1990; Chlachula et al., 1998, 2003), 其曲线整体变化趋势与 L^* 和 b^* 的曲线相似, 与 a^*/b^* 的曲线相反。

2.1.7 粒度和年代学特征

前人研究表明 (Zhan Tao et al., 2018), THS 钻孔 28.3 m 以上层位哈尔滨组的平均粒径、中值粒径以及粒级百分含量等呈现大幅度波动, 而且反映了黄土-古土壤地层旋回特征。黄土层较粗, 说明其形成时, 风力强劲, 搬运的粗颗粒较多, 气候干冷; 古土壤层较细, 说明其形成时, 风力较弱, 搬运的粗颗粒较少, 成壤较强, 气候暖湿。钻孔的年代标尺是在剖面样品光释光 (OSL)、电子自旋共振 (ESR) 年龄控制点的基础上, 进行线性内插获得的, THS 钻孔和 HS 剖面上部地层采用磁化率对比, 下部地层采用高程测量及岩性对比完成, 综合对比后, 获得 THS 钻孔 28.3 m 处的年龄为 476 ka, 亦即哈尔滨组的形成年龄。年代样品 OSL 的计算结果见表 1, ESR 的计算结果见表 2。

2.2 讨论

2.2.1 亮度 L^* 的意义

沉积物的粗糙度、湿度、碳酸盐含量和有机质含量等都会影响 L^* 的变化 (He Liu et al., 2010), 在实验前处理阶段已将粗糙度和湿度通过物理方法使其影响降至最小。前人研究普遍认为黄土中碳酸盐矿物的存在对 L^* 具有促进增强作用, 而有机质则相反 (He Liu et al., 2010)。

经研究, 550℃ 高温烧失量与黄土-古土壤中有有机质的含量变化显著正相关, 950℃ 高温烧失量与黄土-古土壤中碳酸盐含量变化显著正相关 (Li Xinxin

表 1 东北平原东部 THS 钻孔样品光释光(OSL)的测年结果

Table 1 The optical stimulated iuminescence (OSL) dating results of the samples from core THS in the eastern part of the Northeast China Plain							
样品埋深(m)	²³⁸ U (×10 ⁻⁶)	²³² Th (×10 ⁻⁶)	⁴⁰ K (×10 ⁻⁶)	实测含水量(%)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (ka)
0.8	32.9±6.5	51.9±1.1	729.0±14.2	10	4.1±0.2	30.5±0.7	7.4±0.5
3.3	33.9±6.6	49.9±0.8	781.6±15.6	11	4.1±0.1	169.1±18.6	41.6±5.4

表 2 东北平原东部 THS 钻孔样品电子自旋共振(ESR)的测年结果表

Table 2 The Electron spin resonance (ESR) dating results of the samples from core THS in the eastern part of the Northeast China Plain							
样品埋深(m)	U (×10 ⁻⁶)	Th (×10 ⁻⁶)	K ₂ O (%)	含水量 (%)	古剂量 (Gy)	年剂量 (Gy/ka)	年龄 (ka)
约 28.00	2.08	12.40	3.16	23.70	1570±201	3.19	492±25
约 29.50	2.17	12.10	3.02	36.40	1248±78	2.52	495±31

et al., 2014)。本文通过烧失量法分别限定有机质和碳酸盐含量。分析 L^* 与 550℃ 高温烧失量之间的关系,发现 L^* 随烧失量的增高而降低,并且在变化的趋势和幅度上均具有良好的可对比性(图 2)。相关性分析也显示(图 3),两者为较显著负相关关系,相关系数 $R^2=0.3487$ 。这表明有机质含量的变化是使 L^* 发生变化的主要因素。黄土沉积物中有机质是一定生物和气候环境下的产物,在一定条件下,可反映地表植被的发育状态和生物量的大小,而这都与降水量的多少有直接关系。在气候湿润且降水量多时,植被生长茂盛,有利于有机质的产生和积累;而在气候寒冷干燥且降水量少的时期,植被稀疏,不利于有机质的产生和积累(Gao Pengkun et al., 2015)。剖面中 L^* 的变化可能是对区域降水量变化的响应。古土壤较低的 L^* 值指示该时期气候暖湿,降水较多,植被发育,有利于有机质的累积;而黄土层的 L^* 值较高,反映其形成时期气候干冷,植被生长较差,有机质累积减少。在湖泊沉积物中,高 L^* 值指示干冷的气候(Wu Yanhong et al., 2004; Wu Jian et al., 2009),与黄土沉积物的古气候意义一致。

对于 L^* 与 950℃ 高温烧失量之间的关系,相关性分析显示(图 3),两者相关性较差,相关系数 $R^2=0.0223$ 。这表明在本地区碳酸盐对 L^* 的影响很小。

2.2.2 红度 a^* 和黄度 b^* 的意义

前人的研究结果表明,在排除水分影响的情况下,黄土沉积物中铁氧化物的种类和含量(赤铁矿和针铁矿百分含量的变化)是引起颜色分量 a^* 、 b^* 发生变化的主因(Baumann et al., 2016; Chen Jie et al., 2018)。在风化成壤过程中,大量易淋溶及易分解的矿物和组分发生淋失,黄土中的 Fe 作为一种

不易迁移的元素往往难以发生明显的迁移,但其形态和价态却容易随着沉积环境的不同而发生转变,多以铁氧化物(如赤铁矿、针铁矿、磁铁矿等)的形式在黄土中发生累积,进而使得黄土的颜色发生变化,成为影响 a^* 、 b^* 的主因。通过系统测试发现 a^* 和 b^* 为显著正相关关系,相关系数达到 $R^2=0.5466$ (图 4),说明引起 a^* 和 b^* 变化的铁氧化物相似,并且受控于相似的气候条件,但具体是哪种铁矿物还有待更深一步的研究。

碳酸盐和有机质的变化对 a^* 、 b^* 影响较小(Chen Jie et al., 2018)。本文将 a^* 、 b^* 分别同 550℃ 与 950℃ 高温烧失量做相关性分析后(图 5),其相关系数 R^2 分别为 0.0497、0.2551、0.0187、0.0113,可知在本地区有机质对 a^* 影响微弱,对 b^* 有较大影响。碳酸盐对 a^* 、 b^* 影响很小。而 b^* 同 550℃ 烧失量呈较显著负相关,与 550℃ 烧失量曲线旋回的相似性较好,表明较低的 b^* 值反映该时期有机质的累积较多,植被较发育,气候较暖湿;而较高的 b^* 值,指示该时期有机质累积较少,植被发育较差,气候较干冷。在湖泊沉积物中,高 b^* 值指示暖湿的气候(Wu Jian et al., 2009),与黄土沉积物的古气候意义相反。

