

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

韩晓萌^{1,2}, 戴慧敏^{1,2}, 梁 帅^{1,2}, 刘 凯^{1,2}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 地表中元素的地球化学行为与自然环境密切相关, 土壤中元素分布的变化记录了其形成时的环境特征。以拜泉地区典型黑土剖面为对象, 对其常量、微量元素的分布规律及其蕴含的环境信息进行研究, 探讨了研究区土壤剖面风化程度及剖面形成过程中气候演化特征。结果表明, 拜泉土壤剖面常量元素含量除 SiO_2 和 Na_2O 外, 总体上高于东北平原平均值; 化学蚀变指数(CIA)平均值为 58, 硅铝铁率(Saf)值较高, 属于弱风化强度。植物生长所必需的微量元素 N、P、S、Mn、B、I、Ge、Se 和 Mo 等在温暖气候条件下, 在表层和淀积层积累, 含量较高, 在淋溶层和母质层含量较低; 寒冷干燥条件下, 在表层积累。金属微量元素与 Fe 元素具有较强的相关性, 说明其垂向组分不仅受气候条件控制, 同时受常量元素控制。常量元素迁移规律表明, 剖面腐殖层土壤成熟度高, 成土过程中以温暖湿润气候为主; 淀积层可能处于脱 Na、Ca 阶段, 成土过程中气候相对寒冷干燥。

关键词: 黑土剖面; 常量元素; 微量元素; 风化作用; 气候环境; 黑龙江省

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.008

ELEMENT GEOCHEMISTRY OF THE TYPICAL BLACK SOIL SECTIONS IN BAIQUAN AREA, HEILONGJIANG PROVINCE: Environmental Implication

HAN Xiao-meng^{1,2}, DAI Hui-min^{1,2}, LIANG Shuai^{1,2}, LIU Kai^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China

Abstract: The geochemical behavior of elements in earth surface is closely related to natural environment, and the change of element distribution in soil records the environmental characteristics during its formation. Focusing on the typical black soil sections in Baiquan area, the paper studies the distribution rule of major and trace elements and its implied environmental information, and discusses the weathering degree of the soil sections and climatic evolution characteristics during the formation of section. The results show that except SiO_2 and Na_2O , the content of major elements in the soil sections is generally higher than that in Northeast Plain. The average chemical index of alteration (CIA) is 58, with high Saf value, belonging to weak weathering. The trace elements essential for plant growth, such as N, P, S, Mn, B, I, Ge, Se and Mo, accumulate under warm climatic condition, with high content in surface and illuvial layers, and low in eluvial layer and parent material layer; while under cold and dry conditions, they accumulate on the surface. The strong correlation between metal trace elements and Fe indicates that its vertical component is controlled not only by climatic conditions, but also by major elements. The migration rule of major

收稿日期:2020-09-03;修回日期:2020-09-22. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”项目(编号 DD20190520).

作者简介:韩晓萌(1990—),女,博士,工程师,主要从事地球化学研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail/han-xiaomeng@qq.com

elements reveals the soil in humus layer is of high maturity, mainly formed in a warm and humid climate. The illuvial layer may be at the removal stage of Na and Ca, with soil formed in a relatively cold and dry climate.

Key words: black soil section; major element; trace element; weathering; climate environment; Heilongjiang Province

0 引言

土壤形成和发育过程中,成土母质、地形条件、生物过程和气候条件等因素相互影响,使土壤中地球化学元素表现出复杂性和多样性。地表中元素的地球化学行为(如赋存状态、迁移过程、沉淀特征)与化学风化过程密切相关,而风化过程受控于气候环境的变化,因此土壤中地球化学元素分布及变化规律记录了其形成时的化学风化及气候环境特征^[1-2]。

黑土是一种腐殖质层厚、自然肥力高的土壤类型。黑土的成土母质主要是第四纪黄土状沉积物^[3-4]。土壤母质是土壤形成的物质基础,其化学组成、矿物组成及机械组成影响了土壤的形成及性质。土壤剖面的形成主要受气候、地形、母岩、生物和水等因素控制,不同地理条件形成的土壤剖面各异^[5-6]。因此,对土壤垂向剖面及其成土母质的质地、地球化学元素特征、物理化学性质以及矿物成分等的研究,可以提供土壤形成的气候环境、地质背景、成土作用等重要信息。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,由于不合理的开垦、耕作,加之特有的气候、地貌条件,黑土区土壤侵蚀严重,黑土资源出现明显的退化现象^[7]。因此黑土形成演化、合理利用及防治保护成为近年来的农业和地质科学研究的热点。张明瑶等^[8]通过研究鸭绿江冲积平原土壤剖面常量元素的特征,揭示鸭绿江流域黑土风化过程及气候变化信息;陆继龙等^[3-4]通过对吉林地区黑土常量和微量元素地球化学特征及其影响因素的研究,为该区黑土持续利用、合理施肥提供科学依据;佟宝辉等^[9]研究了吉林省中部黑土区土壤微量元素分布及空间变异规律。这些研究成果主要反映了东北典型黑土区南部地球化学元素特征,但是,目前对于黑土区北部研究有限,且对典型黑土剖面微量元素特征、风化强度等研究相对缺乏。因此,本文以拜泉地区典型黑土剖面为研究对象,对其常量元素、微量元素的分布规律及其蕴含的环境信息进行研究,以期探索该区黑土风化成壤过程以及了解古环境气候信息提供科学依据。

