

松嫩平原北部黑土区地表基质层地球化学特征及 对黑土物源的指示意义

李俊华¹⁾, 侯红星^{1)*}, 王 伟¹⁾, 任柄璋¹⁾, 张贵钢²⁾, 李 明²⁾,
齐 力³⁾, 杜 欣³⁾, 时凌峰¹⁾, 詹泽东¹⁾, 西广越¹⁾

1) 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊 065000;

2) 自然资源部自然资源调查监测司, 北京 100812; 3) 四平现代农业科学院, 吉林梨树 136000

摘 要: 黑土及其母质作为特殊的沉积物, 研究其物源特征对黑土地的保护利用工作具有重要意义, 但现有研究对此方面的关注依然较少。笔者在松嫩平原北部选取黑土层肥沃且深厚的克东县等五个县作为研究区, 基于地表基质调查工作获取了黑土层+非砂土层, 黑土层+砂土层两种地表基质层构型的地球化学数据, 对黑土层与母质层样品的地表基质类型、地球化学元素特征进行对比分析, 并探讨了物源特征。结果表明, 黑土层地表基质类型以壤土为主(占 92%), 母质层以黏土为主(占 67%), 其次为壤土(占 24%); 黑土层(下伏非砂土)有机质平均含量为 3.23%, 显著高于母质层(非砂土)的 0.93%; 从主量与微量元素地球化学特征上看, 黑土层(下伏非砂土)对母质层(非砂土)具有很好的物质继承性, 但黑土层(下伏砂土)对母质层(砂土)不具有物质继承关系; 研究区黑土及母质(非砂土)主要是由松嫩沙地作为物源通过风力作用搬运、沉积形成, 沉积物形成过程中, 经历了一定程度的再循环作用过程; 黑土下伏的砂土在地球化学特征上与黑土显著不同, 这些砂土应主要来自于小兴安岭地区。因此, 黑土地地表基质层地球化学性质的调查与研究有助于加深我们对黑土形成演化历史的了解。

关键词: 黑土层; 地球化学特征; 物源特征; 松嫩平原; 地表基质

中图分类号: P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.120602

Geochemical Characteristics of the Ground Substrate Layer in the Black Soil Area of the Northern Songnen Plain and Its Implications for the Provenance of Black Soil

LI Junhua¹⁾, HOU Hongxing^{1)*}, WANG Wei¹⁾, REN Bingzhang¹⁾, ZHANG Guigang²⁾, LI Ming²⁾,
QI Li³⁾, DU Xin³⁾, SHI Lingfeng¹⁾, ZHAN Zedong¹⁾, XI Guangyue¹⁾

1) Langfang Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey,
Langfang, Hebei 065000;

2) Department of Natural Resources Survey and Monitoring, Ministry of Natural Resources of
the People's Republic of China, Beijing 100812;

3) Siping Academy of Modern Agricultural Sciences, Siping, Jilin 136000

Abstract: Black soil and its parent material are special sediments, and studying their provenance characteristics has great significance for the protection and utilization of black soil. However, existing research has paid little attention to this field. In the northern Songnen Plain, the author selected Kedong County and other four counties with a rich and deep black soil layer as the research subject. Based on the geochemical data of the black soil layer and the parent material layer obtained from the ground substrate survey, the ground substrate types and geochemical element characteristics of the black soil layer and the parent material layer were compared and the

本文由中国地质调查局项目“苏北平原 1:25 万地表基质调查”(编号: DD20242041)资助。

收稿日期: 2024-10-04; 改回日期: 2024-12-05; 网络首发日期: 2024-12-09。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李俊华, 男, 1996 年生。工程师。从事地表基质与地球化学工作。E-mail: 2324360052@qq.com。

*通信作者: 侯红星, 男, 1975 年生。正高级工程师。从事区域地质矿产调查和自然资源调查研究。E-mail: wjhjhxx@163.com。

provenance characteristics were evaluated. The results showed that loam is the main type of ground substrate in the black soil layer (92%) and that clay is the main type of ground substrate in the parent material layer (67%), followed by loam (24%). The average organic matter content in the black soil layer (underlying non-sand) is 3.23%, which is significantly higher than the content in the parent material layer (non-sand), which is 0.93%. The black soil layer (underlying non-sand) has good material inheritance to the parent material layer (non-sand), but the black soil layer (underlying sand) has no material inheritance to the parent material layer (sandy soil). The black soil and parent material (non-sand) have an aeolian origin, and the Songnen Sandy Land is the main provenance of the study area. During the formation process, the sediment underwent a certain degree of recycling. The sandy soil under the black soil obviously has different geochemical characteristics than the black soil and likely came mainly from the Lesser Khingan Mountains area. This investigation of the geochemical properties of the ground substrate layer deepens our understanding of the formation and evolution history of black soil.

Key words: black soil; geochemical characteristics; provenance characteristics; Songnen Plain; ground substrate layer

黑土地土壤肥沃, 适宜耕种, 广泛分布于地球上四季分明且温差较大中纬度地带。在这些地区, 夏季温暖多雨, 植物生长茂盛, 到了秋季气温迅速下降, 直至冬季寒冷干燥, 使得覆盖在地表浅部的植物残枝落叶来不及被分解, 与上一年未分解完全的植物残骸在来年夏季一同被微生物分解转化为腐殖质, 由于有机质的累积量超过分解量, 经过长年不断积累, 便形成了肥沃且深厚的黑土层(崔明等, 2008; Liu et al., 2012; 韩晓增等, 2018; 汪景宽等, 2021)。根据中国科学院发布的《东北黑土地白皮书(2020)》(中国科学院, 2021), 东北黑土区总面积为 109 万 km², 约占全球黑土区总面积的 12%, 其中典型黑土呈弧状集中分布在松嫩平原北部以及东部的冲积-洪积波状高平原上(方洪宾等, 2009; 王晓光等, 2023)。由于地理位置对气候、水文、植被等的影响, 使得松嫩平原黑土区北部黑土层厚度和土壤有机质含量高于南部(刘凯等, 2022; 刘希瑶等, 2022)。前人研究认为, 东北黑土开始形成于晚冰期暖期, 此时气候变得温暖湿润, 适合植被的生长(崔静怡等, 2021; Yang et al., 2023; Zhang et al., 2023)。黑土形成的最佳母质通常被认为是黄土或黄土状沉积物(方洪宾等, 2009; Liu et al., 2012; Zhang et al., 2024)。近年来, 由于气候变化和人类活动的影响, 黑土地资源正在遭受侵蚀、破坏, 学者们结合实际探索了多种保护措施(汪景宽等, 2021; 徐英德等, 2023)。

松嫩平原北部黑土地资源丰富, 是研究黑土形成演化的理想区域。韩晓萌等(2020)分析了拜泉县典型剖面的地球化学数据, 认为黑土层的形成环境相对温暖湿润, 母质层相对寒冷干燥。宋运红等(2022)对海伦地区黑土剖面主量元素地球化学特征进行研究, 认为该地区黑土的成土母质为风成成因, 与典型风成堆积物有相似的化学风化程度, 且表层和深层黑土形成时的气候环境与物源存在差异。揭示黑土的形成演化机理对黑土地的保护利用工作具

有重要意义, 这也是地表基质调查与研究的重要方向之一(侯红星等, 2022)。土壤物质来源研究在其他土壤类型区也有所开展(林旭等, 2023)。地表基质调查可以揭示到黑土层下面的母质层, 调查指标包括地表基质类型、容重、pH 值、有机质和各类地球化学元素的含量等(侯红星等, 2021, 2022; 殷志强等, 2023)。松嫩平原北部黑土地肥沃且深厚, 但目前对该地区黑土及其母质地球化学特征的系统研究较少。本次研究基于在该地区开展的地表基质调查工作, 以采集的黑土层和母质层样品为研究对象, 通过地球化学研究, 对该区域黑土及母质的物质来源特征、沉积历史进行探讨, 为研究区黑土的形成演化提供新的约束。

1 区域概况

松嫩平原地处中国东北, 平原四周地势高, 其西、北、东三面分别被大兴安岭、小兴安岭、长白山地区所环绕, 南部以长岭隆起与辽河平原分隔(图 1a; 张月馨等, 2020; 王晓光等, 2023)。松嫩平原在新生代构造单元上位于松辽断陷带的松嫩拗陷(李锦轶等, 2019)。第四纪地层在松嫩平原发育齐全, 从下更新统到全新统均有出露(方洪宾等, 2009)。研究区位于松嫩平原北部, 地理位置介于 123°57'56"~126°40'00"E、47°29'49"~48°33'53"N, 包含克东县、拜泉县、克山县、依安县和富裕县, 总面积约为 16 706 km², 均为齐齐哈尔市下辖县(图 1b)。研究区上荒山组(Qp^{2s})地层主要为黄褐色亚黏土、黄土状亚黏土; 哈尔滨组地层(Qp^{3h})分布于上荒山组之上, 为黄色、灰黄色黄土状亚黏土; 顾乡屯组(Qp^{3g})灰黄色亚黏土、亚砂土分布于哈尔滨组之上; 全新统冲积物(Qh^{al})呈带状分布于河流的河床及河漫滩, 岩性主体为黄色砂, 含砂砾石层。区内地形从东北部至西南部地势逐渐降低, 东北部克山县、克东县和拜泉县地貌类型主要为冲积-洪积