经分析,除古土壤 S0 以外,以黄土层 L2 为界,虽然上下两个层位表现出了黄土层的 a^* 大于古土壤层的特征,但其曲线与其他曲线的变化特征相似性差一些(图 2),显示与黄土高原地区不同,可能表明其在本地区并不能很好地作为气候替代性指标,以指示气候的冷暖干湿变化,其原因有待于进一步深入研究。 b^* 表现出黄土层大于古土壤层的特征,其曲线与磁化率的曲线特征相一致。分析其原因,可能是研究区与阿拉斯加、西伯利亚都处于较高纬

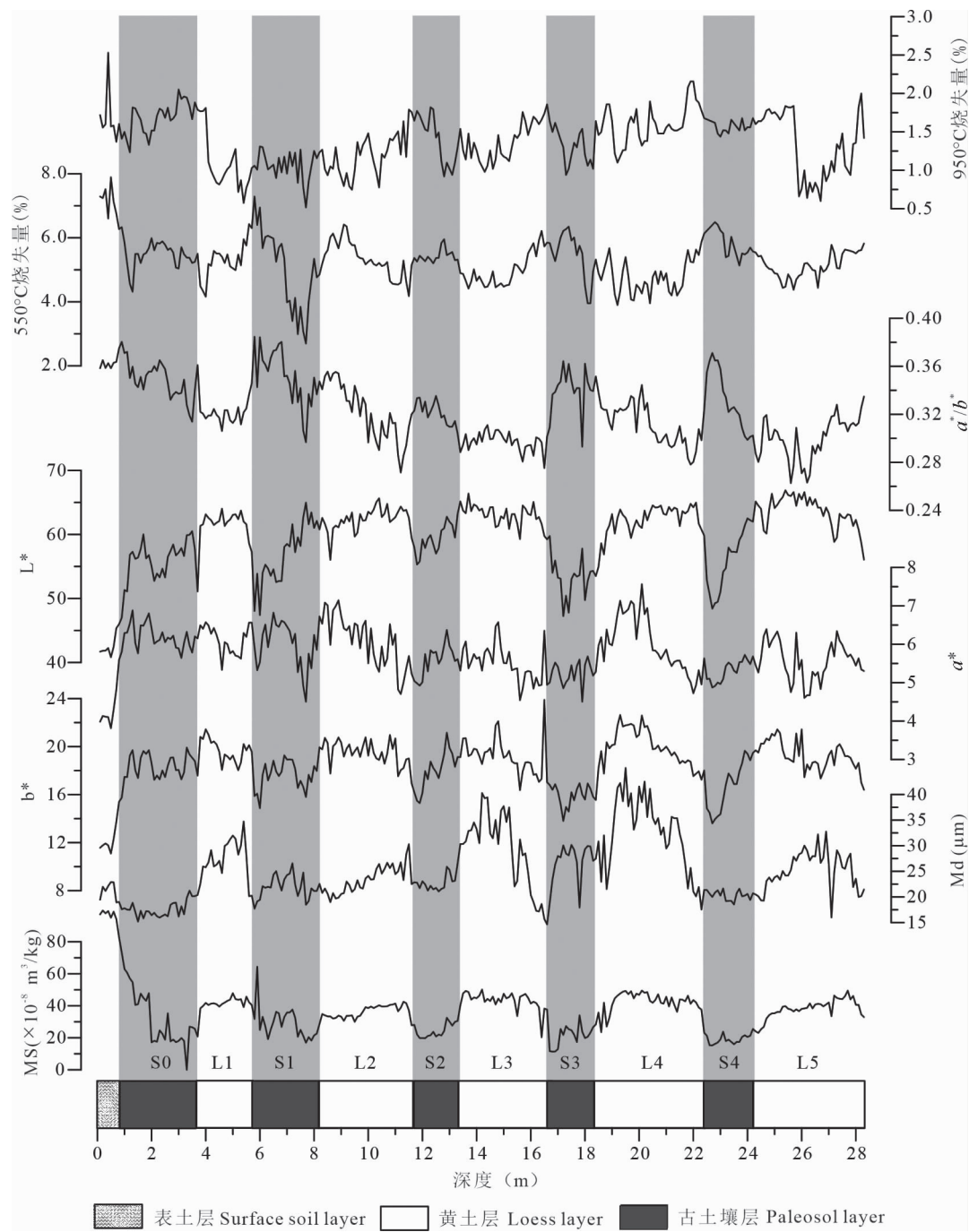


图 2 东北平原东部 THS 钻孔哈尔滨组磁化率、中值粒径

(据 Zhan Tao et al. ,2018), b^* 、 a^* 、 L^* 、 a^*/b^* 、550℃与 950℃烧失量变化特征

Fig. 2 Variations among magnetic susceptibility,median diameter(after Zhan Tao et al. ,2018), b^* , a^* , L^* , a^*/b^* and ignition loss at 550℃ and 950℃ of the Harbin Formation of the THS core in the eastern part of the Northeast China Plain

度且较湿润地区,在暖湿的古土壤层形成期,因其较强的还原环境,导致引起 a^* 和 b^* 变化的铁氧化物被还原而使 a^* ,尤其是 b^* 相比于黄土层变小。

2.2.3 a^*/b^* 值的意义

前人研究表明,黄土的 a^*/b^* 值与 L^* 呈显著负相关(Wang Haiyan et al. ,2017),黄土的 a^*/b^*

也可作为一个良好的气候代用指标,反映气候的变化特征,其高值指示暖湿气候下的强成壤环境,低值指示干冷环境下的弱成壤环境(Gao Pengkun et al. ,2015)。经分析, a^*/b^* 值基本表现出古土壤层大于黄土层的特点,对 a^*/b^* 与 L^* 进行相关性分析(图 4),二者为显著负相关,相关系数 $R^2 =$

