



黑龙江密山黑土剖面记录的全新世以来的气候变化

张洪文^{1,2}, 吕祥熙^{1,2}, 孙艳秋³, 赵建^{1,2}, 邵吉亮^{1,2}, 王刚^{1,2},
韩科胤^{1,2}, 闫岩^{1,2}, 郑一阳^{1,2}

1. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江牡丹江 157021;

2. 呼伦贝尔黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 内蒙古呼伦贝尔 021599;

3. 牡丹江市第二高级中学, 黑龙江牡丹江 157021

摘要: 对密山黑土剖面(0~1.42 m)开展年代学、磁化率、粒度和元素地球化学研究, 结果表明, 密山市黑土剖面沉积物以粉砂为主, 占比约 70%; 年龄曲线显示密山市黑土的沉积速率为 9.62 cm/ka。元素地球化学数据显示, 密山黑土剖面的主要常量元素组合特征与其他典型风成堆积物相似, 上部陆壳(UCC)标准化曲线的变化趋势基本一致, 表明密山黑土成土母质可能为风成成因。多指标综合分析表明, 密山黑土剖面自全新世以来的气候变化经历了 3 个阶段: 早全新世的升温变暖、中全新世的温暖湿润和晚全新世降温变凉。

关键词: 地质年代学; 磁化率; 元素地球化学; 气候变化; 黑土剖面; 黑龙江省

Climate change since Holocene recorded in Mishan black soil profile of Heilongjiang Province

ZHANG Hong-wen^{1,2}, LYU Xiang-xi^{1,2}, SUN Yan-qiu³, ZHAO Jian^{1,2}, SHAO Ji-liang^{1,2}, WANG Gang^{1,2},
HAN Ke-yin^{1,2}, YAN Yan^{1,2}, ZHENG Yi-yang^{1,2}

1. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China;

2. Hulun Buir Field Scientific Observation and Research Station for Black Earth Key Belt, Hulun Buir 021599, Inner Mongolia, China;

3. Mudanjiang No. 2 Senior High School, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

Abstract: The paper studies the geochronology, magnetic susceptibility, particle size and element geochemistry of black soil profile (0–1.42 m) in Mishan City. The results show that the sediments of black soil profile are mainly silt, accounting for about 70%, and the deposition rate of black soil is 9.62 cm/ka according to the age curve. The element geochemical data reveals that the major element combination characteristics of Mishan black soil profile are similar to those of other typical eolian deposits, and the change trend of UCC-normalized curves is basically the same, indicating

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-10-26. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“三江平原宝清湿地退化区 1:5 万地表基质调查”(DD20242039)、“三江平原桦南-虎林地区黑土地地表基质调查”(ZD20220859)、“基于遥感大数据的三江平原黑土区退耕还湿潜力研究”(QCJJ2023-36).

作者简介: 张洪文(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事自然资源调查及区域地质矿产调查研究工作, 通信地址 吉林省长春市北湖科技开发区光机路 4855 号, E-mail//524725538@qq.com

通信作者: 赵建(1990—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查工作, 通信地址 吉林省长春市北湖科技开发区光机路 4855 号, E-mail//1304531001@qq.com

引用格式: 张洪文, 吕祥熙, 孙艳秋, 赵建, 邵吉亮, 王刚, 韩科胤, 闫岩, 郑一阳. 黑龙江密山黑土剖面记录的全新世以来的气候变化[J]. 地质与资源, 2025, 34(1): 11-20.

Zhang H W, Lyu X X, Sun Y Q, Zhao J, Shao J L, Wang G, Han K Y, Yan Y, Zheng Y Y. Climate change since Holocene recorded in Mishan black soil profile of Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2025, 34(1): 11-20.

the parent material of Mishan black soil may be of aeolian origin. The multi-index comprehensive analysis shows that the climate change of Mishan black soil profile since Holocene has experienced three stages, i.e. temperature rising in the Early Holocene, warm and humid in the Middle Holocene and cooling down in the Late Holocene.

Key words: geochronology; magnetic susceptibility; elemental geochemistry; climate change; black soil profile; Heilongjiang Province

0 引言

近年来,有关风成黄土-古土壤沉积物的成因、物源、分布特征以及新构造运动、东亚季风演化、气候干旱化进程等重大古环境变化时间的研究,为构筑全球第四纪气候演化框架提供了关键的证据^[1-4],但对于与黑土有关的古气候及古环境变化的相关研究较少^[5].黑土广泛分布在中国东北地区,具有养分含量丰富、结构良好、土壤肥力高等优势,在全球农业生产发展中起着重要作用,素有“土中之王”的美称,其生产力及其影响因素备受全球学者的关注^[6].土壤是陆地生态系统的最重要的构成部分,起着重要的调节作用^[7].

元素地球化学、粒度、磁化率等指标是研究黑土记录的古气候变化的重要替代指标^[8-17].为探讨兴凯湖平原黑土的形成和演化过程,本文以黑龙江省密山市典型黑土剖面为研究对象,利用剖面年代学、粒度、磁化率、元素地球化学组合分析方法,恢复密山地区全新世以来的气候变化,探讨兴凯湖平原典型黑土形成时

的古气候环境,以期为黑土的保护和修复提供科学依据.

1 剖面概况

典型黑土剖面位于兴凯湖平原南部地区,密山市中部,兴凯湖北侧,行政区域为鸡西市,全区多分布丘陵及平原,地貌特征为“三山二水五分田”.区内属寒温带大陆性季风气候,四季气候变化明显.冬季漫长,严寒有雪;夏季短促,温热多雨.年降水量约566.2 mm,降水大部分集中在6—8月,11月至翌年4月为冻结期.