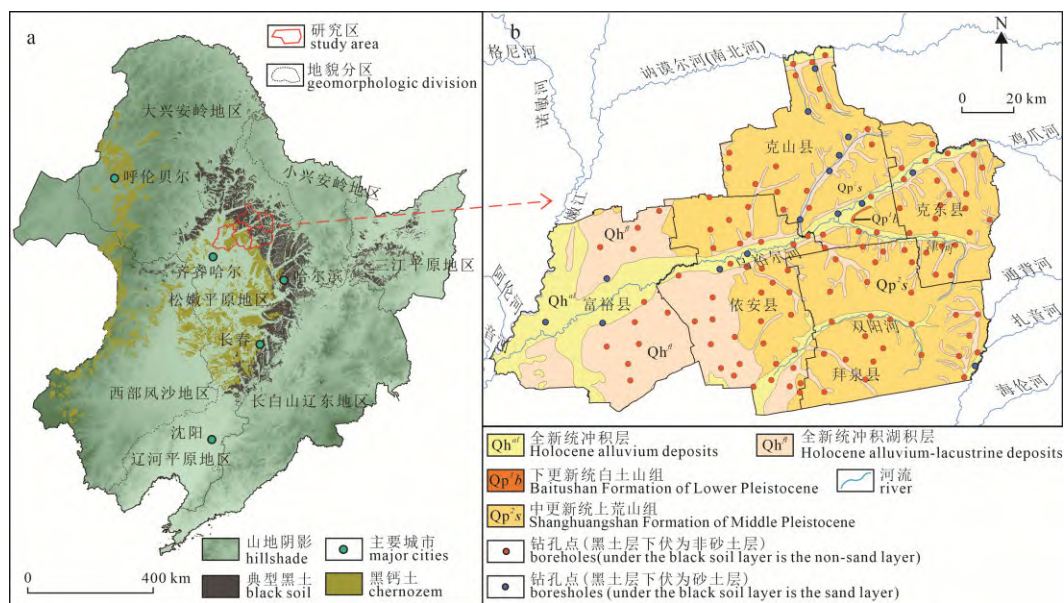


图1 研究区在松嫩平原的分布位置(a; 土壤类型数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心; 地貌分区划分参考徐英德等, 2023)和钻孔点位在研究区的分布(b)

Fig. 1 Location of the study area in the Songnen Plain (a; soil type data from the Resource and Environmental Science Data Platform; geomorphic partition reference XU et al., 2023), and distribution of borehole locations in the study area (b)

高平原和冲积-洪积砂砾石台地, 向西南部依安县、富裕县逐渐转变为冲积-湖积低平原和冲积-洪积阶地、河床、河漫滩。

研究区属温带大陆性季风气候区, 四季特征明显, 春季干旱多风, 夏季炎热多雨, 秋季短暂霜早, 冬季寒冷而漫长。根据中国科学院资源环境科学数据中心的数据, 2020 年, 研究区年蒸发量为 1 268~1 316 mm, 年降水量为 619~759 mm, 年均气温为 2.4~5.2 °C。受地形的影响, 区内河流流向主要为自东北向西南。嫩江流经富裕县西缘, 乌裕尔河自克东县流入, 从富裕县流出, 贯穿全区, 此外, 区内还分布有津河、双阳河等河流。研究区土地利用类型主要为耕地, 主要种植作物包括玉米、小麦、大豆和马铃薯等。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本次工作在研究区共布设深度范围为 0~5 m 的钻孔 138 个(图 1b), 这些钻孔均包含黑土层。野外采样时所使用的钻机为手持式液压土壤取样钻机 GL-10, 对钻孔岩心样品的取样方法和地表基质类型的定名原则依据(侯红星等, 2021, 2022)。采集到的样品需要在送交实验室分析前进行前处理, 该工作主要在野外场地完成, 场地环境通风良好、无阳光直射、无明显污染。样品装袋前剔除根系、石块等杂物, 装袋后置于样品架上进行晾干, 并适时敲碎以加速干燥, 经过初步处理后过 10 目尼龙筛, 称重后混匀, 送交实验室进行分析。地表基质样品在

采集、处理过程中的防污染措施参考《多目标区域地球化学调查规范规范(DZ/T0258-2014)》(中国地质调查局南京地质调查中心, 2014)等相关规范。

2.2 分析测试

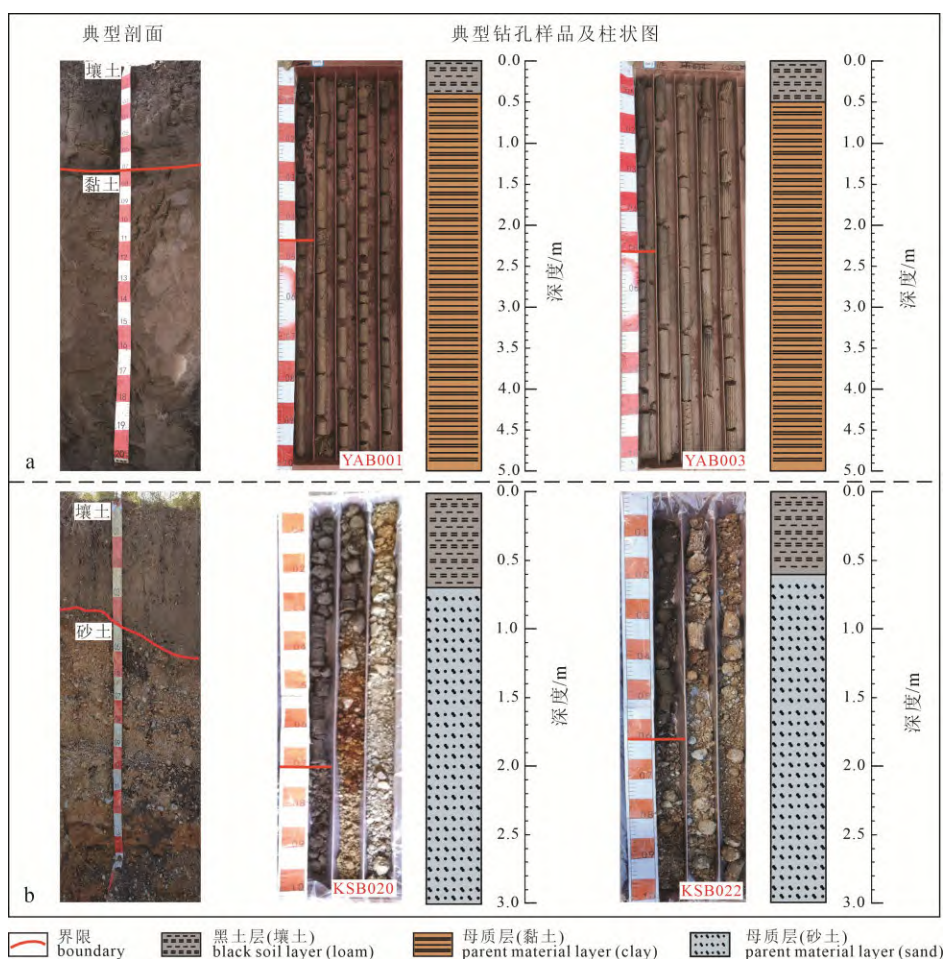
本次分析测试工作是在华北有色(三河)燕郊中心实验室有限公司完成的。测试流程如下: 将送至实验室的样品混匀, 用无污染行星磨机粉碎至 200 目, 加工过程充分避免污染, 加工后的样品抽取 5%对重量、粒度、制样流程等项目进行检查, 检查合格的样品即可进行分析测试。主量元素测试首先取 4.0 g 左右样品, 均匀放入低压聚乙烯塑料环中, 置于压力机上, 压制成试料片。试料片表面应光滑, 无裂纹。处理好的样品采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定主量元素组成。有机碳的测定称取 0.1~0.5 g 通过 0.149 mm 的风干土样于硬质大试管中, 加粉末状的硫酸银 0.1 g。用吸管加入 5 mL 0.8 mol/L 重铬酸钾标准溶液, 然后用注射器注入 5 mL 浓硫酸, 并小心旋转摇匀; 预先将油锅加热至 185~190 °C, 将盛土样的大试管插入铁丝笼架中, 然后将其放入油锅中加热, 此时应控制锅内温度为 170~180 °C, 并使溶液保持沸腾 5 min, 然后取出铁丝笼架, 待试管稍冷后, 用干净纸擦净试管外部的油液; 如溶液呈橙黄色或黄绿色, 则冷却后将试管内混合物洗入 250 mL 锥形瓶中, 使瓶内体积在 60~80 mL 左右, 加邻菲罗啉指示剂 3~4 滴, 用 0.2 mol/L 硫酸亚铁滴定, 溶液由橙黄经蓝绿到棕红色为终点, 然后进行计算。有机质的含量是有机碳含量乘以 1.724 得出的(刘希瑶等, 2022)。微量元素

测试称取 0.1 g 样品置于 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中, 加几滴水润湿, 加 HNO_3 , HF , HClO_4 在电热板上加热分解, 待高氯酸烟冒尽。关掉电热板, 加入王水, 利用余温浸取, 取下用少量水冲洗杯壁, 移入 25 mL 比色管中, 用水稀释至刻度, 摇匀。准确分取 2.0 mL 溶液于 10 mL 比色管中, 用水稀释至刻度, 摇匀, 然后使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测定。样品分析各元素报出率均为 100%, 表明采用的分析方法满足实验要求。根据《多目标区域地球化学调查规范规范(DZ/T0258-2014)》要求(中国地质调查局南京地质调查中心, 2014), 通过在样品中密码插入 GBW 标准物质控制准确度和精密度, 各指标的准确度和精密度一次合格率均为 100%, 表明数据可靠。