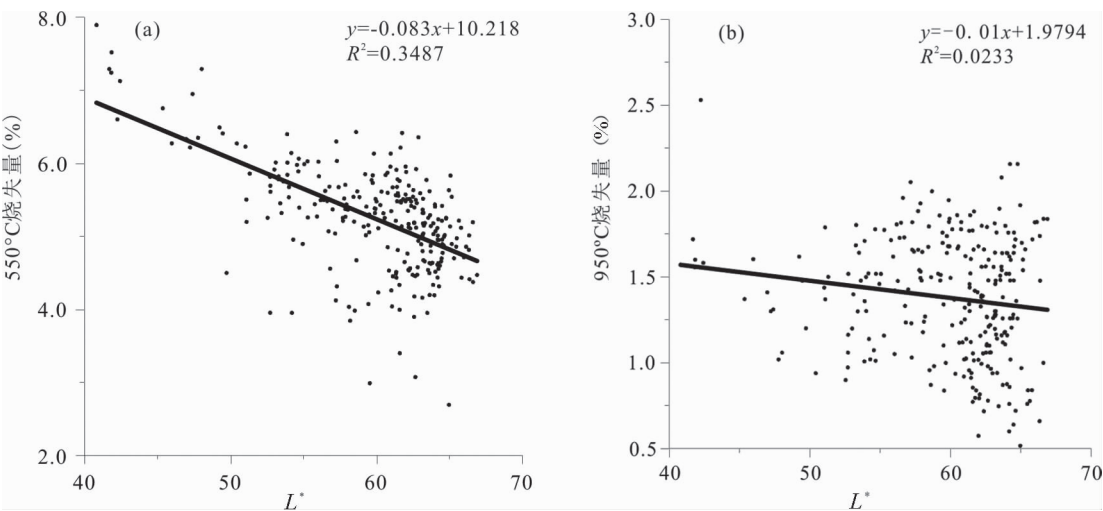


图 3 东北平原东部 THS 钻孔哈尔滨组 L^* 、550℃烧失量和 950℃烧失量的相关性
Fig. 3 Relationships among L^* , ignition loss at 550℃ and ignition loss at 950℃ of the Harbin Formation of the THS core in the eastern part of the Northeast China Plain

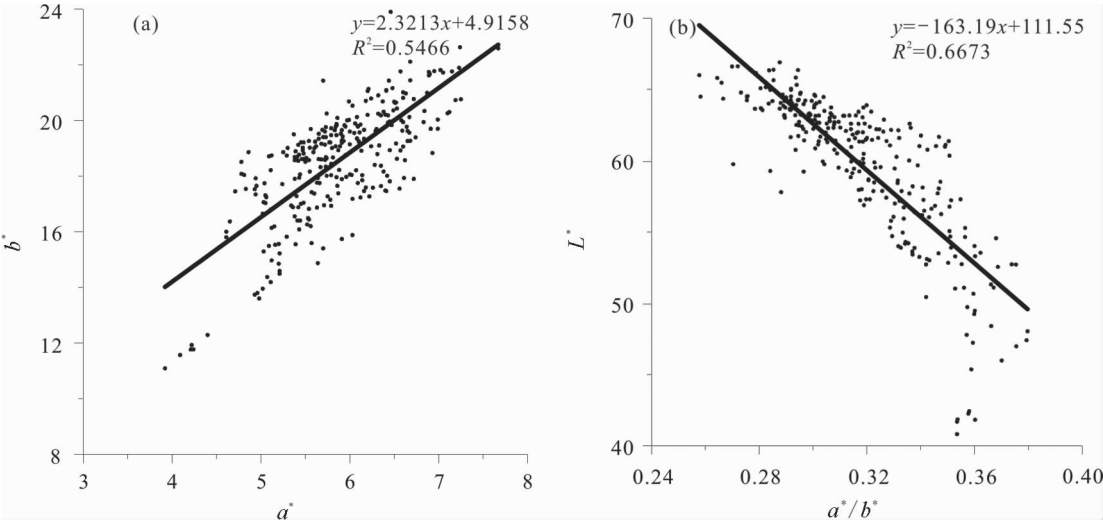


图 4 东北平原东部 THS 钻孔哈尔滨组 a^* 和 b^* 、 a^*/b^* 和 L^* 的相关性
Fig. 4 Relationships among a^* and b^* , a^*/b^* and L^* of the Harbin Formation of the THS core in the eastern part of the Northeast China Plain

0.6673, 与前人研究结果一致。 a^*/b^* 值越大指示该时期有利于有机质的累积, 表明气候暖湿, 植被发育; a^*/b^* 值越小, 表明该时期不利于有机质的累积, 气候干冷, 植被生长较差。

2.2.4 色度参数与磁化率、粒度曲线特征对比及古气候意义

磁化率 (Deng Chenglong et al., 2007)、粒度 (Liu Dongyan et al., 2010) 可以作为良好的气候替代指标用于反演黄土-古土壤地层的古气候变化, 但 THS 钻孔哈尔滨组的磁化率与中国黄土高原典型黄土-古土壤磁化率变化特征截然相反。分析其原

因, 可能是研究区与阿拉斯加、西伯利亚都处于较高纬度且为较湿润地区, 其成土环境随气候温湿程度增加而变得更加湿润, 导致成土环境向着还原方向发展, 其结果是强磁性的铁的氧化物 (如磁赤铁矿) 被还原, 使其磁化率降低, 而且温湿程度 (尤其湿度) 越高, 还原程度也越高, 高磁化率的铁的氧化物被溶解得越多, 磁化率就越低。在成土强的古土壤层, 磁赤铁矿则可能被还原较多, 导致了其磁化率低于黄土层 (Zhu Rixiang et al., 2000; Liu Xiuming et al., 2007a, 2007b)。因此, 初步判断其古气候意义可能也相反。图 2 显示, 除 a^* 的曲线外, L^* 、 b^* 曲线与