密山黑土剖面 MSD1601 位于密山市中部,兴凯湖北侧(图1),地理位置 132°17'46.61"E,45°24'02.06"N,海拔 80.2 m,为人工挖掘的垂直剖面,总深 142 cm,未见基岩,上部有明显的黑土层(0~45 cm).基于对剖面的野外观察分析,结合沉积物岩性特征,将密山黑土剖面从上到下划分了3层(见表1).自下而上按照 3.5 cm 间距采取了磁化率、粒度分析、元素地球化学样品共

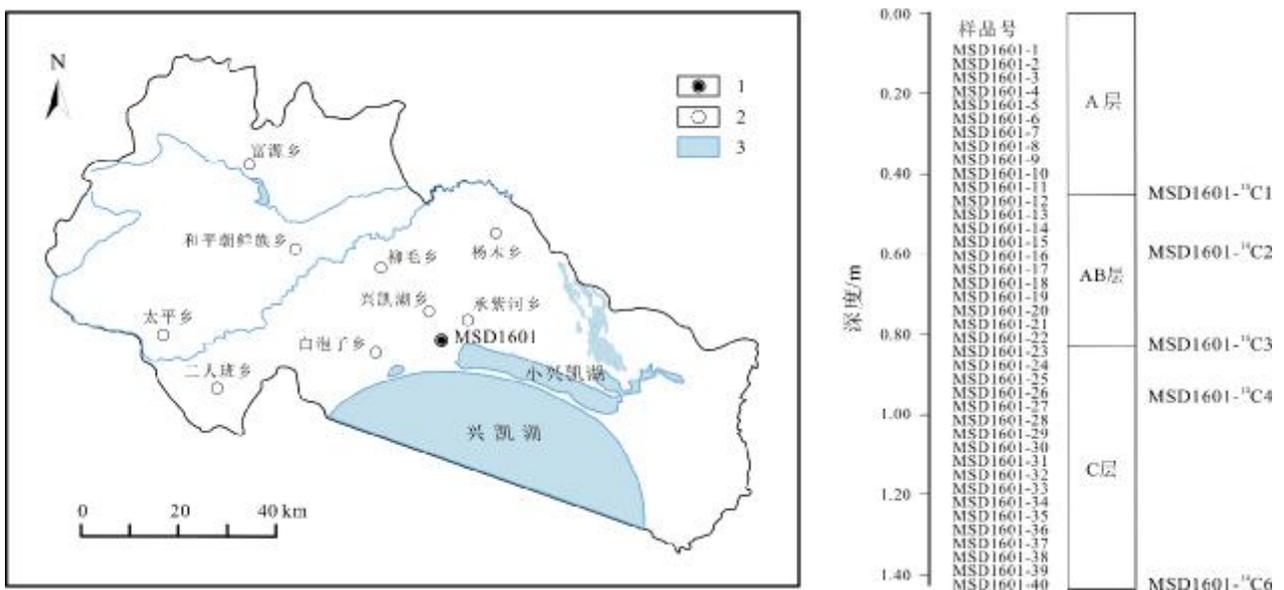


图1 密山黑土剖面位置及采样位置图

Fig. 1 Mishan black soil profile and sampling location map
1—剖面位置(profile location); 2—乡镇(rural town); 3—湖泊(lake)

40 组; 在 0.45、0.60、0.83、0.96、1.42 m 共采集 5 件 AMS ^{14}C 样品(图 1)。

2 研究方法

2.1 年代学

根据密山黑土剖面深度与岩性的变化关系, 本次在剖面上共采集 5 个 AMS ^{14}C 样品, 由中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试。主要测试仪器为加速器质谱仪(NEC 1.5SDH-1), 测量时 ^{14}C 半衰期为 5 568 a, 年龄校正使用国际上通用的 CALIB7.0.4 版本, 转换为 BP (BP=AD 1950) 年代^[18]。

2.2 磁化率

磁化率样品在自然状态下风干并轻轻磨碎, 过 2 mm 标准筛去除砾石、植物根系和其他生物残体。磁化率测量仪器为英国 Bartington 生产的 MS-2 型磁化率仪。室温下分别测得低频(470 Hz)磁化率(χ_{lf})和高频(4 700 Hz)磁化率(χ_{hf}), 并计算频率磁化率(χ_{fd})和频率磁化率的百分比, 每个样品测量不少于 3 次, 然后取其平均值作为最后测量结果。

2.3 粒度

粒度的前处理和测量工作在黑龙江地质矿产研究中心完成。测量仪器为 Battersize3000/28-2 型激光粒度仪, 仪器测量范围 0.01~3 500 μm 。将自然风干的样

品过 20 目分样筛, 均匀混合过筛后的样品, 取 1 g 左右, 加入双氧水去除有机质, 待充分反应后, 加入蒸馏水, 静置 12 h, 抽取上层液体, 加入六偏磷酸钠分散剂, 在震荡仪中震荡过后, 在激光粒度仪上进行粒度测试。准确性误差小于或等于 0.5%, 重复测量的相对误差小于 0.5%。

2.4 地球化学元素

样品测试由中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心实验室完成。测量前将样品在室内自然风干, 并研磨成粉末后过 200 目筛, 称取样品 4 g 左右。采用半自动压样机, 将其压制成为以聚乙烯粉末镶边衬底直径 4 cm 的饼状测量圆片。样品的元素含量采用荷兰帕纳科(PANalytical)公司生产的 PW4400 型 X 射线荧光光谱仪进行测量。该仪器对同一样品测量标准差控制在 2% 以内, 测量过程中加入标准样品进行测试质量的控制。常量元素以氧化物形式给出, 单位为%; 其他元素以单独的元素形式给出, 单位为 10^{-6} 。

3 结果与分析

3.1 年代学分析

密山黑土剖面的 5 个 AMS ^{14}C 日历年龄随深度增加而增大(表 2), 符合沉积地层学原理: 由下到上, 由老到新。经处理得出年代与剖面深度的回归方程式为

表 1 密山黑土土壤剖面描述

Table 1 Description of Mishan black soil profile

距表层深度/cm	分层情况	详细描述
0~45	A(黑土层)	黑色黏土, 团粒结构, 略为湿润, 紧实, 可见大量根系
45~83	AB	灰黑色-灰褐色黏土, 团粒结构, 略为湿润, 略为紧实, 未见根系
83~142	C	黄褐色黏土, 团块结构, 湿润, 紧实, 未见根系

