

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 0040

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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0040>

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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0040>

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

宋运红^{1,2,3}, 杨凤超¹, 刘凯^{1,2,3}, 戴慧敏^{1,2,3}, 许江^{1,2,3}, 韩晓萌^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 黑土剖面中常量元素及其比值的地球化学特征与土壤的形成和发育有很大的关系, 既反映了土壤发生、发育的程度, 又反映了物源区的环境变化, 是松嫩平原环境演化和气候变化的重要地质记录。为了探讨东北典型黑土的成因、成土母质来源以及化学风化的强度, 选择具有代表性的海伦地区 9 条黑土剖面进行了常量元素分析, 并与典型风成堆积物的元素地球化学特征进行对比, 结果表明: ①海伦黑土剖面主要常量元素 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3) 之和以及 UCC 标准化曲线均与典型风成堆积物具有较好的相似性, 表明海伦典型黑土成土母质可能为风成成因; ②化学蚀变指数 CIA 值平均为 63.97, $\text{CIA}-w(\text{Na})/w(\text{K})$ 图解均显示属于初等化学风化程度, 与典型风成堆积物相比, 风化强度顺序为: 哈尔滨荒山黄土 > 镇江下蜀土 > 西峰红黏土 > 海伦黑土 $\approx$ 洛川黄土; ③ 0~30 cm 黑土比 30 cm 以下的黑土具有更高的 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值, 说明晚期海伦典型黑土粒度较粗, 石英含量较高。元素地球化学特征显示, 表层和深层典型黑土的气候环境及物源可能并不完全一致, 在 30 cm 左右发生了变化。

关键词: 海伦典型黑土; 常量元素; 成土母质来源; 化学风化强度; 地球化学

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)05-1105-09

0 引言

黑土地是大自然给予人类的得天独厚的宝藏, 是农业生产的基础, 也是我国粮食安全的保障^[1-3], 它作为耕地中的“大熊猫”, 已经受到了国内外学者的广泛关注, 并且取得了一定的研究成果^[4-6]。一直以来, 土壤学家的研究主要针对黑土质量^[2-3, 7-11]以及黑土的形成时代、气候^[4-6, 12], 但对黑土物源区

的研究几乎为空白。黑土中常量元素的地球化学特征是土壤的重要性质之一, 既继承了地质背景和成土母质的特征, 又反映了物源区的环境变化。因此, 分析黑土剖面中常量元素含量及比值在剖面中的迁移方向和变化情况, 可以更好地反映黑土的形成演化过程。

地球化学元素分析法是示踪黄土以及其他沉积物成因及物源区的常用方法之一^[13-18]。为了探讨东北黑土的形成演化过程, 本次以黑龙江省海伦地

收稿日期: 2022-01-27; **修回日期:** 2022-05-11

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽平原黑土地生态地质调查”(DD20221779)、“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520)

第一作者: 宋运红(1983-), 女, 2009年毕业于吉林大学, 硕士, 高级工程师, 地球化学专业, 主要从事黑土地形成与演化研究工作。Email: yunhong408@163.com

通讯作者: 杨凤超(1982-), 男, 2018年毕业于吉林大学, 博士, 高级工程师, 岩石学、矿物学、矿床学专业, 主要从事土地督察及地质矿产调查研究工作。Email: yangfc123@163.com

区 9 条典型黑土剖面为研究对象,通过对剖面常量元素地球化学特征及其变化的分析,并对比前人对哈尔滨荒山黄土、镇江下蜀土、西峰红黏土、洛川黄土等典型风成堆积物常量元素地球化学研究的结果,探讨海伦典型黑土剖面的成因、化学风化强度以及物源区,从元素地球化学角度为黑土的形成演化提供依据。

1 研究区概况

黑龙江省海伦市位于松嫩平原东部,小兴安岭西麓,处于小兴安岭向松嫩平原的过渡地带,行政区域为绥化市。县内地势从东北到西南由低丘陵、高平原、河阶地、河漫滩依次呈阶梯状逐渐降低,东北部一般海拔在 350~450 m,最高处海拔 490 m。区内属温带大陆性季风气候,冬季干冷漫长,夏季湿热短暂,年平均气温 1.2℃,年降水量 550 mm 左右,大部分集中在 7 月至 8 月,11 月至翌年 4 月为冻结期。

海伦市资源丰富,是世界三大黑土地之一,素有“粮仓”的美誉。通肯河、克音河、海伦河等 5 条河

流横贯东西。西部平原区盛产大豆、玉米、水稻等粮食作物和亚麻、烤烟等经济作物,北部山区盛产红松、白杨等木材和甘草、党参等中药及猴头、蕨菜等山产品,地下蕴藏丰富的煤炭、砂金、矿泉水等矿产资源,因此,海伦享有中国优质大豆之乡、中国高淀粉玉米之乡、中国甜姑娘之乡、中国民间艺术之乡、中国甜菜之乡、中国籽鹅之乡“六乡”美誉,是中国黑土硒都,国家重要的商品粮基地县。