3 分析结果

从黑土的概念来看, 学者们多从颜色、厚度、有机质含量三个方面对其进行限定, 其他条件如土

体结构、盐基饱和度与砾石含量等也被作为判断标准(宴森等, 2018; 张新荣等, 2020)。一般来说, 土质颜色越接近黑色, 代表胡敏素、腐殖酸含量水平越高(郝翔翔等, 2023); 耕作层厚度一般为 0~20 cm, 当大于 20 cm 时能够满足绝大多数蔬菜、粮食等农作物的生长需求; 松嫩平原黑土区风沙土的有机质平均含量最低, 接近 1.5%(秦诗涵等, 2024)。因此, 本文在借鉴前人研究成果的基础上, 将颜色为黑色或暗黑色、有机质含量高于 1.5%的土质基质判定为黑土。黑土层之下的地表基质层作为黑土的母质层。以图 2 为例, a 图为位于依安县的剖面照片和钻孔图片, YAB001 黑土层为灰黑色壤土, 厚度为 40 cm, 有机质含量为 5.27%, 下伏黄色黏土层; YAB003 黑土层为灰黑色壤土, 厚度为 50 cm, 有机质含量为 2.6%, 下伏黄色黏土层。b 图为位于克山县的剖面照片和钻孔图片, KSB020 黑土层为灰黑色壤土, 厚度为 70 cm, 有机质含量为 2.23%, 下伏灰黄色、灰白色砂土层; KSB022 黑土层为灰黑色壤土, 厚度为



a—上覆黑土层(地表基质类型为壤土), 下伏母质层(地表基质类型为黏土)的结构;

b—上覆黑土层(地表基质类型为壤土), 下伏母质层(地表基质类型为砂土)的结构。

a—structure of the overlying black soil layer (ground substrate type is loam) and the underlying parent material layer (ground substrate type is clay); b—structure of the overlying black soil layer (ground substrate type is loam) and the underlying parent material layer (ground substrate type is sand).

图 2 地表基质垂向结构典型剖面及钻孔照片、对应的柱状图示意

Fig. 2 Typical profile of vertical structure of ground substrate, borehole photos, and corresponding column diagrams

60 cm, 有机质含量为 3.68%, 下伏灰黄色砂土层。

经过统计, 黑土层地表基质类型(钻孔个数)包括: 黏土(1)、黏质壤土(121)、壤土(3)、壤质黏土(10)、砂质壤土(3)。母质层地表基质类型(对应的钻孔个数)包括黏土(15)、黏质壤土(32)、黏质砂土(2)、壤土(1)、壤质黏土(75)、壤质砂土(1)、砂土(10)、砂质黏土(2)。因此, 黑土层地表基质类型以壤土为主, 约占总孔数的 92%, 其次为黏土, 约占总孔数的 8%; 母质层地表基质类型以黏土为主, 约占总孔数的 67%, 其次为壤土, 约占总孔数的 24%, 砂土约占总孔数的 9%。黑土层与母质层的主量元素和有机质含量数据统计结果见表 1。

3.1 主量元素

本文将黑土层(下伏为非砂土)、母质层(非砂土)、黑土层(下伏为砂土)、母质层(砂土)分别记为黑土层(O)、母质层(O)、黑土层(S)、母质层(S)。利用 SPSS 22.0 对数据进行了元素含量形态分布检验, 多数元素数据分布不均匀, 选择用几何平均值进行研究。从表 1 中可以看到, 研究区黑土层(O)与母质层(O)样品的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、

K_2O 、 MgO 平均含量相差不大。黑土层(O)与母质层(O)样品主量元素平均含量最低的是 MgO , 其次是 Na_2O , 而海伦地区黑土的主量元素中 CaO 平均含量最低(宋运红等, 2022)。黑土层(O)和母质层(O)样品的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 属于轻度变异, 表明空间分布较为均匀, MgO 、有机质为中度变异, 表明在空间上存在一定变化, CaO 为高度变异, 表明空间分布差异显著(Wilding, 1985; 张仁铎, 2005)。土壤化学元素基准值是指区域上深层(1.5~2 m)土壤元素含量的平均值, 代表未受人类活动干扰的原生地球化学含量; 土壤地球化学背景值是指未受明显的人类活动(但包括区域尺度的人为活动引起的面源污染)影响的 0~20 cm 土壤元素含量的平均值(张哲寰等, 2024)。对比来看, 研究区黑土层(O)与母质层(O)的 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 低于松辽平原土壤基准值和背景值, CaO 和有机质含量高于松辽平原土壤基准值和背景值。

研究区黑土层(S)的 SiO_2 含量明显低于母质层(S), 其他主量元素含量高于母质层(S)。黑土层(S)与母质层(S)样品主量元素平均含量最低的是 MgO ,

表 1 研究区黑土层和母质层样品主量元素和有机质含量数据统计
Table 1 Statistical data of major elements and organic matter content of black soil layer and parent material layer in the study area

样品来源	参数	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	有机质
黑土层(O)	最大值	73.57	17.20	6.44	11.71	2.16	2.72	2.22	7.12
	最小值	49.95	11.10	2.56	0.77	0.80	1.89	0.76	1.76
	几何平均值	62.20	14.10	4.75	1.92	1.52	2.41	1.36	3.23
	标准偏差	3.28	1.20	0.63	1.79	0.18	0.16	0.22	0.90
	变异系数	0.05	0.09	0.13	0.76	0.11	0.07	0.16	0.27
母质层(O)	最大值	76.37	17.89	6.54	10.18	2.38	3.02	2.00	1.47
	最小值	53.50	11.20	2.91	0.50	0.91	2.15	0.66	0.45
	几何平均值	62.95	14.28	4.80	1.89	1.61	2.51	1.39	0.93
	标准偏差	3.91	1.31	0.68	2.17	0.20	0.16	0.24	0.25
	变异系数	0.06	0.09	0.14	0.85	0.12	0.06	0.17	0.26
黑土层(S)	最大值	75.83	14.61	5.69	3.31	2.47	3.03	1.29	4.38
	最小值	51.05	10.77	2.35	0.80	1.19	1.95	0.60	1.57
	几何平均值	67.98	12.42	3.87	1.25	1.57	2.41	0.93	2.75
	标准偏差	5.78	1.12	0.87	0.65	0.37	0.29	0.20	0.91
	变异系数	0.08	0.09	0.22	0.48	0.23	0.12	0.21	0.31
母质层(S)	最大值	93.55	12.06	3.16	4.49	2.88	3.27	1.42	1.47
	最小值	65.30	2.44	0.78	0.17	0.05	0.38	0.16	0.25
	几何平均值	81.72	6.58	1.72	0.65	0.73	1.67	0.41	0.46
	标准偏差	9.40	3.34	0.80	1.37	0.79	0.83	0.41	0.31
	变异系数	0.11	0.45	0.42	1.24	0.73	0.42	0.78	0.58
中国土壤基准值		63.94	13.62	4.64	2.90	1.28	2.40	1.50	0.53
中国土壤背景值		64.96	12.96	4.35	2.79	1.27	2.36	1.46	1.84
松辽平原土壤基准值		65.30	13.63	4.00	1.31	1.91	2.69	1.28	0.64
松辽平原土壤背景值		65.82	13.02	3.89	1.44	1.85	2.61	1.21	2.34

注: 主量元素和有机质含量单位为%, 中国土壤基准值、背景值和松辽平原土壤基准值、背景值来自文献张哲寰等(2024)。

其次是 CaO。黑土层(S)的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和母质层(S)的 SiO_2 属于轻度变异,表明空间分布较为均匀。黑土层(S)的 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、有机质属于中度变异,这些化学成分的含量在空间上存在一定变化。黑土层(S)的 CaO 和母质层(S)的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、有机质属于高度变异,表明空间分布差异显著(Wilding, 1985; 张仁铎, 2005)。对比来看,研究区黑土层(S)与母质层(S)的 SiO_2 含量明显高于中国土壤基准值、背景值和松辽平原土壤基准值、背景值,母质层(S)的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 含量低于中国土壤基准值、背景值和松辽平原土壤基准值、背景值。从数据来看,黑土层(O)有机质平均含量为 3.23%,显著高于母质层(O)的 0.93%,黑土层(S)有机质平均含量为 2.75%,显著高于母质层(S)的 0.46%,表明母质层和黑土层的划分可行性较高。

3.2 微量元素

研究区钻孔黑土层(O)和母质层(O)样品的微量元素含量较为接近,数据统计结果见表2。黑土层(O)和母质层(O)样品的 Li、Be、Sc、Co、Ba、Rb、Ti、Pb、Th、U 高于松辽平原土壤背景值和基准值。黑土层(O)和母质层(O)样品的 Sc、Co、Sr、U 属于中等变异,表明这些元素的含量在空间上存在一定变化,其他微量元素的变异系数小于 0.15,属于轻度变异,表明这些元素在空间上的分布较为均匀(Wilding, 1985; 张仁铎, 2005)。黑土层(S)样品微量元素平均含量明显高于母质层(S)样品。黑土层(S)样品 Li、Co、Ba、U 略高于松辽平原土壤背景值和基准值, Rb、Sr、Zr、Ti 低于松辽平原土壤背景值和基准值。母质层(S)样品的微量元素含量明显低于中国土壤背景值、基准值和松辽平原土壤背景值、基准值。黑土层(S)样品的 Be、Ba、Rb、Zr、Hf、Pb 属于轻度变异,其他元素为中度变异,母质层(S)样品 Li、Pb 属于中度变异,其他元素为高度变异,表明空间差异显著(Wilding, 1985; 张仁铎, 2005)。