表 2 密山黑土土壤剖面 ^{14}C 测年数据

Table 2 ^{14}C dating data of Mishan black soil profile

样品编号	实验室编号	深度/m	测年材料	年龄/a	校正年龄/cal.a
MSD1601- ^{14}C 1	22110213OCSP	0.45	有机碳	3780±30	4127±118
MSD1601- ^{14}C 2	22110214OCSP	0.60	有机碳	4675±30	5447±126
MSD1601- ^{14}C 3	22110215OCSP	0.83	有机碳	8150±50	9139±147
MSD1601- ^{14}C 4	22110216OCSP	0.96	有机碳	8305±50	9290±154
MSD1601- ^{14}C 5	22110218OCSP	1.42	有机碳	12130±80	13969±214

测试单位: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所。* 运用样品相对于现代(1950 年)大气 ^{14}C 活度的分数(FM)和半衰期 5 568 a 计算的传统 ^{14}C 年龄; # 树轮校正的 ^{14}C 年龄。

$y=10.18708x-0.28339$ (y 为 ^{14}C 年龄, x 为黑土剖面的深度), 相关系数 $R^2=0.97981$, 相关性很好(图 2). 运用线性内插和外推的计算方法, 最终获得研究区黑土剖

面的年代框架, 通过计算可知该剖面记录了黑龙江密山地区近 14 ka 以来的沉积环境和气候变化.

3.2 剖面磁化率特征

密山黑土剖面低频磁化率的变化范围为 $9.54 \times 10^{-8} \sim 17.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值为 $10.87 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 高频磁化率变化范围为 $9.39 \times 10^{-8} \sim 17.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值为 $10.68 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 频率磁化率变化范围为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 0.83 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值 $0.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 频率磁化率百分比平均值为 1.74%, 最低 0.1%, 最高 4.61%. 低频磁化率可反映物质被磁化的难易程度, 对其进行分析研究, 能够很好地还原古气候的变化. 密山黑土剖面磁化率曲线的变化趋势稳定, 没有剧烈的锯齿状波动出现(图 3).

3.3 剖面粒度特征

密山黑土剖面样品粒度结果表明, 样品中值粒径 (Md) 为 $6.47 \sim 16.56 \mu\text{m}$ (图 3), 平均值为 $8.66 \mu\text{m}$; 小于 $4 \mu\text{m}$ 颗粒含量为 13.75%~35.49%, 平均值为