2 样品采集及分析

本次研究的 9 条典型黑土剖面均采自海伦市中南部,在每个典型黑土剖面采样点处均严格按照采样要求进行样品采集,由地表至 200 cm 深度,每 20 cm 等间距连续采集土壤及成土母质样品,共采集样品 78 件。样品采集均严格按照要求,离开公路 200~300 m 距离,在同一采样层位多点采样,组合成一个样品。具体采样位置如图 1 所示。根据野外实地观察,对剖面特征进行了划分:

Ah 层(腐殖质层):20~50 cm,厚者可达 80 cm,

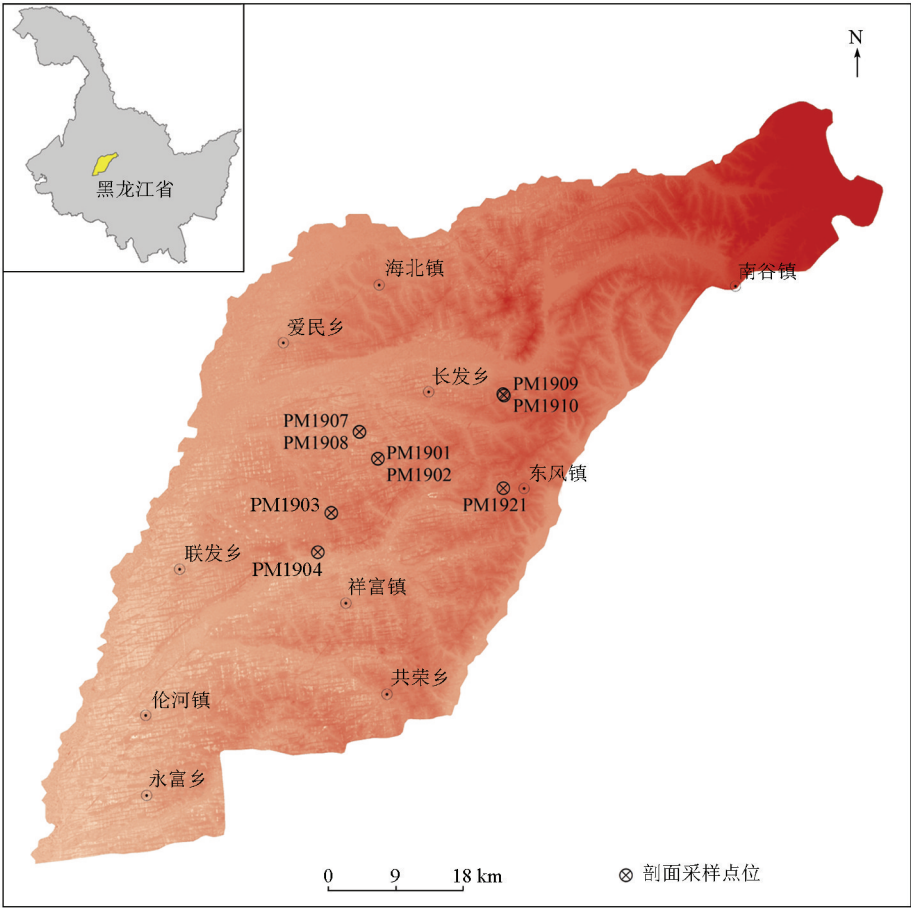


图 1 海伦地区典型黑土剖面采样位置

Fig. 1 The sampling position of typical black soil profile in Hailun area

黑色,潮湿松软,黏壤土,团粒结构,大量木本或草本植物根系。Abs 层(过渡层):厚度不等,在 30~70 cm 左右,暗灰棕色,黏壤土,团块结构,偶见上部腐殖质淋溶的条带。Btq 层(淀积层):50~160 cm,底土母质黏重时层次较薄且距地面较浅,颜色不均一,黄棕色,土体紧实,上部为小棱块状,下部为柱状,偶见铁锰结核。C 层(母质层):为黄褐色黄土状堆积物。

土壤样品装入布袋后风干、敲碎,用尼龙筛筛取 20 目部分,送至辽宁省地质矿产研究院实验室进行常量元素含量分析测试。主要使用 X 荧光光谱法

(XRF)测定,大部分常量元素的测试误差小于 5%。

3 结果分析

表 1 为本次得到的 78 件海伦典型黑土剖面常量元素数据与哈尔滨荒山黄土^[19]、洛川黄土^[20]、镇江下蜀土^[21]、西峰红黏土^[22]以及上部陆壳(UCC)的常量元素平均组成含量比较结果。由表 1 可知,典型黑土剖面主量元素以 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O 为主,四者平均含量之和达 88.38%。SiO₂