4 讨论

4.1 主量元素与微量元素的分布模式

研究区钻孔中黑土层和母质层主量元素与微量元素的上地壳(UCC)标准化曲线分布模式见图3。上地壳主量元素和微量元素的含量值参考 Taylor et al.(1985)。黑土层(O)与母质层(O)的主量元素与微量元素的上地壳标准化曲线分布模式相似。黑土层(S)样品与部分黑土层(O)样品的分布模式接近,但与母质层(S)的分布模式有显著差异。特别是活动性元素如 Ca、Na、Mg、K、Li、Rb、Sr、U(Taylor et al.,

1985; 韩晓萌等, 2020; 徐磊等, 2024)在黑土层(S)与母质层(S)之间表现为明显区别。在耕种过程中,向土壤中施肥以及大气沉降物等都会向土壤带入某些化学元素。从本文数据来看(表1, 2),代表浅部的黑土层(O)、黑土层(S)、深部的母质层(O)的主量、微量元素含量接近,与松嫩平原土壤基准值差异较小。个别元素如 Co、Pb、Cr 含量高于松嫩平原土壤基准值,但并未表现出显著区别,且 Pb、Cr 显著低于农用地土壤污染筛选值,表明耕种等人类活动对地表基质的影响有限。黑土层(O)很可能是由母质层(O)发育而来。黑土层(S)点位分布于河道附近,推测砂土层并不是上覆的黑土层的母质,这些钻孔中的黑土是异地黑土通过河流等地质营力被搬运而来沉积形成的。相似的对比性研究曾在其他地区开展,方洪宾等(2009)对东北黑土层与下伏地质体之间的地球化学和矿物组成特征进行对比分析,推断青冈县、长春腰分水岭的黑土与黄褐色亚黏土母质具有同源性,但黑龙江绰尔河黑钙土与冰积砂砾石之间、辽宁昌图双庙子镇黑土与泉头组砂砾岩之间为异源体。因此,松嫩平原黑土层下伏的地质体并非都是黑土的母质。

从图3中可以看到,黑土层(O)与母质层(O)样品的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量较为接近 UCC, Na_2O 、 K_2O 、 MgO 含量显著低于 UCC,部分样品的 CaO 含量明显低于 UCC,也有一部分样品明显高于 UCC, CaO 含量在研究区呈现高度变异(表1)。图4将数据分为黑土层数据和母质层数据两类进行分析,结果表明, CaO 含量较高的样品主要分布在富裕县和依安县,而研究区黑钙土的分布也主要分布在富裕县和依安县(赵玉明等, 2020)。黑钙土的成土过程中有碳酸钙的淋溶淀积作用(王韵瑶等, 2023),是引起位于富裕县和依安县钻孔中样品的 CaO 含量高以及研究区空间上 CaO 含量变化明显的主要原因。个别砂土样品的 CaO 含量与上地壳接近,也可能受到了碳酸钙淋滤作用的影响。

4.2 再循环作用过程

沉积物的主量元素和微量元素地球化学特征是在继承了源区特征以及经历了原岩风化、剥蚀、搬运、沉积过程而受到改造后的综合反映,地球化学元素的含量和比值特征常被用来反映沉积物的形成演化过程,如 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图5)被用来研究黄土等沉积物的化学风化程度和沉积再循环过程(Gallet et al., 1998; Muhs, 2018; 杜慧荣, 2020)。岩浆岩母岩直接风化形成的产物会落在岩浆岩范围,但若经历过再循环沉积作用过程,会使得沉积物中的斜长石被化学风化作用明显消耗,导致

表 2 研究区黑土层和母质层样品微量元素含量数据统计
Table 2 Statistics of trace elements in black soil layer and parent material layer in the study area

样品来源	参数	Li	Be	Sc	Co	Ba	Rb	La	Nb	Sr	Zr	Ti	Hf	Pb	Cr	Th	U
黑土层(O)	最大值	40.80	3.24	15.80	41.30	878.53	131.00	52.40	19.70	464.00	375.00	5 125.00	11.30	40.90	76.60	16.20	3.97
	最小值	23.10	1.53	4.94	7.89	515.31	78.30	23.80	10.50	94.07	135.00	2 911.00	4.21	19.30	31.50	7.01	1.17
	几何平均值	33.85	2.57	11.72	17.02	644.27	108.07	39.47	14.94	188.30	274.2	4 396.95	8.16	27.66	62.33	12.26	2.38
	标准偏差	3.11	0.27	1.83	4.69	43.98	9.32	4.96	1.77	55.16	34.61	450.78	1.04	3.95	8.12	1.67	0.45
	变异系数	0.09	0.11	0.15	0.27	0.07	0.09	0.12	0.12	0.28	0.13	0.10	0.13	0.14	0.13	0.13	0.19
母质层(O)	最大值	43.00	3.14	17.00	30.90	859.00	136.00	50.70	19.00	392.00	324.00	5 691.00	9.76	39.90	84.80	16.40	4.22
	最小值	21.20	1.79	7.57	9.78	557.00	85.70	26.90	11.70	78.30	161.00	2 945.00	4.31	20.50	35.60	8.70	1.64
	几何平均值	34.08	2.59	12.09	16.84	631.58	110.34	39.29	15.26	194.82	270.25	4 433.23	8.09	27.30	62.44	12.42	2.47
	标准偏差	3.70	0.29	1.88	3.61	38.54	9.87	4.72	1.77	65.40	25.22	466.99	0.81	3.54	8.75	1.51	0.55
	变异系数	0.11	0.11	0.15	0.21	0.06	0.09	0.12	0.11	0.32	0.09	0.10	0.10	0.13	0.14	0.12	0.22
黑土层(S)	最大值	35.30	2.70	13.10	17.00	764.49	107.90	40.86	17.80	276.00	289.00	4 790.30	9.60	28.40	66.70	13.70	3.37
	最小值	18.60	1.78	5.55	6.88	512.40	82.70	20.70	9.69	131.07	201.00	2 312.00	5.75	19.50	26.70	6.42	1.23
	几何平均值	28.40	2.15	8.87	11.61	635.06	97.00	30.71	12.23	170.25	231.14	3 517.00	7.01	22.82	47.25	9.40	2.04
	标准偏差	4.21	0.24	1.89	2.94	61.38	7.10	5.34	1.98	39.67	26.38	655.05	1.00	2.30	11.08	1.88	0.48
	变异系数	0.15	0.11	0.21	0.25	0.10	0.07	0.17	0.16	0.23	0.11	0.18	0.14	0.10	0.23	0.20	0.23
母质层(S)	最大值	26.90	1.98	9.99	19.60	952.00	94.80	35.30	12.50	364.00	259.00	3 329.00	7.24	19.80	48.10	10.20	2.61
	最小值	9.97	0.47	1.14	2.60	97.00	21.70	10.80	5.00	29.60	51.40	512.00	0.94	10.40	8.98	2.10	0.44
	几何平均值	16.32	1.05	3.67	6.71	491.26	57.66	19.24	8.03	99.77	114.27	1 480.01	3.05	15.96	20.87	5.19	1.12
	标准偏差	5.44	0.56	2.47	3.86	202.92	27.59	7.60	2.30	106.89	58.16	861.27	1.90	3.16	11.49	2.29	0.58
	变异系数	0.32	0.46	0.56	0.51	0.37	0.42	0.35	0.27	0.81	0.46	0.50	0.53	0.19	0.46	0.40	0.46
中国土壤基准值	中国土壤基准值	35.00	2.10	11.10	12.40	512.00	103.00	37.00	16.00	152.00	257.00	4 240.00	—	23.00	65.00	12.30	2.40
	中国土壤背景值	33.00	2.00	10.50	11.70	504.00	99.00	37.00	15.00	148.00	269.00	4 193.00	—	25.00	63.00	11.90	2.40
	松辽平原土壤基准值	27.96	2.22	9.30	11.08	622.04	106.88	33.22	13.53	213.91	268.20	3 748.00	—	22.28	51.69	10.24	2.04
	松辽平原土壤背景值	27.23	2.14	8.92	10.67	616.35	104.89	33.62	13.61	204.08	285.51	3 824.00	—	22.42	52.00	9.99	2.07