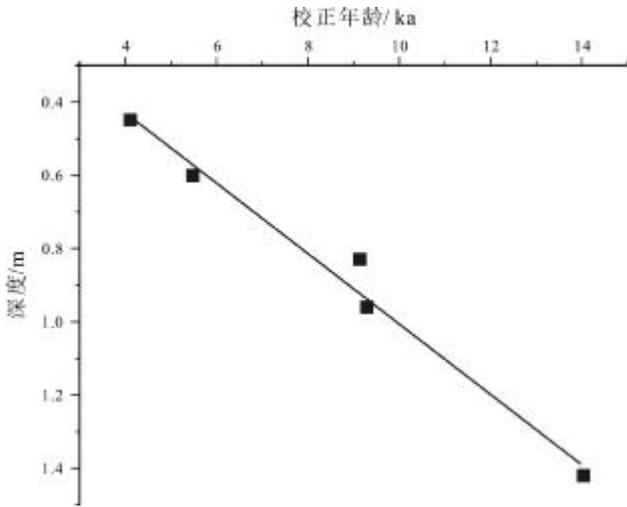


图 2 密山地区黑土剖面深度-年龄关系图

Fig. 2 Depth-age relationship of Mishan black soil profile

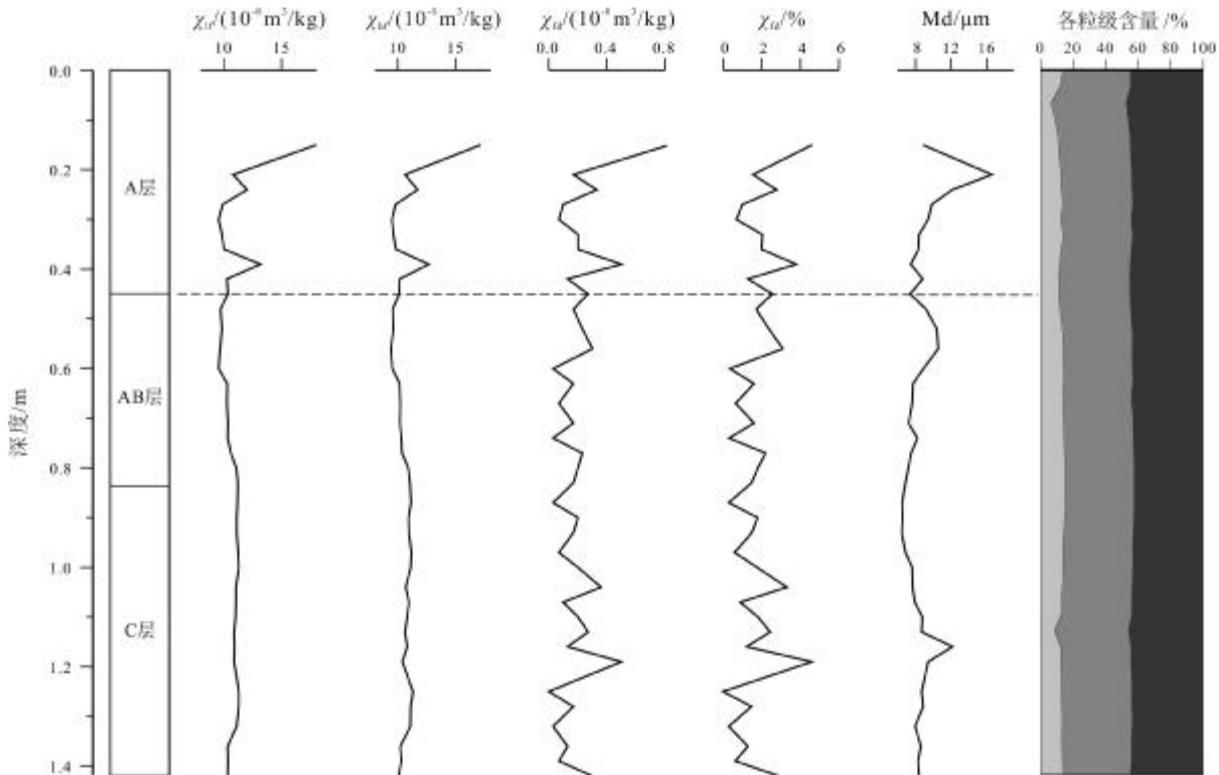


图 3 密山黑土剖面磁化率、粒度曲线图

Fig. 3 Magnetic susceptibility and grain size curves of Mishan black soil profile

1—黏粒(clay grain); 2—粉砂粒(silt grain); 3—砂粒(sand grain)

28.87%; 4~63 μm 颗粒含量为 62.78%~83.55%, 平均值为 69.21%; 大于 63 μm 颗粒含量为 0.23%~7.16%, 平均值为 1.89%. 粒度以 4~63 μm 颗粒为主, 含量约为 70%. 按照三角粒度相组成图, 可以判断密山剖面的粒径范围主要集中在粉砂粒级范围内, 占比达到 70%, 砂粒和黏粒相对占比较少(图 4). 粒度组成可以追溯沉积物形成的物质来源, 恢复其沉积环境. 这可能是因为其位于完达山脉东缘地带, 粒度较粗反映出此地区物源的近源属性^[18].

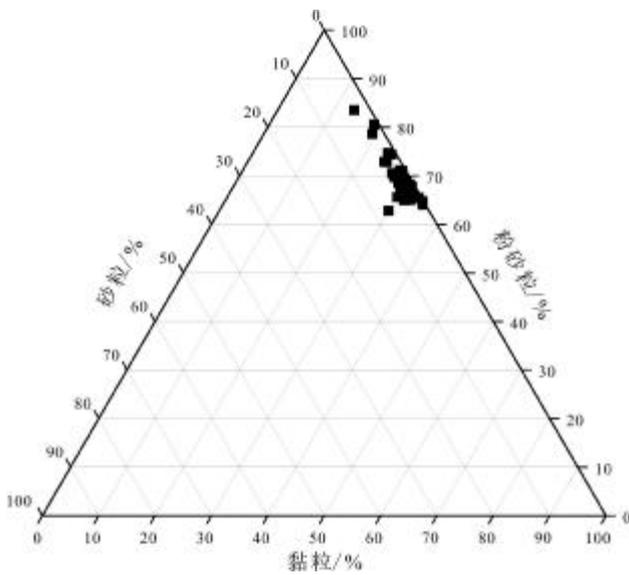


图 4 密山黑土剖面粒度三角相图

Fig. 4 Grain size distribution of Mishan black soil profile in clay-silt-sand triangle diagram

3.4 剖面地球化学特征

本次研究在密山黑土剖面所取得的常量地球化学元素数据平均值与上部陆壳(UCC)、哈尔滨黄土^[19]、洛川黄土^[20]及海伦黑土^[21]的常量元素平均组成进行对比分析(表 3), 表明密山黑土剖面与典型风成堆积物的常量元素具有良好的相似性, 说明密山黑土的成土母质可能为风成成因. 通过对比密山黑土剖面与哈尔滨荒山黄土、洛川黄土、海伦黑土的典型风成堆积物常量元素 UCC 标准化曲线可知, 密山黑土剖面与典型风成堆积物的化学成分基本相同, UCC 标准化曲线趋势基本一致, 显示 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 UCC 值基本相等, MgO 表现为弱亏损, Na_2O 和 CaO 表现为强亏损(图 5), 说明其成因相似, 为风成成因. 但也有差异性, 可能是沉积环境的差异改变了沉积物的化学组成.

表 3 密山黑土剖面样品和其他典型风成堆积物的常量元素含量

Table 3 Contents of major elements in Mishan black soil profile and other typical aeolian deposits

剖面名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
密山黑土剖面	66.20	14.42	6.77	2.30	0.98	1.12	1.24
洛川黄土	66.40	14.20	4.81	3.01	1.61	2.29	1.02
荒山黄土	60.85	19.47	4.22	3.00	1.84	1.88	0.87
海伦黑土	66.05	14.67	5.10	2.56	1.75	1.40	1.33
UCC	66.00	15.20	5.00	3.40	3.90	2.20	4.20

含量单位: %.

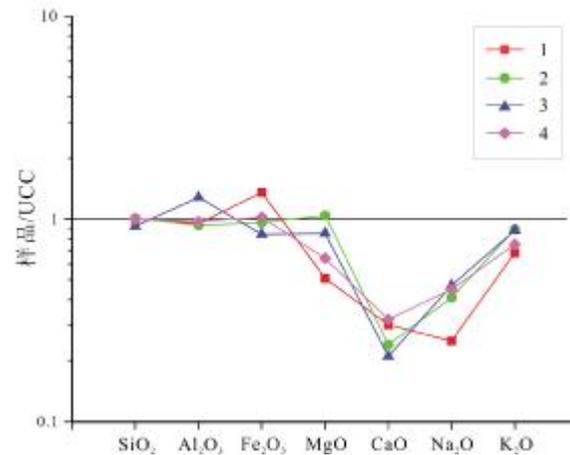


图 5 密山黑土剖面与其他风成堆积物常量元素的 UCC 标准化曲线对比图

Fig. 5 Comparison of UCC-normalized major element curves between Mishan black soil profile and other aeolian deposits
1—密山黑土剖面 (Mishan black soil profile); 2—洛川黄土 (Luochuan loess); 3—荒山黄土 (Huangshan loess); 4—海伦黑土 (Hailun black soil)