表 1 海伦典型黑土剖面及其他地区典型风成堆积物的常量元素含量

Table 1 Element contents of Hailun black soil profile and other aeolian dust deposits										%
剖面号	参数	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	CIA
PM1901 n=7	最小值	65.51	13.53	4.57	2.51	1.71	1.22	1.25	0.77	60.80
	最大值	66.51	15.21	5.41	2.61	1.79	1.54	1.52	0.81	65.03
	平均值	66.05	14.67	5.10	2.56	1.75	1.40	1.33	0.80	63.62
PM1902 n=7	最小值	65.51	13.83	4.69	2.5	1.74	1.24	1.28	0.77	61.68
	最大值	66.32	15.26	5.50	2.6	1.84	1.57	1.44	0.80	64.77
	平均值	65.98	14.77	5.21	2.54	1.78	1.44	1.35	0.80	63.57
PM1903 n=10	最小值	65.34	13.96	4.72	2.49	1.74	1.29	1.30	0.77	61.78
	最大值	66.62	15.14	5.40	2.73	1.96	1.57	1.47	0.80	73.05
	平均值	65.75	14.83	5.15	2.59	1.83	1.46	1.35	0.79	66.42
PM1904 n=7	最小值	65.77	13.71	4.53	2.52	1.80	1.23	1.27	0.77	60.67
	最大值	66.61	15.01	5.38	2.6	1.88	1.49	1.53	0.80	63.83
	平均值	66.19	14.46	5.01	2.54	1.83	1.37	1.37	0.79	62.72
PM1907 n=11	最小值	65.52	13.78	4.53	2.51	1.70	1.24	1.19	0.78	61.69
	最大值	66.17	15.09	5.50	2.68	1.81	1.48	1.42	0.81	65.31
	平均值	65.89	14.72	5.17	2.55	1.75	1.39	1.28	0.80	63.94
PM1908 n=10	最小值	65.56	14.02	4.46	2.54	1.69	1.20	1.21	0.78	62.17
	最大值	66.27	15.07	5.44	2.62	1.91	1.58	1.37	0.81	64.56
	平均值	65.93	14.69	5.08	2.58	1.80	1.42	1.28	0.80	63.61
PM1909 n=9	最小值	65.43	13.42	4.62	2.47	1.59	1.23	1.24	0.76	60.55
	最大值	66.69	14.73	5.26	2.66	1.97	1.35	1.64	0.81	63.94
	平均值	66.14	14.18	4.92	2.59	1.77	1.28	1.43	0.79	62.31
PM1910 n=10	最小值	65.67	13.67	4.64	2.53	1.71	1.24	1.17	0.78	60.47
	最大值	66.87	15.07	5.38	2.61	1.95	1.49	1.47	0.82	65.29
	平均值	66.24	14.57	5.12	2.58	1.84	1.39	1.24	0.80	63.40
PM1921 n=10	最小值	65.9	13.25	4.29	2.52	1.75	1.15	1.15	0.77	60.58
	最大值	67.87	14.86	5.39	2.71	2.01	1.57	1.39	0.82	63.61
	平均值	66.58	14.38	5.07	2.61	1.93	1.41	1.27	0.80	62.44
荒山黄土 n=62	最小值	55.74	16.98	3.03	2.75	1.51	1.56	0.72		
	最大值	66.70	21.97	4.85	3.19	2.45	2.07	1.01		
	平均值	60.85	19.47	4.22	3.00	1.84	1.88	0.87		74.66
洛川黄土 n=12	平均值	66.4	14.2	4.81	3.01	1.66	2.29	1.02		63.73
镇江下蜀土 n=54	平均值	68.07	13.32	5.3	2.35	0.92	1.61	1		70.45
西峰红黏土 n=5	平均值	63.75	15.05	5.28	3	1.16	2.89	0.9		69.11
上陆壳(UCC)	平均值	66.00	15.20	5.00	3.40	3.90	2.20	4.20		47.92

含量范围为 65.34%~67.87%, 平均 66.08%, 变异系数为 0.54%; Na_2O 含量范围为 1.59%~2.01%, 平均 1.81%, 变异系数为 3.31%; Al_2O_3 含量范围为 13.25%~15.26%, 平均 14.59%, 变异系数为 3.13%; Fe_2O_3 含量范围为 4.29%~5.50%, 平均 5.09%, 变异系数为 5.34%; K_2O 含量范围为 2.47%~2.73%, 平均 2.57%, 变异系数为 1.80%; CaO 含量范围为 1.15%~1.64%, 平均 1.32%, 变异系数为 6.26%; MgO 含量范围为 1.15%~1.58%, 平均 1.40%, 变异系数为 7.07% (表 1)。常量元素平均含量由高到低的顺序为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{CaO}$ 。剖面各层均以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 平均含量最高, 其次是 K_2O 和 Na_2O , 平均含量最低的是 CaO 。一般而言, 土壤中 CaO 主要以碳酸钙的形式存在, 在温湿的环境下, 碳酸钙溶解, 而在干冷的环境下, 碳酸钙生成^[23]。因此温湿的气候环境可能是典型黑土中 CaO 含量低的主要原因。常量元素变异系数均小于 10%, 表明其含量变化相对稳定。