注: 微量元素含量单位为 $\times 10^{-6}$, 中国土壤基准值、背景值和松辽平原土壤基准值、背景值来自文献张哲寰等(2024)。

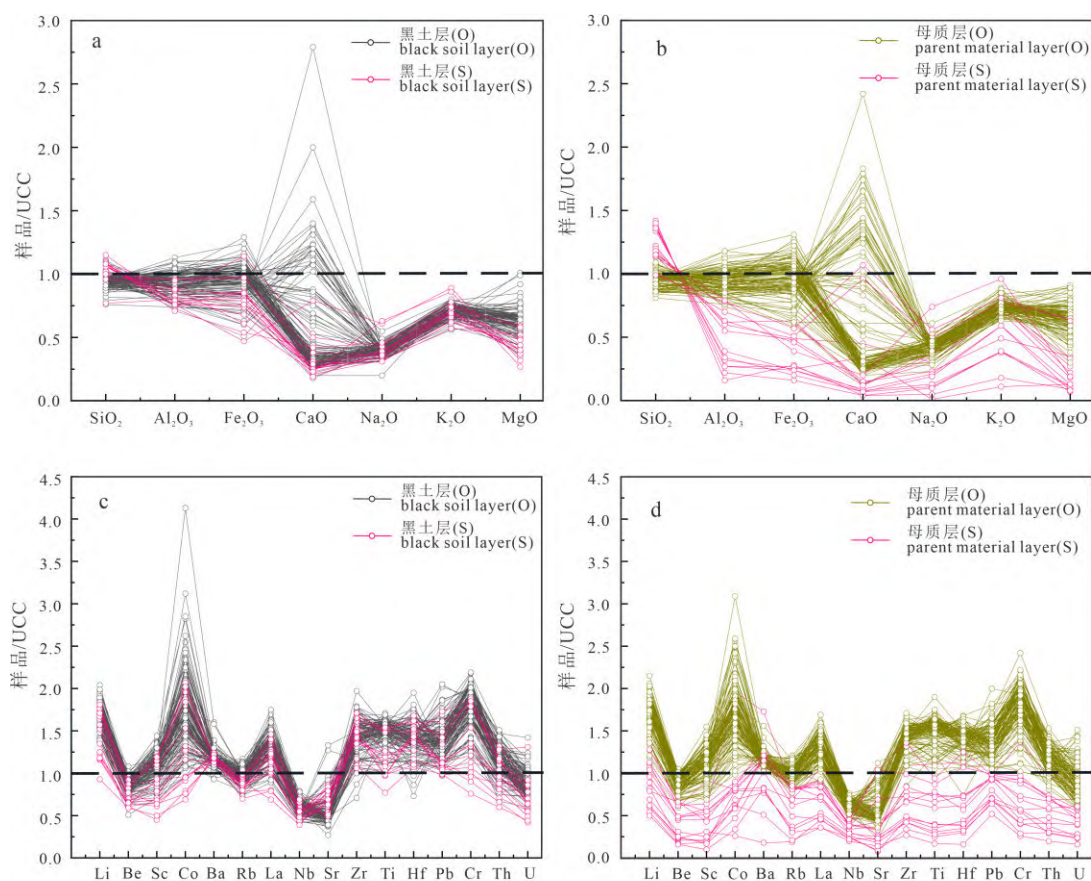


图3 黑土层(O)、母质层(O)、黑土层(S)和母质层(S)样品的主量元素与微量元素的上地壳(UCC)标准化曲线分布模式图

Fig. 3 Upper continental crust (UCC) normalized curve distribution model of major and trace elements in black soil (O), parent material layer (O), black soil (S) and parent material layer (S) samples

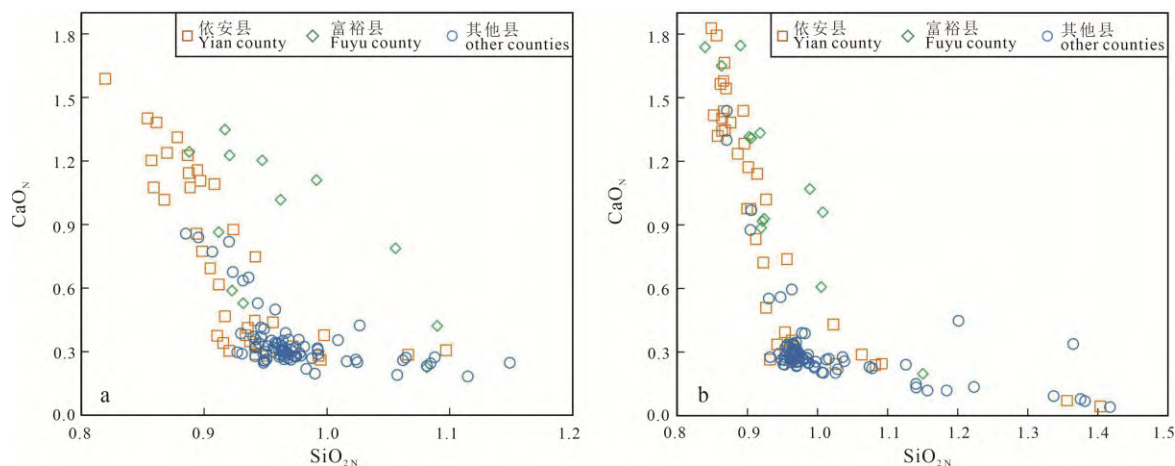


图4 黑土层(a)和母质层(b)样品的 $\text{SiO}_{2\text{N}}$ - CaO_{N} 散点图($\text{SiO}_{2\text{N}}$ 、 CaO_{N} 代表上地壳标准化值)

Fig. 4 $\text{SiO}_{2\text{N}}$ - CaO_{N} scatter plot of black soil layer (a) and parent material layer (b) samples ($\text{SiO}_{2\text{N}}$ and CaO_{N} represent the standardized values of upper continental crust)

Na_2O 含量降低,在图解上表现为以低 Na_2O 、高 Al_2O_3 含量为特征,沿页岩趋势线分布。黑土层(O)、黑土层(S)与母质层(O)样品分布集中,与上地壳(UCC)(Taylor et al., 1985)明显不同,均落在岩浆岩范围的下方,靠近页岩趋势线,与哈尔滨黄土类似(杜慧荣, 2020),说明经历了一定程度的再循环作用过程。母质层(S)样品在该图解上分布分散,除了一

个样品落于岩浆岩范围外,其他样品均落在岩浆岩范围下方,说明这些样品的来源较为复杂,且大部分样品同样经历了再循环作用过程。

微量元素如 Sc、Th、Zr 在化学风化和沉积物的形成过程中几乎不随水体流动而发生迁移。一般来说, Th/Sc 比值在镁铁质岩石中小于 1, 在长英质岩石中大于 1, 沉积物中 Th/Sc 比值依赖于镁铁质

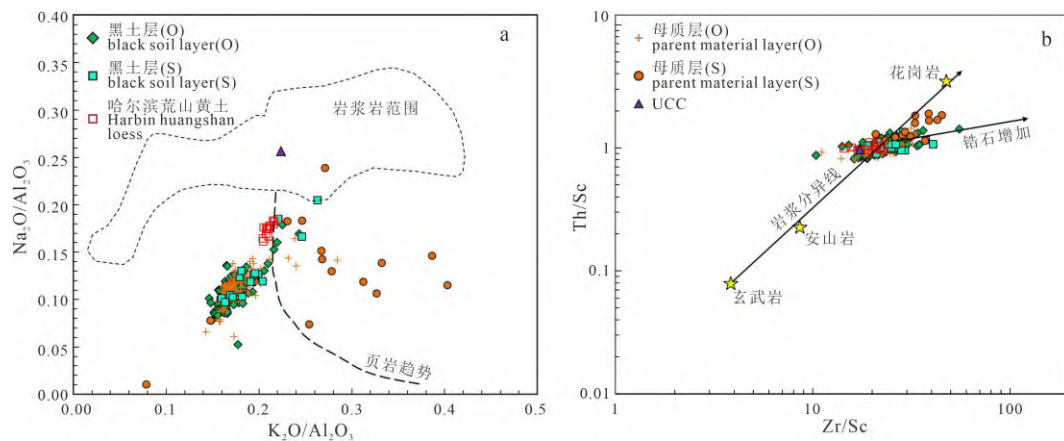


图5 K_2O/Al_2O_3 - Na_2O/Al_2O_3 与 Zr/Sc - Th/Sc 图解
Fig. 5 Diagrams of K_2O/Al_2O_3 - Na_2O/Al_2O_3 and Zr/Sc - Th/Sc

和长英质岩石源区的相对贡献(Taylor et al., 1985; Guo et al., 2018)。黑土层(O)、黑土层(S)与母质层(O)样品的 Th/Sc 比值大部分高于 1, 略高于 UCC 而与中国东部上地壳(EC-UCC)(Taylor et al., 1985)相似, 说明这些样品是经历了不同源区物质的充分混合后形成的, 并且主要受到了长英质源区物质的影响。部分母质层(S)样品具有较高的 Th/Sc 比值, 说明这些样品与其他样品可能有不同的成因。 Zr 元素在沉积物中主要富集于锆石中, 若沉积物经历了再循环作用过程, 锆石含量会不断增加, Zr 元素升高, Zr/Sc 比值增大, 在 Th/Sc - Zr/Sc 图解上会逐渐偏离岩浆分异线(李绪龙等, 2022)。从图 5 中可以看到黑土层(O)、黑土层(S)、母质层(O)样品分布的整体趋势偏离了岩浆分异线, 而与锆石增加的趋势线方向一致, 同样表明受到了再循环沉积作用的影响。

Liu et al.(2012)对全球四大黑土区的分布概况进行了总结, 归纳出第四纪黄土和黄土状沉积物是中国东北、北美、乌克兰、南美潘帕斯草原黑土的主要母质类型, 其中, 中国东北黑土主要是由厚度为 10~15 m 的第四纪黄土状沉积物发育而来。Yang et al.(2023)依据黑土土壤样品中石英的粒度分布曲线特征证明黑土的成土母质为黄土物质。宋运红等(2022)将海伦黑土与典型风成堆积物的 UCC 标准化常量元素配分模式进行了对比, 发现这些样品的分布曲线特征具有较高的相似性。因此, 前人研究结果表明东北地区黑土的成土母质主要为黄土物质。本文认为, 研究区黑土层的成土母质为黄土状沉积物, 是通过风力从附近源区搬运而来的粉尘沉积形成, 沉积过程中受到水流作用的影响从而经历了再循环作用过程。由于样品经历了再循环作用过程, 化学风化指数如 CIA 值便难以真实反映源区的风化程度和古气候特征(李绪龙等, 2022)。