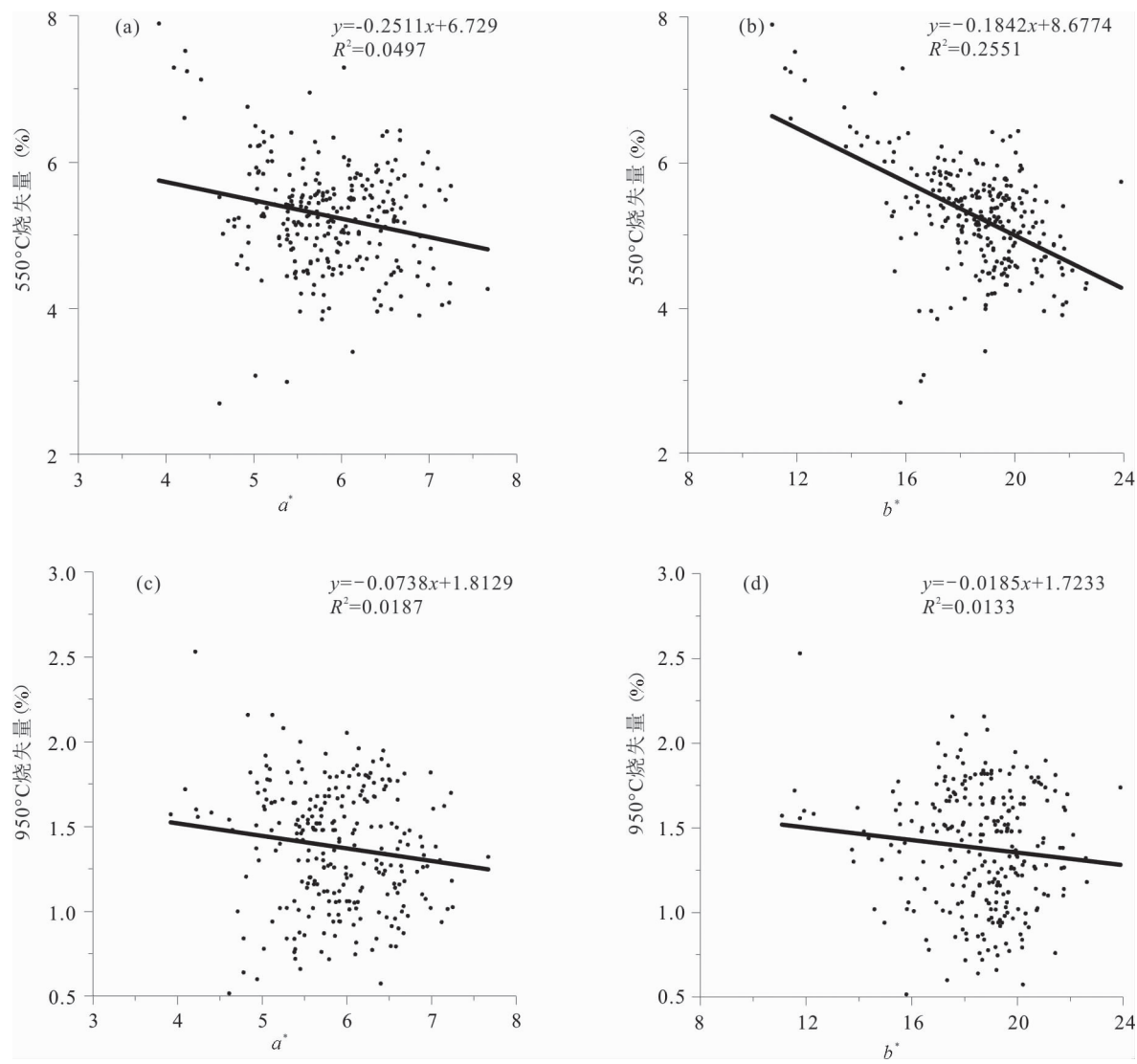


图 5 东北平原东部 THS 钻孔哈尔滨组 a^* 、 b^* 、550℃烧失量和 950℃烧失量的相关性
Fig. 5 Relationships among a^* , b^* , ignition loss at 550℃ and ignition loss at 950℃ of the Harbin Formation of the THS core in the eastern part of the Northeast China Plain

磁化率、粒度曲线的变化特征相似, a^*/b^* 曲线与磁化率、粒度曲线的变化特征相反, 各种曲线的峰谷变化, 较好地指示了地层序列中的黄土-古土壤旋回, 即在古土壤层表现出较高的 a^*/b^* 值, 较低的 L^* 值、 b^* 值、磁化率值和粒度值。

古土壤层 S0 的 a^*/b^* 较高, 相对应的是 L^* 、 b^* 、磁化率和粒度的低值, 表明在该时期(13~2.46 ka)气候暖湿, 风力较弱, 植被发育, 风化成壤作用加强。黄土层 L1 的 L^* 、 b^* 、磁化率和粒度值较高, a^*/b^* 较低, 证明在 L1 形成时期(73~13 ka)植被量降低, 土壤有机质含量减少, 土壤亮度值增加, 气候环境干冷, 风力强劲, 风化较弱, 与前人研究(Xia Yumei et al., 1983)的哈尔滨黄山剖面第 3 层晚更新世末期的黄土状亚砂土形成时干冷的气候环境一

致, 也能与晚更新世晚期的吉林省安图洞穴堆积时的寒冷气候相对比(Xia Yumei et al., 1984)。古土壤层 S1(122.58~73 ka)、S2(221.02~192 ka)、S3(313.53~280.88 ka)、S4(418.74~386.09 ka)各个指标出现与 S0 相同的规律, 也指示了暖湿的气候环境。黄土层 L2(192~122.58 ka)、L3(280.88~221.02 ka)、L4(386.09~313.53 ka)、L5(476~418.74 ka)出现类似于 L1 的规律, 表明了气候转冷、降水减少的环境。

3 THS 钻孔色度变化对松嫩古湖演化的指示

THS 钻孔哈尔滨组 a^* 、 b^* 、中值粒径的平均值分别为 5.86、18.52、26 μm , 变化范围分别为 3.92

~7.67、11.09~23.9、15.56~46.11 μm ;荒山组 a^* 、 b^* 、中值粒径的平均值分别为 6.23、19.78、16.15 μm ,变化范围分别为 3.56~9.71、14.12~25.77、12.55~21.57 μm 。

以 THS 钻孔 28.3 m 为界,28.3 m 以上哈尔滨组的 a^* 、 b^* 显著小于 28.3 m 以下的荒山组,哈尔滨组的粒度显著大于荒山组,与岩性描述一致。同时,荒山组的 a^* 、 b^* 、中值粒径的曲线波动小于哈尔滨组,反映了较稳定的沉积环境(图 6)。由此可初步推断,28.3 m 处的沉积环境发生了明显改变,通过色度和粒度的显著变化直接反映了出来。前人研究表明(Zhang Xinrong et al., 2020),研究区附近松嫩平原南缘的中更新世 PA 剖面河湖相砂质—粉砂质黏土沉积物的 a^* 约在 7.2~9 之间波动, b^* 约在 20~24 之间波动,其值都比中一晚更新世的哈尔滨组高较多,与中更新世的荒山组相近。经与 PA 剖面对比,通过色度的变化可基本推断出荒山组应为河湖相沉积,侧面验证了哈尔滨组为风成堆积(Wei Chuanyi et al., 2015; Zhan Tao et al., 2018),而荒山组属于河湖相沉积物的判断(Zhan Tao et al., 2018)。

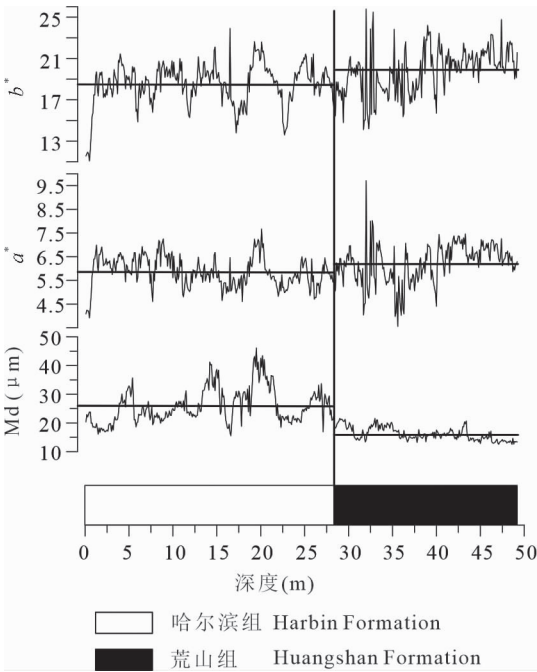


图 6 东北平原东部 THS 钻孔沉积物中值粒径、 a^* 和 b^* 随地层深度的变化

Fig. 6 Variations among median diameter, a^* and b^* with the depth of the stratum in the THS core of the eastern part of the Northeast China Plain