4 讨论

4.1 常量元素含量特征及分布模式

图 2 为选取的 7 条海伦典型黑土剖面常量元素

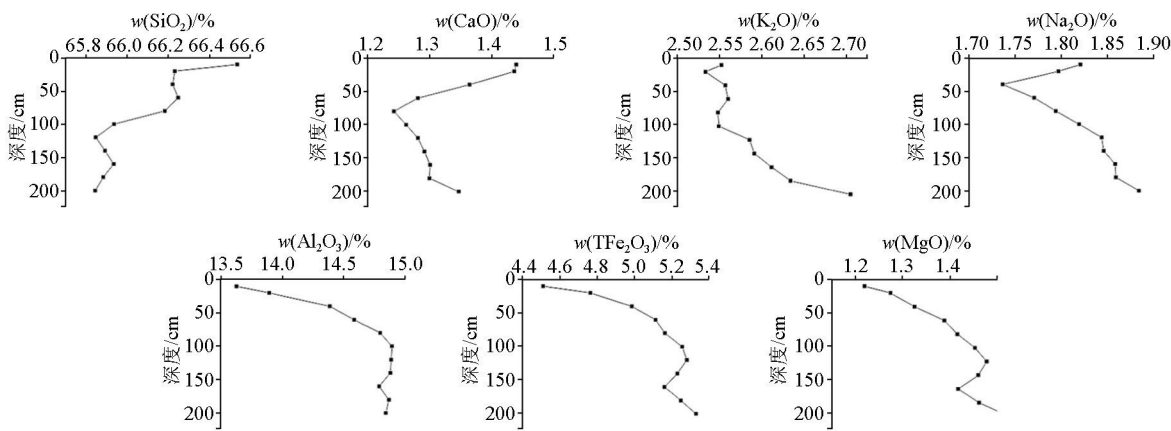


图 2 海伦黑土剖面常量元素分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of major elements in Hailun black soil profile

表 2 海伦黑土剖面常量元素含量相关系数

Table 2 Correlation coefficient of element contents in Hailun Black soil profile

指标	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
SiO_2	1						
Al_2O_3	-0.865 **	1					
TFe_2O_3	-0.894 **	0.984 **	1				
MgO	-0.917 **	0.949 **	0.973 **	1			
CaO	0.578 **	-0.888 **	-0.823 **	-0.747 **	1		
Na_2O	-0.654 **	0.398	0.412 **	0.583 **	-0.132 **	1	
K_2O	-0.638 **	0.479	0.546	0.667	-0.111 **	0.755	1

注: “*”表示置信度为 0.01 时, 相关性显著; “*”表示置信度为 0.05 时, 相关性显著。

含量随深度变化图。从剖面图中可以看出, 海伦典型黑土常量元素在垂直方向上分布波动较明显。随着深度的增大, 总体表现为 SiO_2 含量降低, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 含量升高的趋势; Na_2O 表现为淋溶层降低, 淀积层升高的变化规律, 淋溶作用显著, 显示了易移动元素的迁移特征; Fe_2O_3 、 MgO 含量从腐殖质层到淀积层缓慢增加, 在母质层先降低后增加; 整体上 SiO_2 和 Al_2O_3 比较稳定, 其他元素变化不明显。通过对比海伦黑土成土母质和其他地区典型风成堆积物常量元素的平均化学组成可知, 典型黑土化学组成与典型风成堆积物类似, 主要化学成分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 之和与风成堆积物接近, 表明海伦典型黑土成土母质可能为风成成因。

对海伦典型黑土剖面的常量元素进行了相关分析 (表 2)。结果表明, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 MgO 之间呈明显正相关关系, 且随深度具有相似的变化趋势 (图 2), Fe_2O_3 与 Al_2O_3 、 MgO 的相关系数高达 0.984、0.973; SiO_2 含量与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 含量呈明显负相关关系。

在化学风化过程中, 活动性元素容易淋失, 所以稳定元素会相对富集, 通常通过样品中常量元素与地球上部陆壳 (upper continental crust, UCC) 含量的比值来评价常量元素相对 UCC 的亏损与富集程

度,比值大于 1 为相对富集,小于 1 为相对亏损。海伦黑土剖面具有富 Si、Fe,贫 Mg、Ca、Na、K 的特征, Si、Fe 呈现一定程度的富集,Al 稍显亏损但与 UCC 接近,这表明海伦黑土成土母质来源于上陆壳,并经过充分混合。Na、Ca 的亏损可能是大陆化学风化的效应。通过对比其他典型风成堆积物常量元素 UCC 标准化结果可知,UCC 标准化后的海伦典型黑土和典型风成堆积物具有良好的相似性,再次佐证了典型黑土成土母质为风成成因。

图 3 为海伦典型黑土及其他风成堆积物的 UCC 标准化曲线分布。通过将海伦剖面与洛川黄土、镇江下蜀土、西峰红黏土、哈尔滨荒山黄土等典型风成堆积物常量元素 UCC 标准化后对比可知,海伦黑土剖面与这些典型风成堆积物具有较好的相似性,化学组成基本相似,UCC 标准化曲线变化趋势较为一致,表现为 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O 接近于 UCC,无明显的亏损或富集,Na₂O、CaO 位于 UCC 下面,处于明显的亏损状态,说明其成因的相似性,即海伦典型黑土可能为风成成因。