4.3 源区示踪

沉积物的地球化学元素组成可以被有效地用

来示踪其源区。 SiO_2 一般在沉积物中的粗颗粒物质中富集, Al_2O_3 倾向于富集在细颗粒物质中, 随着与物源距离的增大, 风成沉积物中 SiO_2/Al_2O_3 值会逐渐降低, 该比值常被用来指示粒度的变化(宋运红等, 2022)。石英是抵抗侵蚀能力较强的矿物, 容易以粒级较大的特征残留在原地, 不易通过风力进行远距离搬运。 SiO_2/TiO_2 值主要反映了石英含量的变化, 是相对于 SiO_2/Al_2O_3 值更为灵敏的指示原始粉尘粒度的指标, 风成沉积物沉积位置距离源区越远, SiO_2/TiO_2 通常越低。 TiO_2/Al_2O_3 值与粒度大小及风化作用过程无关, 主要指示物源的特征(宋运红等, 2022; 东王刚等, 2023)。从图 6 中可以看到, 绝大部分黑土层(O)、黑土层(S)和母质层(O)样品的 TiO_2/Al_2O_3 值与哈尔滨荒山黄土类似, 表明应具有相似的源区, 但 SiO_2/Al_2O_3 值、 SiO_2/TiO_2 值相较于哈尔滨荒山黄土较低, 说明研究区与物质源区的距离相对远于哈尔滨荒山黄土与物质源区的距离。母质层(S)与其他样品明显不同, 大部分样品的 SiO_2/Al_2O_3 值、 SiO_2/TiO_2 显著高于其他类型样品, 表明这些样品具有更大的粒度及更高的石英含量。

一些惰性元素如 Al、Nb、Ti、La、Sc、Cr、Zr、Th 等在风化作用和搬运过程中能够保留源区的绝大部分信息。尽管沉积物中惰性元素的相对含量在风化、剥蚀和搬运的过程中由于活动性元素的迁移可能会发生变化, 但元素的比值如: $Al/Nb(\times 100)$ 、 La/Sc 、 Al/Ti 、 Th/Sc 、 Cr/Th 等与源区特征基本类似或只有极微小差异, 即使样品经历了一定程度的再循环作用过程, 也可用来指示源区特征(Xie et al., 2018), 因此, 采用元素的比值作二元判别图常被用来有效识别沉积物的源区。Xie et al.(2018)通过惰性元素比值的二元判别图解判断哈尔滨黄土样品的源区主要为松嫩沙地, 另有科尔沁沙地的少量贡献, 与呼伦贝尔沙地没有成因上的关联。本次研究区位于松嫩平原北部, 靠近松嫩沙地东北部, 目前对该

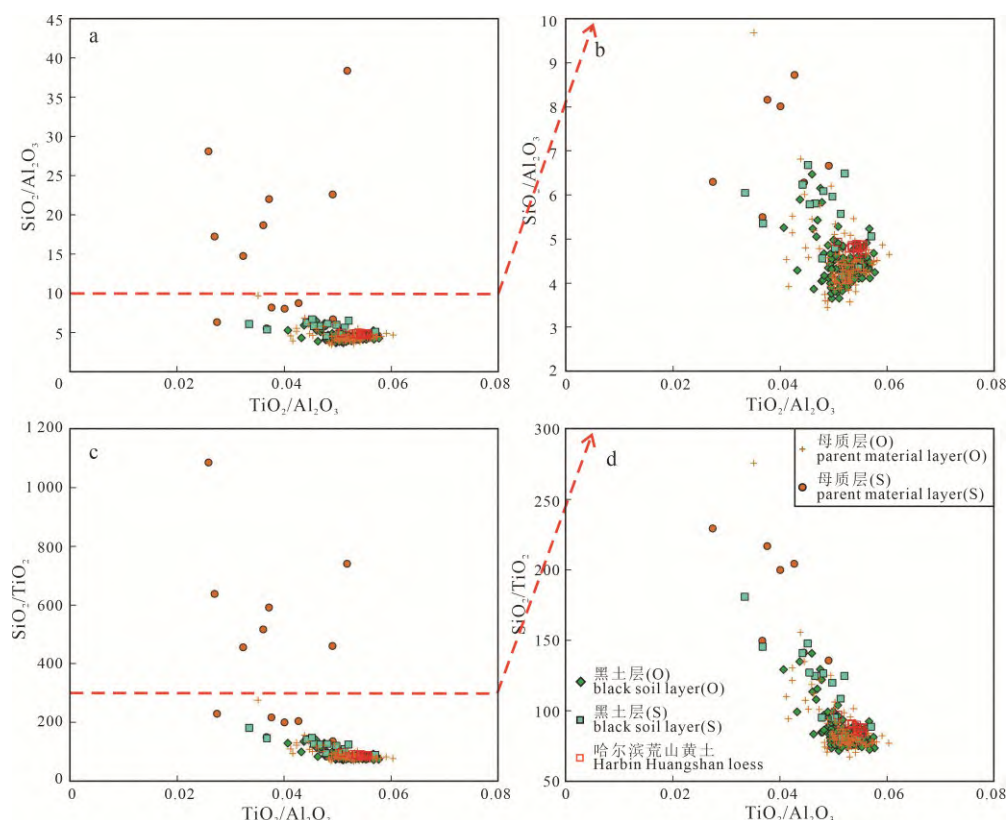


图 6 TiO_2/Al_2O_3 - SiO_2/Al_2O_3 图解(a, b)指示粒度变化特征,
 TiO_2/Al_2O_3 - SiO_2/TiO_2 图解(c, d)指示石英含量变化特征

Fig. 6 TiO_2/Al_2O_3 - SiO_2/Al_2O_3 diagram indicating grain size variation characteristics (a, b) and TiO_2/Al_2O_3 - SiO_2/TiO_2 diagram indicating quartz content variation characteristics (c, d)

区黑土及其母质物质来源的研究工作较少。与哈尔滨黄土不同的是,研究区相对靠近呼伦贝尔沙地。但从图 7 中可以看到,在 $Al/Nb(\times 100)$ - La/Sc 、 Al/Ti - La/Sc 、 Th/Sc - La/Sc 、 Th/Sc - Cr/Th 图解上,绝大部分黑土层(O)、黑土层(S)和母质层(O)样品落于松嫩沙地范围内,极少部分落在科尔沁沙地内,无点位落在呼伦贝尔沙地,这说明研究区黑土及母质的物源主要为哈尔滨黄土,呼伦贝尔沙地对研究区黑土及母质没有物质上的贡献。母质层(S)样品在判别图解上表现得较为分散且无规律,与其他类型样品有显著差异,表明存在成因上的显著区别。

中国风成黄土的物质源区一般被认为是来源于附近的沙地(Xie et al., 2018)。哈尔滨荒山剖面是松嫩平原第四纪地层系统的标准剖面,完整出露了坦途组至下荒山组的连续地层(王永等, 2020)。前人对哈尔滨地区的黄土作了大量研究。吴鹏等(2020)综合分析了哈尔滨荒山黄土的粒度、地球化学、磁化率等特征,确定哈尔滨荒山黄土为风成成因。刘俊贺等(2023)利用元素地球化学分析的方法表明松嫩沙地通过西南风为哈尔滨黄土贡献粉尘。王永等(2020)根据 ^{14}C 年龄和 OSL 年龄推测全新统坦途组底界年龄约为 12 cal ka BP, 顾乡屯组底界年龄约为 79 ka, 哈尔滨组近底部年龄约为 137.4 ka。邵兴坤

等(2024)对来自齐齐哈尔市拜泉县钻孔中 1.4 m 处的风成黄土进行光释光测年,测得年龄为 (71.4 ± 3.8) ka, 3.6 m 处的风成黄土年龄为 (220 ± 14) ka。因此,哈尔滨黄土在接受沉积时研究区黑土层与母质层也在形成,在时空上具有可对比性。此外,研究区与哈尔滨荒山剖面所在位置均处于小兴安岭西部的波状高平原上(王晓光等, 2023)。中国东北整体的地形地貌格局在新近纪早中期便基本形成,第四纪时期构造地貌进一步发展,松辽平原持续下降接受堆积(方洪宾等, 2009)。地形地貌格局会对气候产生显著影响。晚新生代以来亚欧大陆内部干旱化阶段性增强,使得东北地区具备产生、搬运与沉积粉尘物质的条件(曾琳, 2016)。从地理位置上看,呼伦贝尔沙地由于大兴安岭的阻挡,难以为研究区贡献物质。松嫩沙地和科尔沁沙地是研究区的潜在物源,而本次的地球化学数据排除了科尔沁沙地作为主要源区为研究区贡献物质(图 7)。由于水流作用影响,风成黄土经历了一定程度再循环作用过程。黑土下伏为砂土层的点位无一例外的分布于河道附近,且砂土的地球化学性质与其他类型样品有着显著差异,这表明砂土与其他类型样品物源并不一致,结合地形地貌以及河流流向,推测这些砂土主要来源于小兴安岭地区(图 8)。