4 讨论

4.1 密山黑土剖面记录的全新世以来的气候变化

磁化率是沉积物的重要物理特征之一, 是衡量物质磁化后产生磁化强度大小的量^[22], 也是反映古气候变化的良好指标^[23-24]. 粒度可指示东亚冬季风和夏季风的变化, 是研究东亚季风的良好载体^[25]. 李拓宇等^[26]、王丰年等^[27]、李福春等^[28]通过对黄土剖面部分微量元素和磁化率对比分析, 发现 Rb/Sr 是良好的东亚季风强度衡量标准. 沉积物中的 Sr/Cu ^[29]、 Mg/Al ^[30] 和 Bc ^[31] (退碱指数) 等值也对判别古气候及环境有较

好的指示作用。

根据密山黑土剖面深度与磁化率、粒度、主量和微量元素(表4)综合参数曲线变化图(图6)显示,在垂向上不同元素之间比值的变化趋势与磁化率和中值粒径的变化趋势基本一致。密山黑土剖面记录的气候变化可分为晚更新世晚期、早全新世、中全新世、晚全新世4个阶段。

晚更新世晚期(14~11 ka):此阶段磁化率较低,总体变化趋势不大,中值粒径较大,代表此阶段风力较强; Sr/Cu 值大(平均值为 6.17>5), Mg/Al 值高, Bc 值指示气候总体为干燥, Mg/Sr 比值小, 指示温度较低。表明此阶段为东亚季风较盛行的冷干气候。

早全新世(11~7.5 ka):此阶段磁化率较小,总体变化趋势不明显,反映气候仍处于干冷状态。粒度曲线表明气候上较上一阶段有所好转。Sr/Cu 值较上一阶段变小,但平均值为 5.40>5, Mg/Al 值偏高, Bc 值指示气候总体较干燥, Rb/Sr 在 8~9 ka 有较大的波动,可能指示了 8.7~8.9 ka 的强低温时间^[7]。综上所述,此阶段密山地区气候仍较冷,但温度较上一阶段有所

升高。

中全新世(7.5~2.5 ka):此阶段磁化率较小,总体变化趋势不明显。Bc 值、Mg/Al 值逐渐减小到最小值,反映东亚夏季风的盛行,降水增加, Sr/Cu 平均是为 4.09<5,表明气候湿润, Mg/Sr 值在剖面中最大,指示温度最高。此阶段是冰后期气候最温暖的时期^[32],东亚夏季风盛行,气候温暖湿润,亦被称为大暖期。

晚全新世(2.5 ka 以后):此阶段磁化率和粒度曲线均有较大波动,且磁化率值和中值粒径是剖面中最大的,显示东亚季风的增强。Bc 值和 Mg/Al 值由最小值逐渐变大,但总体不大, Sr/Cu 平均值 3.49<5,反映气候更加湿润, Mg/Sr 值逐渐变小,指示温度的降低。此阶段降温变凉,但气候湿润。

综上所述,密山地区全新世气候主要经历了早期升温变暖,中期温暖湿润,后期降温变凉3个阶段,这与前人研究的冰芯、海洋、湖泊和石笋记录的全新世的气候变化趋势相一致^[33-35]。