哈尔滨组风成堆积的出现,说明在此之前为其提供粉尘物质的干旱源区已经形成。荒山哈尔滨组的粒度较西峰黄土-古土壤偏粗,可能指示其形成时期搬运风动力大或者距离物源区较近(Zhan Tao et al., 2018)。前人研究认为荒山哈尔滨组的地球化学特征与松嫩沙地很相似(Xie Yuanyun et al., 2019, 2020),距研究区较近的松嫩沙地是荒山哈尔滨组的一个主要物源(Du Huirong et al., 2020)。而现在松嫩沙地的位置正是第四纪松嫩古湖的位置(Qiu Shanwen et al., 1984, 1988, 2012)。经分析,松嫩古湖消失后,在干冷时期,湖床细颗粒沉积被风力搬运,为荒山黄土-古土壤的形成提供了物源,而干涸的古湖区域逐渐演变为现在的松嫩沙地,因而哈尔滨组的出现可能指示松嫩古湖的消亡。根据前述的测年结果,得到荒山哈尔滨组形成的年龄为 476 ka,代表了松嫩古湖可能消失的年龄,与前人研究结果基本一致(Zhan Tao et al., 2019)。经研究,构造运动可能是松嫩古湖几近消亡的原因,但这需要在依兰峡谷找到依舒断裂活动和松花江古流向等更为直接的沉积学、年代学证据(Zhan Tao et al., 2019)。

4 结论

(1) THS 钻孔哈尔滨组的色度参数 L^* 、 b^* 、 a^*/b^* 可作为较高纬度东北地区较好的气候替代指标,其变化与第四纪冰期—间冰期旋回的波动特征相似。 a^*/b^* 越大, L^* 、 b^* 值越小,指示气候越暖湿,成壤作用越强; a^*/b^* 越小, L^* 、 b^* 值越大,指示气候越冷干,成壤作用越弱。 a^* 可能并不能很好地作为气候替代性指标,以指示气候的冷暖干湿变化,其原因有待于进一步研究。

(2) 在纬度较高的东北地区,黄土-古土壤的色度参数 L^* 、 b^* 、 a^*/b^* 与磁化率、粒度等替代指标结合使用,能更好地反演该地区 476 ka 以来冷干(476~418.74 ka)—暖湿(418.74~386.09 ka)—冷干(386.09~313.53 ka)—暖湿(313.53~280.88 ka)—冷干(280.88~221.02 ka)—暖湿(221.02~192 ka)—冷干(192~122.58 ka)—暖湿(122.58~73 ka)—冷干(73~13 ka)—暖湿(13~2.46 ka)的古气候变化过程。