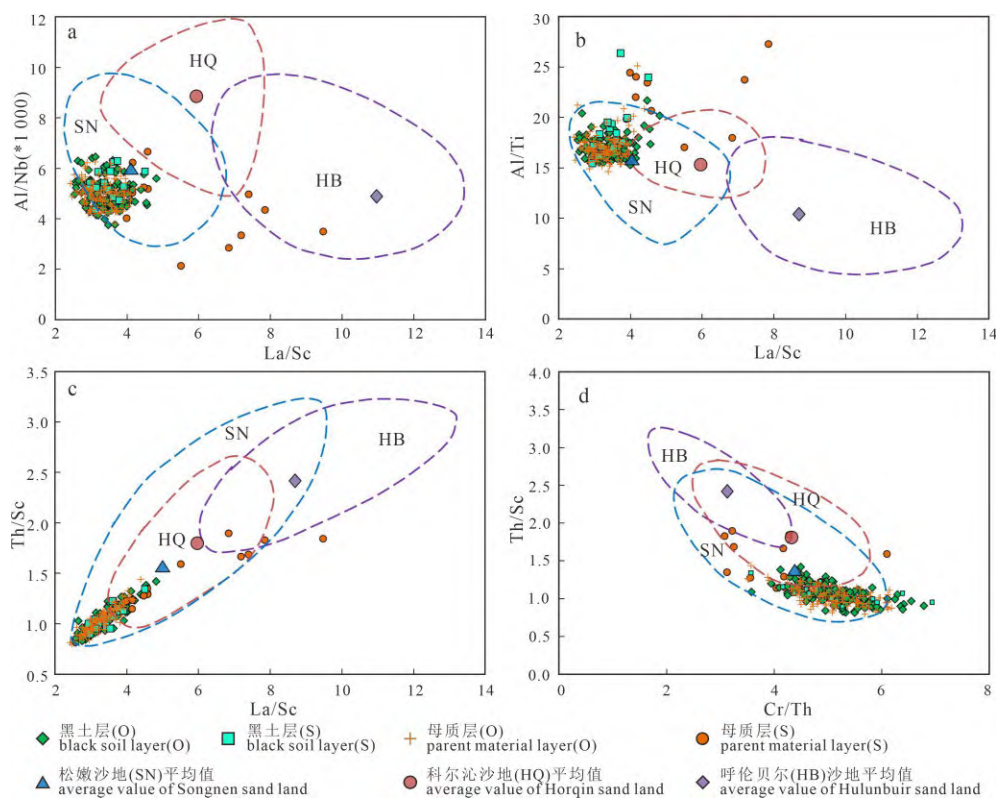


图 7 惰性元素比值示踪物源区图解

Fig. 7 Binary discriminant diagram of inactive element ratio for source region tracing

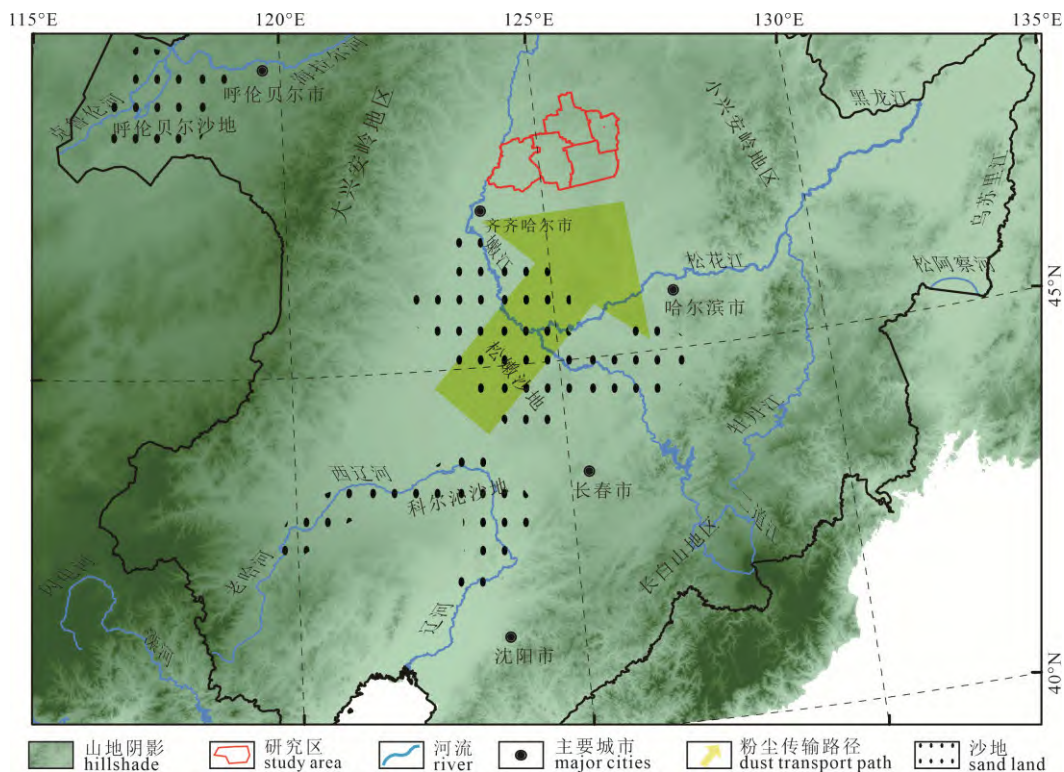


图 8 东北地区主要沙地分布位置及粉尘传输示意图

Fig. 8 Distribution location and dust transport diagram of main sandy land in northeast China

5 结论

(1)研究区黑土层(O)与母质层(O)、黑土层(S)样品具有相似的主量元素和微量元素含量特征以及上地壳标准化曲线分布模式,表明黑土层(O)很可

能是由母质层(O)发育而来, 且与黑土层(S)具有相同源区。

(2)母质层(S)样品的地球化学特征差异性较大,与黑土层(O)与母质层(O)、黑土层(S)样品的地球化学元素含量也存在明显区别,表明母质层(S)样品

与黑土层(O)与母质层(O)、黑土层(S)样品应属于不同源区。

(3)结合地形地貌,黑土层(O)与母质层(O)、黑土层(S)样品为的主要物质源区为松嫩沙地,经风力搬运至研究区,沉积过程中经历了一定程度的再循环作用过程。母质层(S)的物质源区主要来自于小兴安岭。

致谢:衷心感谢两位匿名审稿专家及编辑对文章提出的宝贵修改意见,同时,对参与项目工作的采样人员和实验室分析测试人员表示诚挚的谢意。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20242041).

参考文献:

- 曾琳, 2016. 中国东北地区 1.2 Ma 以来的黄土地层和古气候记录[D]. 南京: 南京大学.
- 崔静怡, 郭利成, 陈雨露, 等, 2021. 松嫩平原全新世黑土¹⁴C年龄-深度关系空间格局[J]. 第四纪研究, 41(5): 1332-1341.
- 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等, 2008. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. 地理研究, 27(3): 527-535.
- 东王刚, 毕志伟, 杨振京, 等, 2023. 华北平原 HS1 钻孔第四纪冲洪积物地球化学特征及古气候意义[J]. 地球学报, 44(6): 1036-1052.
- 窦森, 郭聘, 2018. 吉林省土壤类型分布与黑土地保护[J]. 吉林农业大学学报, 40(4): 449-456.
- 杜慧荣, 2020. 哈尔滨黄土物质组成及其对粉尘物源的指示[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学.
- 方洪宾, 赵福岳, 姜琦刚, 等, 2009. 松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M]. 北京: 地质出版社.
- 韩晓萌, 戴慧敏, 梁帅, 等, 2020. 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, 29(6): 556-563.
- 韩晓增, 李娜, 2018. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 38(7): 1032-1041.
- 郝翔翔, 王翠, 邹文秀, 等, 2023. 典型黑土的黑度与土壤有机质组分关系研究[J]. 土壤学报, 60(5): 1421-1429.
- 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等, 2022. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 37(9): 2264-2276.
- 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等, 2021. 自然资源地表基基层调查技术方法新经验——以保定地区地表基基层调查为例[J]. 西北地质, 54(3): 277-288.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等, 2019. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. 岩石学报, 35(10): 2989-3016.
- 李绪龙, 张霞, 林春明, 等, 2022. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. 高校地质学报, 28(1): 51-63.
- 林旭, 胡程伟, 吴中海, 等, 2023. 江西九江中更新世红土物质来源研究[J]. 地球学报, 44(3): 511-521.
- 刘俊贺, 迟云平, 谢远云, 等, 2023. 松嫩沙地地球化学特征及其对风尘物质贡献的指示[J]. 中国沙漠, 43(3): 252-263.
- 刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等, 2022. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. 地质与资源, 31(3): 434-442, 394.
- 刘希瑶, 刘澎, 刘驰, 2022. 典型黑土中有机质和养分元素的变化分析[J]. 地质与资源, 31(4): 500-507.
- 秦诗涵, 孙继光, 常坤, 等, 2024. 松嫩平原黑土区土壤有机质含量时空变化及其影响因素[J/OL]. 农业资源与环境学报, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0623>.
- 邵兴坤, 侯红星, 任柄璋, 等, 2024. 松嫩平原齐齐哈尔地区拜泉县地表基质特征及其古环境恢复[J]. 地质通报, 43(9): 1498-1514.
- 宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等, 2022. 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, 46(5): 1105-1113.
- 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等, 2021. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 52(3): 695-701.
- 王晓光, 郭晓东, 刘强, 2023. 东北地区地貌分区与第四纪地质图(1:150 万)[M]: 北京: 地质出版社.
- 王永, 董进, 杨劲松, 2020. 哈尔滨荒山剖面第四纪地层研究[J]. 地球科学, 45(7): 2662-2672.
- 王韵瑶, 王玮瑜, 李传松, 等, 2023. 外源有机物对淡黑钙土碳酸盐的干扰效应[J]. 吉林农业大学学报, 45(2): 172-177.
- 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等, 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[J]. 地球学报, 41(3): 420-430.
- 徐磊, 赵萌生, 程琰勋, 等, 2024. 滇中富碱斑岩风化成土过程中元素地球化学行为及其主控因素[J]. 地质论评, 70(2): 512-528.
- 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等, 2023. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 54(2): 495-504.
- 殷志强, 陈自然, 李霞, 等, 2023. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 50(1): 144-151.
- 张仁铎, 2005. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 张新荣, 焦洁钰, 2020. 黑土形成与演化研究现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(2): 553-568.
- 张月馨, 迟云平, 谢远云, 等, 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[J]. 地球学报, 41(4): 525-534.
- 张哲寰, 戴慧敏, 魏明辉, 等, 2024. 黑龙江省逊克平原土壤地球化学基准值与背景值[J/OL]. 地质通报, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20240321.1547.004>.
- 赵玉明, 程立平, 李加加, 等, 2020. 东北典型黑土区的土类界定依据分析[J]. 中国水土保持科学, 18(4): 123-129.
- 中国地质调查局南京地质调查中心, 2014. 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000): DZ/T0258-2014[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国科学院, 2021. 东北黑土地白皮书(2020)[Z]. 北京: 中国科学院.