4.2 密山地区黑土形成时代的确定及形成环境浅析

¹⁴C 测年的方法是目前测定 45 ka 以来最精准的

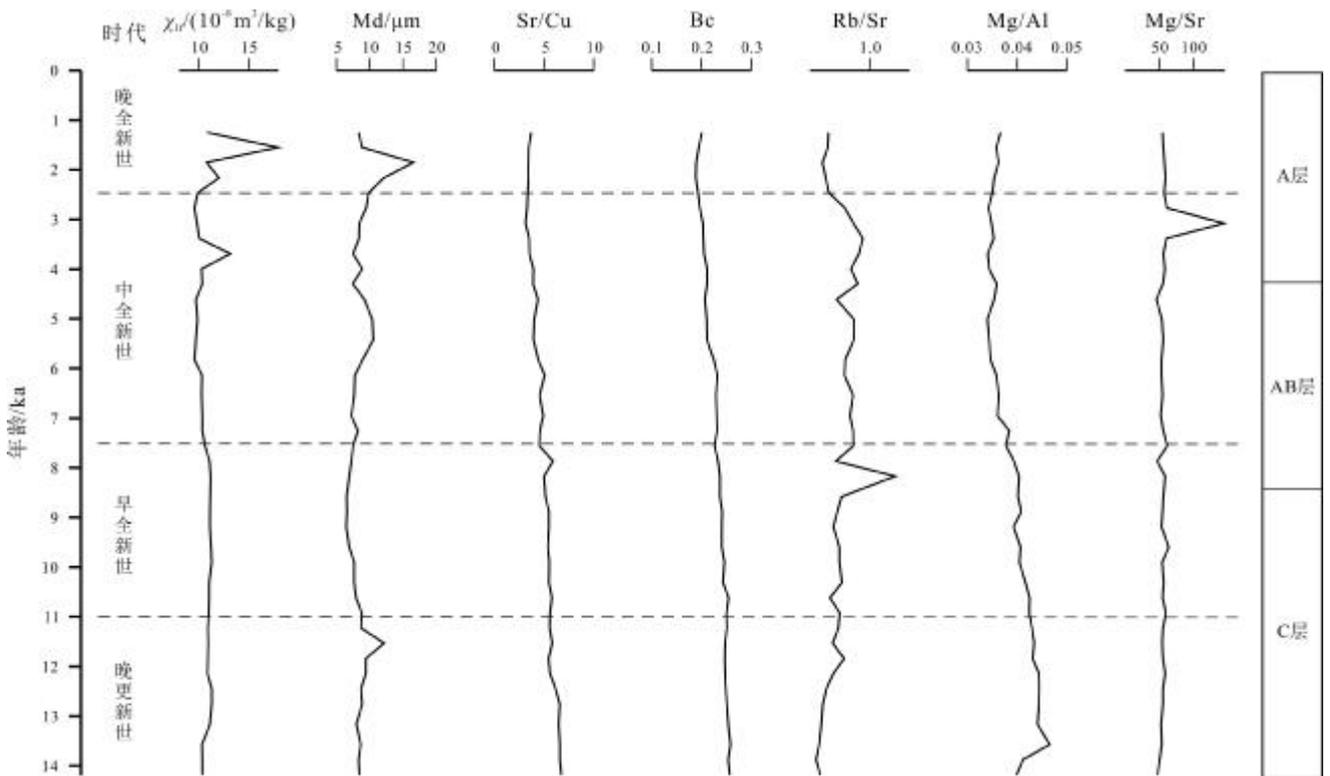


图6 密山黑土剖面综合参数曲线图

Fig. 6 Composite parameter curves of Mishan black soil profile

表 4 密山黑土剖面部分元素分析结果

Table 4 Element analysis results of Mishan black soil profile

样品号	深度/cm	主量元素含量/%				微量元素含量/ 10^{-6}		
		Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	Cu	Rb	Sr
MSPM1601-H1	0-15	15.1	1.10	0.91	2.11	32.9	97.0	122
MSPM1601-H2	15-18	14.8	1.06	0.85	2.03	33.1	90.9	115
MSPM1601-H3	18-21	14.9	1.08	0.83	2.00	33.3	87.2	114
MSPM1601-H4	21-24	15.1	1.07	0.81	2.03	31.5	84.9	109
MSPM1601-H5	24-27	15.0	1.05	0.83	2.06	32.9	88.5	111
MSPM1601-H6	27-30	15.1	1.04	0.83	2.15	31.1	89.8	103
MSPM1601-H7	30-33	15.1	1.06	0.84	2.23	14.0	40.6	44.2
MSPM1601-H8	33-36	15.0	1.06	0.84	2.23	30.0	102	105
MSPM1601-H9	36-39	14.9	1.02	0.85	2.21	31.3	105	111
MSPM1601-H10	39-42	15.0	1.03	0.88	2.28	27.1	97.3	107
MSPM1601-H11	42-45	14.9	1.07	0.88	2.27	29.8	110	117
MSPM1601-H12	45-48	15.1	1.07	0.87	2.25	32.1	117	141
MSPM1601-H13	48-52	15.0	1.02	0.87	2.28	28.5	106	115
MSPM1601-H14	52-56	15.0	1.03	0.87	2.28	28.4	103	112
MSPM1601-H15	56-60	14.7	1.02	0.96	2.35	26.2	101	116
MSPM1601-H16	60-63	14.7	1.05	0.96	2.44	23.5	104	119
MSPM1601-H17	63-67	14.7	1.07	0.96	2.41	25.7	108	118
MSPM1601-H18	67-71	14.5	1.04	0.98	2.37	24.6	109	121
MSPM1601-H19	71-74	14.4	1.11	0.95	2.38	26.1	110	120
MSPM1601-H20	74-77	14.6	1.10	0.94	2.38	24.0	99.9	109
MSPM1601-H21	77-80	14.5	1.14	0.98	2.39	24.9	122	147
MSPM1601-H22	80-83	14.2	1.15	0.97	2.39	23.8	134	119
MSPM1601-H23	83-87	14.2	1.14	1.00	2.39	24.1	106	124
MSPM1601-H24	87-90	14.1	1.16	1.03	2.38	23.3	107	128
MSPM1601-H25	90-93	14.2	1.12	1.02	2.41	23.0	103	126
MSPM1601-H26	93-97	14.1	1.15	1.02	2.39	20.2	92.2	109
MSPM1601-H27	97-100	14.1	1.14	1.04	2.42	22.8	107	126
MSPM1601-H28	100-104	14.2	1.18	1.02	2.41	23.1	109	127
MSPM1601-H29	104-107	14.0	1.19	1.15	2.41	22.6	105	130
MSPM1601-H30	107-110	14.0	1.19	1.09	2.41	21.5	103	121
MSPM1601-H31	110-113	13.9	1.20	1.08	2.41	23.5	111	131
MSPM1601-H32	113-116	13.9	1.21	1.07	2.36	23.0	109	134
MSPM1601-H33	116-119	14.1	1.21	1.07	2.40	24.1	115	132
MSPM1601-H34	119-122	13.9	1.23	1.08	2.36	22.7	104	128
MSPM1601-H35	122-125	13.5	1.20	1.09	2.28	21.2	103	131
MSPM1601-H36	125-128	13.6	1.21	1.12	2.30	20.1	101	132
MSPM1601-H37	128-132	13.6	1.20	1.12	2.33	21.3	105	138
MSPM1601-H38	132-136	13.3	1.24	1.19	2.24	21.0	104	139
MSPM1601-H39	136-139	13.7	1.13	1.16	2.31	20.4	98.2	134
MSPM1601-H40	139-142	14.0	1.12	1.18	2.41	21.3	108	143

定年技术^[35]. 黑土有机碳的稳定组分可以用于准确测定黑土的形成年龄. 当黑土层的土壤有机碳达到稳定状态后, 其稳定组分的¹⁴C年龄即为黑土的形成年龄. 然而, 黑土层中的部分有机碳在稳定状态后还可能受到更年轻的植物根系的影响, 这导致测定出的有机碳全样的¹⁴C年龄比实际土壤形成的年龄要年轻^[36]. 一般而言, 土壤有机碳的稳定组分比有机碳全样的年龄要老75~3 000 a^[37]. 因此, 本文黑土剖面¹⁴C测年结果用于限定黑土形成的最小年龄.