(3) 以 THS 钻孔 28.3 m 为界,色度发生明显变化,反映了沉积环境显著改变,可能指示松嫩古湖大约于 476 ka 消亡。

致谢:审稿专家给予了很多建设性意见,董吉宝在烧失量的测试过程中提供了很大帮助,王铠铭、王

风成堆积形成的一个必要条件就是物源。荒山

鹤、樊瑛、任明兰、李想、张晶、刘畅和刘莉莉参与了样品的采集,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Baumann K, Schoning I, Schrupf M, Ellerbrock R H, Leinweber P. 2016. Rapid assessment of soil organic matter: soil color analysis and fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma*, 278: 49~57.
- Begét J E, Hawkins D B. 1989. Influence of orbital parameters on Pleistocene loess deposition in Central Alaska. *Nature*, 337: 151~153.
- Begét J E, Stone D B, Hawkins D B. 1990. Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the Late Quaternary. *Geology*, 18(1): 40~43.
- Cao Zhen, Zhu Xiaodong. 2014. Research on the formation reason of loess in middle and eastern place in Northeast China. *Journal of Changchun Normal University: Natural Science*, (2): 85~89 (in Chinese with English abstract).
- Chlachula J. 2003. The Siberian loess record and its significance for reconstruction of Pleistocene climate change in north-central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 22(18-19): 1879~1906.
- Chlachula J, Evans M E, Rutter N W. 1998. A magnetic investigation of a Late Quaternary loess/paleosol record in Siberia. *Geophysical Journal International*, 132(1): 128~132.
- Chen Jie, Yang Taibao, Zeng Biao, He Yi, Ji Qin. 2018. Chroma characteristics and its paleoclimatic significance in Pamir loess section, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(2): 333~342 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jun, Ji Junfeng, Balsam W, Chen Yang, Liu Lianwen, An Zhisheng. 2002. Characterization of the Chinese loess-paleosol stratigraphy by whiteness measurement. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 183(3-4): 287~297.
- Chen Zhong, Ma Haizhou, Cao Guangchao, Zhang Xiyang, Zhou Dujun, Yao Yuan, Gao Zhanghong, Tan Hongbing. 2007. Climatic-environmental evolution in Gahai Lake area since the Late Glacial period from loess-on-ignition. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 27(1): 131~138 (in Chinese with English abstract).
- Chu Benjun, Gao Zhencao, Yang Shisheng, Xi Xiaohua. 1988. Quaternary magnetostratigraphic classification of the Song-Nen plain (Songhuajiang river-Nenjiang river). *Marine Geology and Quaternary Geology*, 8(4): 91~96 (in Chinese with English abstract).
- Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2007. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequence. *Quaternary Sciences*, 27(2): 193~209 (in Chinese with English abstract).
- Ding Min, Pang Jiangli, Huang Chunchang, Peng Shuzhen, Yang Jiong, Chen Dongdong. 2010. Chroma characteristics and its climatic significance in Holocene loess-paleosol sequence—a case study of the Holocene Liangcun profile in the western Guanzhong basin. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 38(5): 92~97 (in Chinese with English abstract).
- Du Huirong, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Wang Jiaxin, Sun Lei. 2020. Grain-size and geochemical compositions of the Harbin loess deposits and their implications for eolian dust provenances. *Journal of Desert Research*, 40(1): 64~76 (in Chinese with English abstract).
- Fang X M, Ono Y, Fukuksawa H, Pan Baotian, Li Jijun, Guan Donghong, Keichi O, Tsukamoto S, Torii M, Mishima T. 1999. Asian summer monsoon instability during the past 60, 000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 168: 219~232.
- Gao Pengkun, Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, Bian Hongyan, Wang Leibin, Wang Xuejia. 2015. Chroma characteristics and its significances of the Chafangcun loess-paleosol profile in southeast Shaanxi, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 537~542 (in Chinese with English abstract).
- He Liu, Sun Youbin, An Zhisheng. 2010. Changing color of Chinese loess: controlling factors and paleoclimatic significances. *Geochimica*, 39(5): 447~455 (in Chinese with English abstract).
- Kovda B A. 1998. *Principals of Pedology*. Beijing: Science Press.
- Lan Jianghu, Xu Hai, Lang Yunchao, Yu Keke, Zhou Peng, Kang Shugang, Zhou Kangen, Wang Xulong, Wang Tianli, Cheng Peng, Yan Dongna, Yu Shiyong, Che Ping, Ye Yuanda, Tan Liangcheng. 2020. Dramatic weakening of the East Asian summer monsoon in northern China during the transition from the Medieval Warm Period to the Little Ice Age. *Geology*, 48(4): 307~312.
- Li Xinxin, Song Yougui. 2014. Variation in loss on ignition of the Nilka loess section in the Yili basin and its impact factors. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 34(5): 127~135 (in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Song Yougui, Wang Qiansuo. 2014. Chroma characteristics in the Zhaoxu loess section and its paleoclimatic significance. *Journal of Earth Environment*, 5(2): 67~75 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongyan, Li Weiran, Peng Shasha, Wang Ling. 2010. Current application of grain-size analysis in Chinese loess paleoclimatic study. *Periodical of Ocean University of China*, 40(2): 79~84 (in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Wang Hao, Qin Yifan, Ren Shaofang, Zheng Xiangmin. 2015. Chroma characteristics of the Zhoujiashan Xiashu loess profile in Nanjing and its significance. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 35(5): 143~151 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tungsheng, An Zhisheng, Zheng Honghan. 1985. *Loess and the Environment*. Beijing: Science Press.
- Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng, Ding Zhongli, Chen Fahu, Begét J E. 2007a. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese Loess. *Quaternary Sciences*, 27(2): 210~220 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Xia Dunsheng, Paul H, Chlachula J, Wang Guan. 2007b. Analysis on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility under redox conditions of Siberia and Chinese loess. *Science in China(Series D)*, 37(10): 1382~1391 (in Chinese with English abstract).
- Pavlinov B H, Yu Pixiu, Shi Shimin, Liu Minhou, Liu Xin, Chang Chengfa, Ma Wanjun. 1956. Genesis of loess in China. *Chinese Science Bulletin*, 1(11): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Shanwen, Xia Yumei, Li Fenghua, Sui Xiulan, Li Shupe. 1984. Mid-quaternary paleogeography of Songliao plain of China. *Chinese Science Bulletin*, 29: 172~174 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Shanwen, Xia Yumei, Wang Peifang, Li Fenghua. 1988. Pleistocene stratigraphy and sedimentary environment in Songliao Plain of China. *Science in China(Series B)*, 4: 431~441 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Shanwen, Wang Xikui, Zhang Shuqin, Lian Yi, Zhang Zhenqin, Zhu Jinhua. 2012. The evolution of the large paleolake in Songliao Plain and its formation. *Quaternary Sciences*, 32: 1011~1021 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jiansheng, Shi Yingchun, Ye Hao, Sun Yanmin. 2002. Indication significance of "High-temperature loess on Ignition" in loess accumulation sequence to palaeoclimate evolution. *Geography and Territorial Research*, 18(4): 104~106 (in Chinese with English abstract).
- Sui Yuzhu. 2006. Study on environmental signification of main indexes of loess. *Journal of Desert Research*, 26(1): 14~19 (in Chinese with English abstract).