References:

- Chinese Academy of Sciences, 2021. Northeast Black Land White Paper (2020)[Z]. Beijing: Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- CUI Jingyi, GUO Licheng, CHEN Yulu, et al., 2021. Spatial distribution of ^{14}C age and depth of mollisol sections in the Songnen plain during the Holocene[J]. Quaternary Sciences, 41(5): 1332-1341(in Chinese with English abstract).
- CUI Ming, ZHANG Xudong, CAI Qiangguo, et al., 2008. Relationship between black soil development and climate change and geomorphological evolution in Northeast China[J]. Geographical Research, 27(3): 527-535(in Chinese with English abstract).
- DONG Wanggang, BI Zhiwei, YANG Zhenjing, et al., 2023. Geochemical Characteristics and Paleo- environmental Significance of Quaternary Alluvial-pluvial Deposits in Borehole HS1 in the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(6): 1036-1052(in Chinese with English abstract).
- DOU Sen, GUO Dan, 2018. Soil type distribution and black soil land protection in Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 40(4): 449-456(in Chinese with English abstract).
- DU Huirong, 2020. The material compositions of the Harbin loess deposits and their implications for eolian dust provenances[D]. Harbin: Harbin Normal University.
- FANG Hongbin, ZHAO Fuyue, JIANG Qigang, et al., 2009. Quaternary Geological Environment of the Songliao Plain and Degradation of Black Soil[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- GALLET S, JAHN B M, VAN VLIET LANOË B, et al., 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 156(3-4): 157-172.
- GUO Yulong, YANG Shouye, SU Ni, et al., 2018. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 227: 48-63.
- HAN Xiaomeng, DAI Huimin, LIANG Shuai, et al., 2020. Element geochemistry of the typical black soil sections in Baiquan area, Heilongjiang Province: Environmental implication[J]. Geology and Resources, 29(6): 556-563(in Chinese with English abstract).
- HAN Xiaozeng, LI Na, 2018. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 38(7): 1032-1041(in Chinese with English abstract).
- HAO Xiangxiang, WANG Cui, ZOU Wenxiu, et al., 2023. Study on the relationship between blackness and soil organic matter fractions of typical mollisol[J]. Acta Pedologica Sinica, 60(5): 1421-1429(in Chinese with English abstract).
- HOU Hongxing, GE Liangsheng, SUN Xiao, et al., 2022. A study on the application of ground substrate in the survey and evaluation of China's black soil resources: Based on ground substrate survey in Baoqing, Heilongjiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 37(9): 2264-2276(in Chinese with English abstract).
- HOU Hongxing, ZHANG Shuji, LU Min, et al., 2021. Technology and method of the ground substrate layer survey of natural resources: Taking Baoding area as an example[J]. Northwestern Geology, 54(3): 277-288(in Chinese with English abstract).
- LI Jinyi, LIU Jianfeng, QU Junfeng, et al., 2019. Major geological features and crustal tectonic framework of Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(10): 2989-3016(in Chinese with English abstract).
- LI Xulong, ZHANG Xia, LIN Chunming, et al., 2022. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. Geological Journal of China Universities, 28(1): 51-63(in Chinese with English abstract).
- LIN Xu, HU Chengwei, WU Zhonghai, et al., 2023. Provenance tracing of Middle Pleistocene red earth in the Jiujiang area, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(3): 511-521(in Chinese with English abstract).
- LIU Junhe, CHI Yunping, XIE Yuanyn, et al., 2023. Geochemical characteristics of Songnen Sandy Land and its indication of contribution to aeolian dust[J]. Journal of Desert Research, 43(3): 252-263(in Chinese with English abstract).
- LIU Kai, WEI Minghui, DAI Huimin, et al., 2022. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of Northeast China[J]. Geology and Resources, 31(3): 434-442, 394(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiaobing, LEE BURRAS C, KRAVCHENKO Y S, et al., 2012. Overview of mollisols in the world: Distribution, land use and management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 92(3): 383-402.
- LIU Xiyao, LIU Peng, LIU Chi, 2022. Variation characteristics of organic matters and nutrient elements in typical black soil[J]. Geology and Resources, 31(4): 500-507(in Chinese with English abstract).
- MUHS D R, 2018. The geochemistry of loess: Asian and North American deposits compared[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 155: 81-115.
- Nanjing Center, China Geological Survey, 2014. Specification of multi-purpose regional geochemical survey(1:250 000): DZ/T 0258-2014[S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- QIN Shihan, SUN Jiguang, CHANG Kun, et al., 2024. Spatial-temporal variation of soil organic matter content and its influencing factors in the black soil area of Songnen Plain[J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment, <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0623>(in Chinese with English abstract).
- RUDNICK R L, GAO S, 2003. Composition of the continental crust[M]//Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier: 1-64.
- SHAO Xingkun, HOU Hongxing, REN Bingzhang, et al., 2024.

- Sedimentary characteristics analysis and paleoenvironmental restoration of the ground substrate in Baiquan County, Qiqihar area, Songnen Plain[J]. Geological Bulletin of China, 43(9): 1498-1514(in Chinese with English abstract).
- SONG Yunhong, YANG Fengchao, LIU Kai, et al., 2022. 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, 46(5): 1105-1113(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. The Journal of Geology, 94(4): 57-72.
- WANG Jingkuan, XU Xiangru, PEI Jiubo, et al., 2021. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 52(3): 695-701(in Chinese with English abstract).
- WANG Xiaoguang, GUO Xiaodong, LIU Qiang, 2023. Geomorphological Zoning of the Northeast Region and Quaternary Geological Map (1:1 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Yong, DONG Jin, YANG Jinsong, 2020. Quaternary stratigraphy of the Huangshan section in Harbin[J]. Earth Science, 45(7): 2662-2672(in Chinese with English abstract).
- WANG Yunyao, WANG Weiyu, LI Chuansong, et al., 2023. Interference effect of exogenous organic matter on carbonate in light chernozem[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 45(2): 172-177(in Chinese with English abstract).
- WILDING L, 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[C]//Spatial Variations: 166-194.
- WU Peng, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al., 2020. The genesis of Huangshan loess in Harbin: Integrated evidence from grain size, geochemistry, magnetization, sedimentation and landform[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(3): 420-430(in Chinese with English abstract).
- XIE Yuanyun, YUAN Fang, ZHAN Tao, et al., 2018. Geochemistry of loess deposits in Northeastern China: Constraint on provenance and implication for disappearance of the large Songliao palaeolake[J]. Journal of the Geological Society, 175(1): 146-162.
- XU Lei, ZHAO Mengsheng, CHENG Yanxun, et al., 2024. Geochemical behavior of elements and the main controlling factors during weathering and soil-forming of alkali-rich porphyry in central Yunnan[J]. Geological Review, 70(2): 512-528(in Chinese with English abstract).
- XU Yingde, PEI Jiubo, LI Shuangyi, et al., 2023. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 54(2): 495-504(in Chinese with English abstract).
- YANG Fei, LONG Hao, GONG Keyang, et al., 2023. Onset time and accretionary formation of Mollisols in Northeast China[J]. Science Bulletin, 68(18): 1999-2002.
- YIN Zhiqiang, CHEN Ziran, LI Xia, et al., 2023. Connotation, layering, mapping and supporting objectives of the integrated survey of ground substrates[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 50(1): 144-151(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ganlin, LONG Hao, YANG Fei, 2023. Understanding the formation time of black soils[J]. The Innovation Geoscience, 1(1): 100010.
- ZHANG Renduo, 2005. Spatial Variation Theory and Its Applications[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHANG Shihao, YANG Shiling, XIONG Shangfa, et al., 2024. Origin and depositional background of the Holocene black soil in Northeast China: Evidence from grain-size analysis and optically stimulated luminescence dating[J]. Catena, 239: 107963.
- ZHANG Xinrong, JIAO Jieyu, 2020. Formation and evolution of black soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 50(2): 553-568(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yuexin, CHI Yunping, XIE Yuanyun, et al., 2020. Organic carbon isotope composition of Harbin loess since the mid-Pleistocene and its paleoclimatic significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 525-534(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhehuan, DAI Huimin, WEI Minghui, et al., 2024. Soil geochemical baseline values and background values in Xunke Plain of HeiLongJiang Province[J/OL]. Geological Bulletin of China, <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20240321.1547.004> (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuming, CHENG Liping, LI Jiajia, et al., 2020. Research on the definition of soil types in typical black soil regions of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 18(4): 123-129(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Lin, 2016. Loess stratigraphy and palaeoclimatic records since 1.2 Ma in northeastern China[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese with English abstract).