密山黑土剖面的年代与剖面深度的回归方程式为 $y=10.18708x-0.28339$, 通过计算可知密山黑土剖面的黑土层至少从4.3 ka开始形成(图6), 即中全新世晚期及晚全新世是区内黑土的形成时期; 黑土的沉积速率为9.62 cm/ka, 与三江平原的沉积速率(10 cm/ka)基本一致^[35].

密山黑土区处在半湿润温带季风气候向半干旱温带季风气候的过渡地带, 地貌上属于波状起伏的漫川漫岗地, 地形平缓, 坡度不大. 中全新世以来(图6), 夏季温暖湿润, 草原化草甸植被生长茂盛, 秋末气温剧降使植物枯死于地表, 冬季的低温使有机质不易分解, 为腐殖质的微生物成因提供了足够来源^[7]. 随着暖湿—冷干气候的交替变化, 有机质在土壤中大量沉积和保留, 形成暗色松软的土壤——黑土层.

通过对密山黑土剖面土壤中有机碳¹⁴C的测定, 可以确定密山地区黑土的形成年龄和沉积速率, 初步探讨黑土形成的古气候条件, 为黑土地地表基质的修复提供理论依据.

5 结论

(1) 密山黑土剖面元素地球化学组成与其他典型风成堆积物类似, UCC标准化曲线趋势基本一致, 显示 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 接近于UCC, MgO 表现为弱亏损, Na_2O 和 CaO 表现为强亏损, 表明密山黑土成土母质可能为风成成因.

(2) 密山黑土剖面记录了全新世以来气候经历了早全新世的升温变暖、中全新世的温暖湿润和晚全新世降温变凉的变化过程.

(3) 密山地区黑土的沉积速率为9.62 cm/ka, 中全新世及晚全新世以来是黑土的主要形成时期.

致谢: 感谢中国地质调查局沈阳地质调查中心刘凯高级工程师和吉林大学张新荣副教授在本文完成过程中提供的指导和帮助.

参考文献(References):

- [1]程峰. 中国南方更新世红土沉积物的特征及其物源研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
Cheng F. Study on characteristics and source provenance of the Pleistocene red earth sediments in southern China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [2]An Z S, Liu T, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China[J]. Quaternary International, 1990, 7/8: 91-95.
- [3]Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, et al. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 152(1/2): 49-66.
- [4]Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(3/4): 845-859.
- [5]Powelson D S, Gregory P J, Whalley W R, et al. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services [J]. Food Policy, 2011, 36(S1): S72-S87.
- [6]杜贯新. 松嫩黑土区西北部多流域黑土地球化学及重金属累积特征[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
Du G X. The geochemical and heavy metal accumulation characteristics of black soil in the northwest of Songnen black soil region were studied [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [7]宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 松嫩平原东部典型黑土剖面孢粉组合、时代及其对古气候的指示[J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1528-1538.
Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Palynological assemblages of typical black soil profile in the eastern Songliao Plain and their age and its implication for paleoclimatic [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1528-1538.
- [8]Guan H C, Zhu C, Zhu T X, et al. Grain size, magnetic susceptibility and geochemical characteristics of the loess in the Chaohu Lake Basin: Implications for the origin, palaeoclimatic change and provenance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 117: 170-183.
- [9]肖春晖, 王永红, 林间. 近1 Ma以来帕里西维拉海盆沉积物物源和古气候: 粒度和黏土矿物特征的指示[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 508-524.
Xiao C H, Wang Y H, Lin J. Provenance and Paleoclimate of

- sediments in the Parece Vela Basin in past 1 Ma: Inferences from grain-size and clay mineral distribution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 508–524.
- [10]王兆夺, 黄春长, 庞奖励, 等. 甘肃庄浪全新世黄土土壤物源分析及古气候恢复重建[J]. *沉积学报*, 2020, 38(4): 781–789.
Wang Z D, Huang C C, Pang J L, et al. Provenance analysis and reconstruction of the climate change for the Holocene loess profile in the Zhuanglang County of Gansu Province, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(4): 781–789.
- [11]梁爱民, 屈建军, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠沉积物粒度端元特征及其物源启示[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 33–42.
Liang A M, Qu J J, Dong Z B, et al. The characteristic of grain size end members in Kumtagh Desert and its implication for sediment source[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 33–42.
- [12]胡凯程, 贾佳, 胡忠行, 等. 湿润气候条件下温度对土壤磁化率影响的再认识[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 461–471.
Hu K C, Jia J, Hu Z X, et al. New insight into the temperature dependence of pedogenic magnetic susceptibility in humid climate region[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 461–471.
- [13]刘硕, 迟云平, 郝冬梅, 等. 中更新世以来松嫩平原夏季风演化: 来自哈尔滨黄土的磁化率、地球化学和总有机碳记录[J]. *地质科学*, 2021, 56(4): 1279–1298.
Liu S, Chi Y P, Hao D M, et al. Evolution of summer monsoon in Songnen Plain since Middle Pleistocene: Magnetic susceptibility, geochemistry and total organic carbon records from Harbin loess [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(4): 1279–1298.
- [14]邱世藩, 欧阳婷萍, 朱照宇, 等. 中国东部表层土壤磁化率特征及其指示意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, 39(10): 1554–1564.
Qiu S F, Ouyang T P, Zhu Z Y, et al. Magnetic susceptibility characteristics of weathering-Pedogenic topsoil along east part of China and its significance [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(10): 1554–1564.
- [15]刘凯, 戴慧敏, 刘国栋, 等. 基于主成分聚类法的典型黑土区土壤地球化学分类[J]. *物探与化探*, 2022, 46(5): 1132–1140.
Liu K, Dai H M, Liu G D, et al. Geochemical classification of the soil in a typical black soil area using the principal component analysis combined with K-means clustering algorithm [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(5): 1132–1140.
- [16]戴慧敏, 刘凯, 宋运红, 等. 东北地区黑土退化地球化学指示与退化强度[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 510–517.
Dai H M, Liu K, Song Y H, et al. Black soil degradation and intensity in Northeast China: Geochemical indication[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 510–517.
- [17]韩晓萌, 戴慧敏, 梁帅, 等. 黑龙江省拜泉地区典型黑土剖面元素地球化学特征及其环境指示意义[J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 556–563.
Han X M, Dai H M, Liang S, et al. Element geochemistry of the typical black soil sections in Baiquan area, Heilongjiang Province: Environmental implication [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 556–563.
- [18]王攀, 张培新, 杨振京, 等. 靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 162–170.
Wang P, Zhang P X, Yang Z J, et al. Climate change since the last glacial stage recorded in Jingbian loess section[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 162–170.
- [19]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 P, Xie Y Y, Kang C G, 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.
- [20]陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(6): 531–536.
Chen J, Ji J F, Qiu G, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(3): 235–241.
- [21]宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等. 黑龙江省海伦地区黑土剖面常量元素地球化学特征及其对物源的指示意义[J]. *物探与化探*, 2022, 46(5): 1105–1113.
Song Y H, Yang F C, Liu K, et al. Geochemical characteristics of major elements in the black soil profiles of the Hailun area, Heilongjiang Province and their implications for provenance[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(5): 1105–1113.
- [22]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.
Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 1041–1048.
- [23]Wang X Y, Yi S W, Lu H Y, et al. Aeolian process and climatic changes in loess records from the northeastern Tibetan Plateau: Response to global temperature forcing since 30 ka [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30(6): 612–620.
- [24]Lu H Y, Wang X Y, Ma H Z, et al. The Plateau monsoon variation during the past 130 kyr revealed by loess deposit at northeast Qinghai-Tibet (China)[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(3/4): 207–214.
- [25]陶慧, 王建华, 陈慧娟, 等. 伶仃洋 ZK19 孔全新统有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 值特征及东亚季风演变记录[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(3): 1–12.
Tao H, Wang J H, Chen H X, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in the Holocene organic material of borehole ZK19 in Lingdingyang Bay and the records of east Asian monsoon variation [J]. *Acta*

- Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2019, 58(3): 1–12.
- [26]李拓宇, 莫多闻, 朱高儒, 等. 晋南全新世黄土剖面常量元素地球化学特征及其古环境意义[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1411–1420.
- Li T Y, Mo D W, Zhu G R, et al. Geochemical characteristics of major elements and its paleoenvironmental significance of Holocene loess profile in southern Shanxi, China[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1411–1420.
- [27]王丰年, 李保生, 蒋树萍, 等. 查格勒布鲁剖面记录的 OIS3a 巴丹吉林沙漠季风气候变化[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 97–102.
- Wang F N, Li B S, Jiang S P, et al. Monsoonal climate changes from the Chagelebulu section of the Badain Jaran Desert in China during the OIS3a[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 97–102.
- [28]李福春, 谢昌仁, 潘根兴. 南京老虎山黄土剖面的磁化率及 Rb 和 Rb/Sr 对古气候的指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 47–52.
- Li F C, Xie C R, Pan G X. Paleoclimatic implication of distribution of Rb, Rb/Sr and magnetic susceptibility in loess and paleosols from Laohushan profile, Nanjing[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(4): 47–52.
- [29]刘阳, 邵铁全, 刘云焕, 等. 陕西西乡寒武纪梅树村期微古生物群产出层位的地球化学特征及古环境和古气候条件研究[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 309–322.
- Liu Y, Shao T Q, Liu Y H, et al. Geochemical characteristics and palaeo-environment and palaeoclimate conditions of Early Cambrian Meishucun micropalaeontological strata in Xixiang, southern Shaanxi[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 309–322.
- [30]张培新, 杨振京, 王攀, 等. 陕西靖边三道沟黄土剖面特征及古气候意义[C]//中国古生物学会孢粉学分会十届一次学术年会论文摘要集. 赤峰: 中国古生物学会孢粉学分会, 2017: 42.
- Zhang P X, Yang Z J, Wang P, et al. Profile characteristics and paleoclimatic significance of Sandaogou loess in Jingbian, Shaanxi [C]//Abstracts of the 10th Annual Conference of Palynology Branch of Paleontological Society of China. Chifeng: Palynology Branch of Paleontological Society of China, 2017: 42. (in Chinese)
- [31]周家兴, 吴利杰, 于娟, 等. 铜川地区 11.4~1.5 ka B.P. 期间黄土地球化学风化特征及其古气候意义[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 64–73.
- Zhou J X, Wu L J, Yu J, et al. Characteristics of geochemical weathering of loess in the Tongchuan area during 11.4–1.5 ka B.P. and its Paleoclimatic implications[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 64–73.
- [32]Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon[J]. Science, 2004, 304(5670): 575–578.
- [33]Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. Science, 2005, 308(5723): 854–857.
- [34]赵超, 李小强, 周新郢, 等. 北大兴安岭地区全新世植被演替及气候响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(6): 870–880.
- Zhao C, Li X Q, Zhou X Y, et al. Holocene vegetation succession and responses to climate change in the northern sector of Northeast China[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(7): 1390–1400.
- [35]祁福利, 张孟才, 鲁守刚, 等. 三江平原地区第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 2015: 22–23.
- Qi F L, Zhang M C, Lu S G, et al. Quaternary geology in Sanjiang Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 22–23. (in Chinese)
- [36]Wang H, Stumpf A J, Kumar P. Radiocarbon and stable carbon isotopes of labile and inert organic carbon in the critical zone observatory in Illinois, USA[J]. Radiocarbon, 2018, 60(3): 989–999.
- [37]崔静怡, 郭利成, 陈雨露, 等. 松嫩平原全新世黑土 ^{14}C 年龄-深度关系空间格局[J]. 第四纪研究, 2021, 41(5): 1332–1341.
- Cui J Y, Guo L C, Chen Y L, et al. Spatial distribution of ^{14}C age and depth of mollisol sections in the Songnen Plain during the Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(5): 1332–1341.