- Sun Jianzhong, Wang Yuzhuo, Zhang Qingyun. 1982. Various geochronology of quaternary stratigraphy in Songliao Plain. *Journal of Xi'an Institute of Geology*, (2): 79~91+10 (in Chinese with English abstract).
- Sun Youbin, He Liu, Liang Lianji, An Zhisheng. 2011. Changing color of Chinese loess; geochemical constraint and paleoclimatic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6): 1131~1138.
- Vodyanitskii Y N, Kirillova N P. 2016. Application of the CIE-L* a* b* system to characterize soil color. *Eurasian Soil Science*, 49(11): 1259~1268.
- Wang Haiyan, Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhou Yali, Zha Xiaochun, Zhang Wentong. 2017. Chroma characteristics and paleoclimatic reconstruction of the loess-paleosol profile at Tuojiawan in Yunxi Country, Hubei Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(2): 151~156 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiaxin, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Wu Peng, Wei Zhenyu, Sun Lei. 2020. The indication of the heavy mineral characteristics of the core in Harbin Huangshan to the Quaternary drainage evolution of Songhua river. *Quaternary Sciences*, 40(1): 79~94 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiansuo, Song Yougui, Zhao Zhijun, Li Jijun. 2016. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last Glacial-interglacial cycle. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 132~138.
- Wang Yong, Dong Jin, Yang Jinsong. 2020. Quaternary stratigraphy of the Huangshan section in Harbin. *Earth Science*, 45(7): 2662~2672 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chuanyi, Li Changan, Kang Chunguo, Chang Guorui. 2015. Grain-size characteristics and genesis of the Huangshan loess in Songnen plain area. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(12): 1945~1954 (in Chinese with English abstract).
- Wei Qi. 1979. The stratigraphy and the age of the Huangshan in Harbin. *Acta Stratigraphica Sinica*, 3(3): 208~213 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhenyu, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Wu Peng, Wang Jiaxin, Zhang Man, Zhang Yuexin, Liu Lu. 2020. The inversion of the Songhua River system in the Early Pleistocene: implications from Sr-Nd isotopic composition in the Harbin Huangshan cores. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(6): 1192~1203 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jian, Shen Ji. 2009. Paleoenvironmental and paleoclimatic changes reflected by diffuse reflectance spectroscopy and magnetic susceptibility from Xingkai lake sediments. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 29(3): 123~131 (in Chinese with English abstract).
- Wu Peng, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Wei Zhenyu, Sun Lei, Wang Jiaxin. 2020. The genesis of Huangshan loess in Harbin: integrated evidence from grain-size, geochemistry, magnetization, sedimentation and landform. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(3): 420~430 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xihao, Pu Qingyu, Qian Fang, Sun Jianzhong, Wang Yuzhuo, Zhou Yajie, Chen Shuhan, Zhang Qingyun, Zhao Guobin, He Zhongyu, Yu Hengyi, Tong Shugang, Gao Zhencao, Wang Wen. 1984. Preliminary study on the Quaternary magnetostratigraphy of the Songliao plain in north-east China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 4(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanhong, Li Shijie. 2004. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation. *Advances in Earth Science*, 19(5): 789~792 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yumei, Wang Peifang, Wang Manhua. 1983. Preliminary research on spore-pollen association of the section of Huang Shan in Harbin. *Scientia Geographica Sinica*, 3(2): 183~187+192 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yumei, Wang Peifang. 1984. The features of the spore-pollen assemblage and its geological significance in cave deposits in Antu county, Jinlin Province. *Geological Review*, 30(2): 187~189 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuanyun, Kang Chunguo, Chi Yunping, Du Huirong, Wang Jiaxin, Sun Lei. 2019. The loess deposits in northeast China: the linkage of loess accumulation and geomorphic-climatic features at the easternmost edge of the Eurasian loess belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103914.
- Xie Yuanyun, Liu Lu, Kang Chunguo, Chi Yunping. 2020. Sr-Nd isotopic characteristics of the northeast sandy land, China and their implications for tracing sources of regional dust. *Catena*, 184: 104303.
- Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, An Zhisheng, Chen Shiyue, Fukusawa H. 2001a. Studies on the quantitative and semiquantitative relationship between the color of topsoil and climate. *Science in China (Series D)*, 31(S1): 175~181 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, An Zhisheng, Chen Shiyue, Fukusawa H. 2001b. Transformation functions of soil color and climate. *Science in China (Series D)*, 44 (Suppl): 218~226.
- Yang Shengli, Ding Zhongli. 2003. Color reflectance of Chinese loess and its implications for climate gradient changes during the last two Glacial-interglacial cycles. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2058.
- Ye Qixiao. 1991. Quaternary system in Harbin area. *Heilongjiang Geology*, 2(2): 17~29 (in Chinese with English abstract).
- Ye Wei. 2001. The characteristics of Deposited Loess and Ancient Climate in Westerly Region of Xinjiang. Beijing: Ocean Press (in Chinese).
- Zhan Tao, Zeng Fangming, Xie Yuanyun, Yang Ye, Ma Yongfa, Ge Junyi, Yi Liang, Chi Yunping, Kang Chunguo, Jiang Xia, Zhang Jun, Lou Benjun, Zhou Xin, Deng Chenglong. 2018. Grain-size characteristics of Tianhengshan core and their indications for stratigraphic division in the eastern part of the northeast plain of China. *Journal of Geomechanics*, 24(4): 515~521 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Tao, Zeng Fangming, Xie Yuanyun, Yang Ye, Ge Junyi, Ma Yongfa, Chi Yunping, Kang Chunguo, Jiang Xia, Yu Zhongyuan, Zhang Jun, Li E, Zhou Xin. 2019. Magnetostratigraphic dating of a drill core from the northeast plain of China: implications for the evolution of Songnen paleo-lake. *Chinese Science Bulletin*, 64(11): 1179~1190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xinrong, Ping Shuaifei, Jiao Jieyu, Liu Enhao. 2020. Characteristics of magnetic susceptibility, grain-size and chromaticity of modern sediments in the southern margin of Songnen plain and their paleoclimate environment significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(2): 465~479 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuexin, Chi Yunping, Xie Yuanyun, Wu Peng, Wei Zhenyu, Zhang Man, Liu Lu. 2020. Organic carbon isotope composition of Harbin loess since the Mid-Pleistocene and its paleoclimatic significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(4): 525~534.
- Zhu Rixiang, Kazansky A, Matasova G, Guo Bin, Zykhina V, Petrovsky E, Jordanova N. 2000. The magnetic properties of the loess deposits in southern Siberia. *Chinese Science Bulletin*, 45(11): 1200~1205 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 曹振, 朱晓东. 2014. 东北地区中、东部黄土成因初步研究. *长春师范学院学报: 自然科学版*, (2): 85~89.
- 陈杰, 杨太保, 曾彪, 何毅, 冀琴. 2018. 中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义. *沉积学报*, 36(2): 333~342.
- 陈忠, 马海州, 曹广超, 张西营, 周笃珺, 姚远, 高章洪, 谭红兵. 2007. 尔海地区晚冰期以来沉积记录的气候环境演变. *海洋地质与第四纪地质*, 27(1): 131~138.