4.2 化学风化程度

化学风化指数CIA及w(Na)/w(K)比值是目

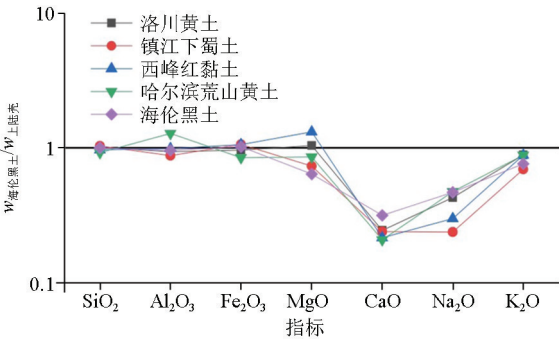


图 3 海伦黑土成土母质与其他风成堆积物常量元素的 UCC 标准化曲线分布模式

Fig. 3 UCC-normalized pattern of elements of the Hailun black soil parent material and other aeolian dust deposits

前衡量沉积物化学风化程度的最常用的指标^[23],其中 CIA 计算公式为

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O} \times 100, \quad (1)$$

式中:氧化物均为分子摩尔数;CaO*为硅酸盐矿物中的摩尔含量,采用 McLennan 计算方法^[24]。CIA 反映了长石风化成黏土矿物的程度,CIA 值越高,指示气候温暖湿润,风化程度越高;反之,寒冷干燥,风化程度低。

一般而言,CIA 值为 50~65,指示初等化学风化程度,气候条件寒冷、干燥;CIA 值为 65~85,指示中等化学风化程度,气候条件为温暖、湿润^[25-28]。海伦典型黑土剖面 CIA 值在 61.91~64.96,平均值为 63.97(表 1),属于初等风化程度(图 4),其中 0~30 cm 平均值为 61.48,30 cm 以下平均值为 63.64。与典型风成堆积物、上陆壳(UCC)和陆源页岩相比,海伦黑土成土母质的 CIA 平均值远高于上陆壳(UCC)的 47.92,明显小于西峰红黏土的 69.11、陆源页岩的 70.36、镇江下蜀土的 70.45 以及哈尔滨荒山黄土的 71.6,与洛川黄土的 63.73 最接近(表 1)。海伦黑土成土母质及以上几种典型风成堆积物及 UCC 和陆源页岩的风化强度顺序为:哈尔滨荒山黄土>镇江下蜀土≈陆源页岩>西峰红黏土>海伦黑土≈洛川黄土>>上陆壳(UCC)。不同深度的海伦典型黑土的化学风化程度均显著低于其他典型的风成堆积物(除洛川黄土外),化学风化程度的差异,可能反映了海伦典型黑土与其他典型风成堆积物的物源并不完全一致。由图 4a 可以看出,海伦黑土成土母质 0~30 cm 化学风化程度较 30 cm 以下较弱,反映 0~30 cm 黑土形成的气候条件较深处更寒冷、干燥,指示晚期海伦典型黑土寒冷干燥的气候环境。

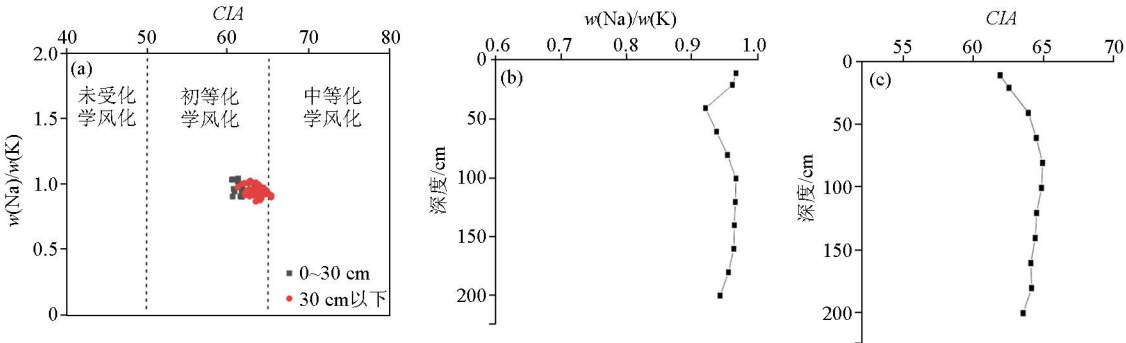


图 4 海伦黑土成土母质化学风化参数 CIA—w(Na)/w(K) 关系散点图(a)以及 w(Na)/w(K)(b)、CIA(c) 随深度变化特征

Fig. 4 Scatter diagram of CIA—w(Na)/w(K) molar ratio of the Hailun Black soil parent material(a), and variation of w(Na)/w(K)(b) and CIA(c) in Hailun area

4.3 稳定元素比值特征

土壤中常量元素的含量与比值特征与土壤的形成和发育有很大的关系,能反映土壤发育的程度。 SiO_2 、 Al_2O_3 和 TiO_2 3 种常量元素在土壤中的含量变化较小,在风化及成土过程中比较稳定,一般不会随着风化作用而流失^[14,29-31],它们的比值在风化过程中保持不变^[15,32-34],因此具有良好的物源指示意义,在黄土物源的研究中已被广泛应用^[14-18]。

Yang 等^[35]认为,科尔沁沙地全新世演化过程划分为 3 个阶段:10 kaBP 以前以流动沙丘为主,10~8 kaBP 由流动向半流动一半固定转变,8~3 kaBP 砂质古土壤发育、沙地固定;3 kaBP 左右土壤活化,之后经历频繁的固定和活化过程。根据海伦¹⁴C 年龄结果,<30 cm 的年龄结果为 260~2 245 aBP,30 cm 以上的年龄结果为 3 300~7 850 aBP,故推测晚期海伦黑土的成土母质接受风积作用明显。

根据前人对黄土的研究^[14,36], SiO_2 一般在粗颗粒物质中富集而 Al_2O_3 则在细颗粒物质中富集。随着与物源距离的增大,风成堆积物的粒度会逐渐减小, $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值也会逐渐降低^[15],因此

被用作研究粒度的替代性指标^[14-15,36]。而 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值几乎不受粒度大小及风化作用的影响,也是研究风成堆积物物源的重要指标^[15,34]。在 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解(图 5a)中,海伦 0~30 cm 黑土中 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值明显偏高,反映其粒度可能偏大,推测表层与深层黑土的物源并非完全一致。

从元素地球化学的角度来看, $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 主要反映的是石英含量的变化,是一种对原始粉尘粒度更为灵敏的指标^[14,37-38]。在 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 图解(图 5b)中,0~30 cm 深度的海典型黑土比 30 cm 以下的黑土具有更高的 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$,说明晚期海伦典型黑土中石英含量增加,粒度增大,暗示海伦黑土成土母质 0~30 cm 含有较多近源成分。从图中还可以看出,不同深度的海伦典型黑土 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值明显不同。 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值在不同深度典型黑土中的改变,可能反映了海伦黑土成土母质在 30 cm 左右物源的变化。

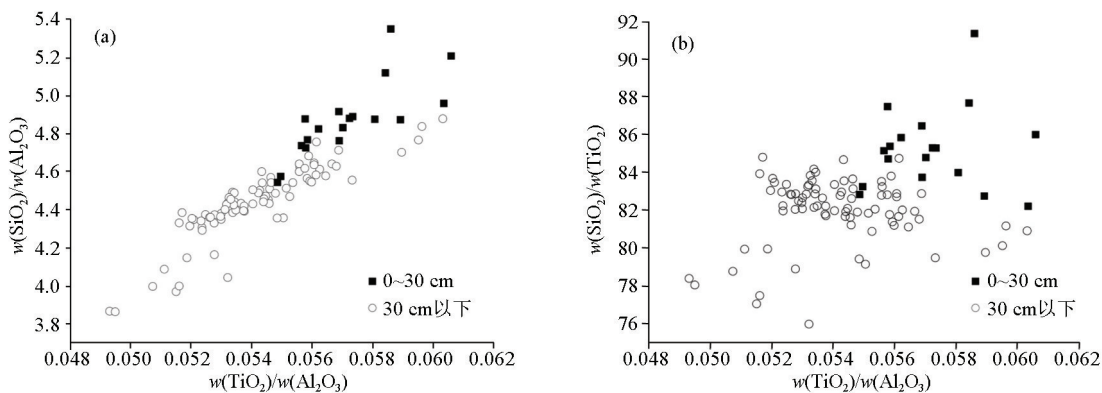


图 5 海伦黑土成土母质的 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (a) 和 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ — $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ (b) 图解
Fig. 5 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ versus $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (a) and $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ versus $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ (b) plots for the Hailun Black soil parent material

研究典型黑土的物源是一个复杂的科学问题,常量元素较难准确地示踪出东北风成堆积物及其潜在源区的细微差别^[23,39]。本次常量元素的分析仅仅对海伦典型黑土物源进行了初步的探讨,后续还将继续开展粒度、稀土元素等研究工作。

5 结论

本次获得了黑龙江海伦地区多个典型黑土剖面常量元素分析结果,通过上部陆壳(UCC)标准化对比、化学风化程度(CIA 值、 $w(\text{Na})/w(\text{K})$)研究以及

稳定元素($w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{TiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$)比值的分析,得到如下结果:

1) 元素地球化学特征显示,典型黑土化学组成与其他典型风成堆积物类似,主要化学成分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 之和与风成堆积物接近,UCC 标准化后的海伦典型黑土和典型风成堆积物具有良好的相似性,表明典型黑土成土母质可能为风成成因。

2) 海伦典型黑土 CIA 值平均为 63.97,属于初等风化程度,其中 0~30 cm 化学风化程度较 30 cm 以下弱,反映 0~30 cm 黑土形成的气候条件较深处更寒冷、干燥,指示晚期海伦典型黑土寒冷干燥的气

候环境。

3) 0~30 cm 黑土比 30 cm 以下的黑土具有更高的 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$, 说明晚期海伦典型黑土中石英含量增加, 粒度增大, 暗示海伦黑土成土母质 0~30 cm 含有较多近源成分, 稳定元素的比值在不同深度的变化, 可能反映了海伦黑土成土母质在 30 cm 左右物源的变化, 表层和深层典型黑土母质的物源并非完全相同。

参考文献 (References):

[1] Powlson 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: 72–87.

[2] 宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 东北松辽平原 35 年来耕地土壤全氮时空变化最新报道[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 332–333.

Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Songliao Plain in Northeast China during the past 35 years[J]. Geology in China, 2021, 48(1): 332–333.

[3] Song Y H, Dai H M, Yang F C, et al. A preliminary study on soil degradation and nutrient imbalance of typical black soil in Northeast China[C]//Proceedings of the 6th Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development, 2018: 328–335.

[4] 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及其时代和古气候意义[J]. 地质通报, 2020a, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20201015.0930.002.html>.

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 Paleoclimatic Significances[J]. Geological Bulletin of China, 2020a, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20201015.0930.002.html>.

[5] 宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 东北松辽平原典型黑土—古土壤剖面 AMS¹⁴C 年龄首次报道[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1926–1927.

Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. The first reported of the AMS¹⁴C age of typical black soil mollisol—Paleosol profile of Songliao Plain[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1926–1927.

[6] 张新荣, 平帅飞, 焦洁钰, 等. 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[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2020, 50(2): 465–479.

Zhang X R, Ping S F, Jiao J Y, et al. Characteristics of magnetic susceptibility, grain size and chromaticity of modern sediments in the southern margin of Songnen Plain and their paleoclimate environment significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2020, 50(2): 465–479.

[7] 宋运红, 张哲寰, 杨凤超, 等. 黑龙江海伦地区垦殖前后典型黑土剖面主要养分元素垂直分布特征[J]. 地质与资源, 2020, 26(6): 543–549.

Song Y H, Liu Z K, Yang F C, et al. Vertical distribution characteristics of main nutrient elements in typical black soil profile before and after reclamation in Helun Area, Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2020, 26(6): 543–549.

[8] Song Y H, Dai H M, Yang F C, et al. Temporal and spatial change of soil organic matter and pH in cultivated land of the Songliao Plain in Northeast China during the past 35 years[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2019, 93(S1): 142–143.

[9] 史文娇, 汪景宽, 魏丹, 等. 黑龙江省南部黑土区微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 342–347.

Shi W J, Wang J K, Wei D, et al. Spatial variability of soil trace elements in black soil region of south Heilongjiang province and its affecting factors: A case study of Shuangcheng city[J]. Acta pedologica sinica, 2009, 46(2): 342–347.

[10] 贾树海, 张佳楠, 张玉玲, 等. 东北黑土区旱田改稻田后土壤有机碳、全氮的变化特征[J]. 中国农业科学, 2017, 50(7): 1252–1262.

Jia S H, Zhang J N, Zhang Y L, et al. Changes of the characteristics of soil organic carbon and total nitrogen after conversion from upland to paddy field in black soil region of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(7): 1252–1262.

[11] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032–1041.

Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032–1041.

[12] 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 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, 2008, 27(3): 527–535.

Cui M, Zhang X D, Cai Q G, et al. Relationship between black soil development and climate change and geomorphological evolution in Northeast China[J]. Geographical Research, 2008, 27(3): 527–535.

[13] 綦琳, 乔彦松, 王燕, 等. 南京下蜀土的地球化学特征及其物源指示意义[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 190–202.

Qi L, Qiao Y S, Wang Y, et al. Geochemical characteristics of the Xiashu loess-palaeosol sequence in Nanjing and their implications for provenance[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 190–202.

[14] 陈立业, 张珂, 傅建利, 等. 邳山黄土 L5 以来的常量元素地球化学特征及其对物源的指示意义[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6): 1293–1308.

Chen L Y, Zhang K, Fu J L, et al. Major element geochemical characteristics of Mangshan loess since L5 and its implications for provenance[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6): 1293–1308.

[15] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of Middle Pleistocene loess deposits in Southern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(23/24): 3317–3326.

[16] 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.