- 初本君,高振操,杨世生,席小华.1988.松嫩平原第四纪磁性地层的初步划分.海洋地质与第四纪地质,8(4):91~96.
- 邓成龙,刘青松,潘永信,朱日祥.2007.中国黄土环境磁学.第四纪研究,27(2):193~209.
- 丁敏,庞奖励,黄春长,彭淑贞,杨炯,陈栋栋.2010.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.陕西师范大学学报:自然科学版,38(5):92~97.
- 杜慧荣,谢远云,康春国,迟云平,王嘉新,孙磊.2020.哈尔滨黄土的粒度与地球化学特征及其对粉尘物源的指示.中国沙漠,40(1):64~76.
- 高鹏坤,庞奖励,黄春长,周亚利,卞鸿雁,王蕾彬,王学佳.2015.陕南丹凤茶房村黄土—古土壤剖面色度参数特征.沉积学报,33(3):537~542.
- 何柳,孙有斌,安芷生.2010.中国黄土颜色变化的控制因素和古气候意义.地球化学,39(5):447~455.
- 柯夫达.1998.土壤学原理.北京:科学出版社.
- 李新新,宋友桂.2014.伊犁尼勒克剖面烧失量变化特征及影响因素.海洋地质与第四纪地质,34(5):127~135.
- 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.地球环境学报,5(2):67~75.
- 刘冬雁,李巍然,彭莎莎,王玲.2010.粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状.中国海洋大学学报:自然科学版,40(2):79~84.
- 刘峰,王昊,秦艺帆,任少芳,郑祥民.2015.南京周家山下蜀黄土色度特征及其意义.海洋地质与第四纪地质,35(5):143~151.
- 刘东生,安芷生,郑洪汉.1985.黄土与环境.北京:科学出版社.
- 刘秀铭,夏敦胜,刘东生,丁仲礼,陈发虎,Begét J E.2007a.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.第四纪研究,27(2):210~220.
- 刘秀铭,刘东生,夏敦胜,Paul H,Chlachula J,王冠.2007b.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.中国科学D辑地球科学,37(10):1382~1391.
- 帕夫林诺夫B H,于丕休,石世民,刘敏厚,刘鑫,常承法,马万钧.1956.关于中国黄土的成因问题.科学通报,1(11):1~15.
- 裘善文,夏玉梅,李风华,隋秀兰,李树培.1984.松辽平原第四纪中期古地理研究.科学通报,29:172~174.
- 裘善文,夏玉梅,汪佩芳,李风华.1988.松辽平原更新世地层及其沉积环境的研究.中国科学(B辑),4:431~441.
- 裘善文,王锡魁,张淑芹,廉毅,张振卿,朱金花.2012.松辽平原古大湖演变及其平原的形成.第四纪研究,32:1011~1021.
- 石建省,石迎春,叶浩,孙彦敏.2002.黄土堆积序列“高温烧失量”指标对古气候演化的指示意义.地理学与国土研究,18(4):104~106.
- 隋玉柱.2006.黄土不同指标的古环境意义探讨.中国沙漠,26(1):14~19.
- 孙建中,王雨灼,张庆云.1982.松辽平原第四纪地层的划分——几种年代学方法的应用.长安大学学报:地球科学版,(2):79~91+10.
- 王海燕,庞奖励,黄春长,周亚利,查小春,张文桐.2017.鄯西县庾家湾黄土剖面色度参数特征及其古气候重建.水土保持学报,31(2):151~156.
- 王嘉新,谢远云,康春国,迟云平,吴鹏,魏振宇,孙磊.2020.哈尔滨荒山岩芯重矿物特征对松花江第四纪水系演化的指示.第四纪研究,40(1):79~94.
- 王永,董进,杨劲松.2020.哈尔滨荒山剖面第四纪地层研究.地球科学,45(7):2662~2672.
- 魏传义,李长安,康春国,常国瑞.2015.哈尔滨黄山黄土粒度特征及其对成因的指示.地球科学——中国地质大学学报,40(12):1945~1954.
- 卫奇.1979.哈尔滨黄山地层的时代.地层学杂志,3(3):208~213.
- 魏振宇,谢远云,康春国,迟云平,吴鹏,王嘉新,张曼,张月馨,刘璐.2020.早更新世松花江水系反转——来自荒山岩芯Sr-Nd同位素特征指示.沉积学报,38(6):1192~1203.
- 吴健,沈吉.2009.兴凯湖沉积物磁化率和色度反映的28 kaBP以来区域古气候环境演化.海洋地质与第四纪地质,29(3):123~131.
- 吴鹏,谢远云,康春国,迟云平,魏振宇,孙磊,王嘉新.2020.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.地球学报,41(3):420~430.
- 吴锡浩,浦庆余,钱方,孙建中,王雨灼,周亚杰,陈树汉,张庆云,赵国斌,何仲玉,于恒义,童书纲,高振操,王文.1984.松辽平原第四纪磁性地层的初步研究.海洋地质与第四纪地质,4(2):1~13.
- 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.地球科学进展,19(5):789~792.
- 夏玉梅,汪佩芳,王曼华.1983.哈尔滨荒山剖面孢粉组合的初步研究.地理科学,3(2):183~187+192.
- 夏玉梅,汪佩芳.1984.吉林省安图洞穴堆积的孢粉组合特征及其地质意义.地质论评,30(2):187~189.
- 杨胜利,方小敏,李吉均,安芷生,陈诗越,福泽仁之.2001.表土颜色和气候定性至半定量关系研究.中国科学(D辑),31(S1):175~181.
- 叶启晓.1991.哈尔滨地区第四系.黑龙江地质,2(2):17~29.
- 叶玮.2001.新疆西风区黄土沉积特征与古气候.北京:海洋出版社.
- 詹涛,曾方明,谢远云,杨业,马永法,葛俊逸,易亮,迟云平,康春国,姜侠,张俊,娄本军,周鑫,邓成龙.2018.东北平原东部天恒山钻孔的粒度特征及其对地层划分的指示.地质力学学报,24(4):515~521.
- 詹涛,曾方明,谢远云,杨业,葛俊逸,马永法,迟云平,康春国,姜侠,余中元,张俊,李峨,周鑫.2019.东北平原钻孔的磁性地层定年及松嫩古湖演化.科学通报,64(11):1179~1190.
- 张新荣,平帅飞,焦钰钰,刘恩豪.2020.松嫩平原南缘现代沉积物磁化率、粒度、色度特征及古气候环境意义.吉林大学学报(地球科学版),50(2):465~479.
- 张月馨,迟云平,谢远云,康春国,吴鹏,魏振宇,张曼,刘璐.2020.中更新世以来哈尔滨黄土有机碳同位素组成及其古气候意义.地球学报,41(4):525~534.
- 朱日祥,Kazansky A,Matasova G,郭斌,Zykina V,Petrovsky E,Jordanova N.2000.西伯利亚南部黄土沉积物的磁学性质.科学通报,45(11):1200~1205.

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

MA Yongfa^{1, 2)}, ZHAN Tao^{*1)}, YANG Ye¹⁾, YANG Huili³⁾, LIU Jinfeng³⁾, LIANG Yanxia¹⁾, HUANG Rongfu¹⁾, ZHANG Jun¹⁾

1) General Institute of Ecological Geology Survey and Research of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2) China University of Geosciences (Wuhan), Hubei, Wuhan 430074, China;

3) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

* Corresponding author: hljzhantao@163.com

Abstract

The study of the chroma on the Huangshan (HS) Profile in the eastern part of the Northeast China Plain, a typical Quaternary Profile in Northeast China, has not yet been reported. Through study of the high resolution chroma parameters of the Harbin Formation loess-paleosol in the Tianhengshan core, correlation analysis was carried out with ignition loss, and was compared with the curve of magnetic susceptibility and grain size. The results show that lightness L^* was dominated by the content of organic matter mainly. Largely influenced by the categories and contents of iron oxide and correspond well with magnetic susceptibility, yellowness b^* could indirectly reflect the climate change and pedogenic environment in this region. At the same time, yellowness b^* was dominated by the content of organic matter. Redness a^* and yellowness b^* were controlled by the similar climatic factors and might process the consistent color material because of some correlation. Lightness L^* , yellowness b^* , a^*/b^* could be used as good indicators of climatic change. Only by using the combination between chromatic proxies, magnetic susceptibility and grain size, we could reconstruct a reasonable reliable process of climate change and the evolution history of paleoclimate environment in the eastern part of the Northeast China Plain since Middle-late Pleistocene. Considering the 28.3 m of Tianhengshan core as the boundary, redness a^* and yellowness b^* were obviously changed. It reflects the significant change of sedimentary environment, maybe indicate that Songnen paleo-lake disappeared at 476 ka.

Key words: chroma; loess-paleosol; climate change; the evolution of Songnen paleo-lake; the Northeast China Plain