[17] Li Y, Song Y G, Chen X L, et al. Geochemical composition of

- Tajikistan loess and its provenance implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 446: 186–194.
- [18] Zhang L, Qin X G, Liu J Q, et al. Geochemistry of sediments from the Huaibei Plain (East China): Implications for provenance, weathering, and invasion of the Yellow River into the Huaihe River [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 121: 72–83.
- [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: 地球科学*, 1997, 27(6): 531–536.
- Chen J, Ji J F, Chou G, et al. Geochemical study on chemical weathering degree of loess in Luochuan, Shaanxi Province[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 1997, 27(6): 531–536.
- [21] Chen Y Y, Li X S, Han Z Y, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 341–352. doi:10.1007/s11442-008-0341-9.
- [22] 陈旻, 陈骏, 刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征[J]. *地质力学学报*, 2001, 7(2): 167–175.
- Chen Y, Chen J, Liu L W. Chemical composition and characterization of chemical weathering of late tertiary red clay in Xifeng, Gansu Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(2): 167–175.
- [23] 毛欣, 刘林敬, 李长安, 等. 丰宁黄土—古土壤剖面常量元素地球化学特征[J]. *地球科学*, 2017, 42(10): 1750–1759.
- Mao X, Liu L J, Li C A, et al. Elemental composition features of loess-paleosol profile in Fengning, Hebei Province[J]. *Earth Science*, 2017, 42(10): 1750–1759.
- [24] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295–303.
- [25] 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. Elemental geochemistry characteristics and environmental indication of typical black soil profile in Baiquan Area, Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 556–563.
- [26] 王攀, 宁凯, 石迎春, 等. 吴起全新世土壤剖面常量元素地球化学特征[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1261–1268.
- Wang P, Ning K, Shi Y C, et al. Geochemical characteristics of major elements of holocene soil from Wuqi, Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1261–1268.
- [27] 徐树建, 倪志超, 丁新潮. 山东平阴黄土剖面常量元素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(2): 353–359.
- Xu S J, Ni Z C, Ding X C. Geochemical characteristics of major elements of the Pingyin loess in Shandong Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(2): 353–359.
- [28] Blanca B, Maria J M, Constanza F N, et al. Geochemistry of pre-cambrian and paleozoic siliciclastic rocks from the iberian range (NE Spain): Implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting [J]. *Chemical Geology*, 2000, 168(1): 135–150. doi:10.1016/S0009-2541(00)00192-3.
- [29] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 71–133.
- Wen Q Z. Loess geochemistry in China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 71–133.
- [30] 李欢, 黄勇, 张沁瑞, 等. 北京平原区土壤地球化学特征及影响因素分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(2): 502–516.
- Li H, Huang Y, Zhang Q R, et al. Soil geochemical characteristics and influencing factors in Beijing Plain [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2): 502–516.
- [31] 刘银飞, 孙彬彬, 贺灵, 等. 福建龙海土壤垂向剖面元素分布特征[J]. *物探与化探*, 2016, 40(4): 713–721.
- Liu Y F, Sun B B, H L, et al. Distribution characteristics of elements in vertical soil profile in Longhai, Fujian province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(4): 713–721.
- [32] Gallet S, Jahn B, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(14): 67–88.
- [33] Chen J, An Z S, Liu L W, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2001, 44(5): 403–413.
- [34] 顾兆炎, 丁仲礼, 熊尚发, 等. 灵台红粘土和黄土—古土壤序列的地球化学演化[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(4): 357–365.
- Gu Z Y, Ding Z L, Xiong S F, et al. A seven million geochemical record from Chinese red-clay and loess-paleosol sequence: Weathering and erosion in northwestern China [J]. *Quaternary sciences*, 1999, 19(4): 357–365.
- [35] Yang L H, Zhou J, Lai Z P, et al. Lateglacial and Holocene dune evolution in the Horqin dunefield of northeastern China based on luminescence dating [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296: 44–51.
- [36] Peng S Z, Guo Z T. Geochemical indicator of original eolian grain size and implications on winter monsoon evolution [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2001, 44(1): 261–266.
- [37] Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of Central China during the last 130,000 yr [J]. *Quaternary Research*, 1995, 43(1): 22–29.
- [38] An Z S, Porter S C. Millennial scale climatic oscillations during the last interglaciation in Central China [J]. *Geology*, 1997, 25(7): 603–606.
- [39] Chen J, Li G. Geochemical studies on the source region of asian dust [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1279–1301. doi:10.1007/s11430-011-4269-z.

Geochemical characteristics of major elements in the black soil profiles of the Hailun area, Heilongjiang Province and their implications for provenance

SONG Yun-Hong^{1,2,3}, YANG Feng-Chao¹, LIU Kai^{1,2,3}, DAI Hui-Min^{1,2,3}, XU Jiang^{1,2,3}, HAN Xiao-Meng^{1,2,3}

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory for Evolution and Ecological Effect in Black Land, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory for Evolution and Ecological Effect in Black Land of Liaoning Province, Shenyang 110034, China)

Abstract: The geochemical characteristics of the major elements in the black soil profiles and their ratios are closely related to the formation and development of the soil. They reflect the degree of the formation and development of soil as well as the environmental changes in the provenance areas. Moreover, they are important geological records of environmental evolution and climate change in the Songnen Plain. To explore the origin, provenance, and chemical weathering intensity of the typical black soil in northeast China, this study analyzed the major elements of nine representative black soil profiles in the Hailun area and then compared these elements with the element geochemical characteristics of typical aeolian deposits. The results are as follows. ①The sum of the content of the major elements (SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3) and the UCC standardized curve of the Hailun black soil profiles were highly similar to those of typical aeolian deposits, indicating that the typical black soil in Hailun is aeolian; ②The average chemical index of alteration (CIA) was 63.97. The CIA-Na/K diagrams all indicated a low degree of chemical weathering. By comparison with the weathering intensity of typical aeolian deposits, the weathering intensity of the soil was in the order of loess in Huangshan, Harbin > loess in Xiashu, Zhenjiang > red clay in Xifeng > black soil in Hailun $\approx$ loess in Luochuan; ③The black soil at a depth of 0~30 cm has higher $w(\text{SiO}_2)/w(\text{TiO}_2)$ and $w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ratios than the black soil below 30 cm, indicating that the late typical black soil in Hailun has a coarser grain size and higher quartz content. The geochemical characteristics of the major elements indicate that the typical black soil in the surface layer and the deep layer may not have the same climate, environment, and provenance conditions, which may change at a depth of approximately 30 cm.

Key words: typical black soil in Hailun; major elements; provenance; chemical weathering intensity; geochemistry

(本文编辑:蒋实)