1 研究区概况

拜泉县位于北纬 47°17'~47°54'、东经 125°29'~126°31',地处黑龙江省西部,小兴安岭南麓、松嫩平原北缘。区内地形特征是东北高西南低,东部和中部属于小兴安岭山前高平原,被沟谷切割,地形起伏较大,呈波状和岗阜状,逐渐过渡到西南低平原地带,地势起伏不大,较为平坦,沿双阳河两岸有一部分漫滩地^[10-11]。

该区自然资源丰富,主要河流有乌裕尔河、双阳河和宝泉河,均为季节性河流。属寒温带大陆性季风气候,四季变化明显。冬季受西伯利亚冷空气侵袭,寒冷干燥,土壤冻结时间长,日照时间短。夏季受海洋季风的影响,气候温热多雨。春季多风少雨,秋季凉爽干燥。全年日照时间长,无霜期短。该区是国家重要的商品粮基地县之一,盛产大豆、小麦、玉米、高粱、奶白花芸豆、向日葵、马铃薯等作物,素有“大豆之乡”的美称。土地肥沃,土壤类型以黑土为主,另外有黑钙土、草甸土、沼泽土和盐土,土壤结构与基础肥力较好。黑土分布在东部、北部、中部丘陵区,黑钙土分布在西南部高平原上^[11-12]。由于受漫长地质年代和地质构造活动的影响,全县成土母质多样,主要有次生砂砾质残积母质、冲积淤积母质、第四纪沉积物^[12]。

2 样品及分析

2.1 样品采集及分析测试方法

本研究主要在双阳河两岸典型黑土区布设 7 个垂向剖面,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 65 件。土壤样品装入布袋后风干、敲碎,用尼龙筛筛取 20 目部分,送中化总局地质研究院和自然资源部东北矿产资源监督检查中心实验室分析测试。主要使用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、原子荧光光谱法(AFS)、发射光谱法(ES)等分析测试方法。测试指标包括:As、B、Cd、Cr、Cu、Ge、Hg、I、Mn、Mo、N、Ni、P、Pb、S、Se、Zn、SiO₂、Al₂O₃、TF_{e2}O₃、K₂O、Na₂O、CaO、MgO、TC、C_{org}、pH。

2.2 分析结果

1)剖面特征

根据野外观察和室内实验数据对剖面进行了划分,从上到下剖面可以划分为 4 个层位(图 1),具体如下.

Ah 层(腐殖质层):厚度 20~60 cm,厚者可达 80 cm 以上. 黑色,潮湿松软,黏壤土,团粒结构. 土体疏松多孔,多植物根系. pH 7.0~8.5.

Abs 层(过渡层):厚度不等,在 30~70 cm 之间. 暗灰棕色,黏壤土,小块状结构,偶见上部腐殖质淋溶的条带. pH 6.5~8.5.

Btq 层(淀积层):厚 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,偶见铁锰结核等淀积物. pH 7.0~9.0.

C 层(母质层):为黄土状堆积物.

2)常量元素特征

拜泉土壤剖面常量元素 SiO_2 含量平均值在 54.87%~71.52%之间, Na_2O 平均值为 0.75%~1.77%, 除个别剖面外,总体上含量低于东北平原区均值; K_2O 平均值为 1.92%~3.03%, CaO 平均值 0.64%~7.42%, Al_2O_3 平均值为 11.75%~14.68%, Fe_2O_3 平均值为 2.81%~5.63%, MgO 平均值为 0.61%~1.73%, 除个别剖面外,总体上含量高于东北平原区平均值(表 1). 常量元素含量由大到小的顺序为 $\text{SiO}_2>\text{Al}_2\text{O}_3>\text{Fe}_2\text{O}_3>\text{CaO}>\text{K}_2\text{O}>\text{Na}_2\text{O}>\text{MgO}$. 淋溶元素 Na_2O 、 K_2O 随深度增

表 1 拜泉土壤剖面常量元素参数

Table 1 Contents of major elements in the soil sections, Baiquan area

分层	含量/%	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
腐殖质层	最小值	47.87	11.51	2.64	0.52	0.77	0.95	1.76
	最大值	69.54	15.52	5.50	1.82	13.14	1.91	3.49
	平均值	62.91	14.05	5.27	1.42	2.32	1.48	2.40
	标准差	6.45	1.08	0.79	0.35	4.00	0.30	0.47
淀积层	最小值	49.42	9.62	0.74	0.14	0.22	0.81	1.96
	最大值	78.75	15.12	5.37	1.80	10.89	2.19	3.08
	平均值	63.98	13.52	4.40	1.33	3.74	1.52	2.57
	标准差	7.32	1.61	1.41	0.47	3.04	0.44	0.32
母质层	最小值	62.33	11.05	2.62	0.71	0.93	1.27	2.50
	最大值	72.67	15.08	5.44	1.58	3.00	1.80	2.70
	平均值	61.17	14.30	4.97	1.53	4.05	1.78	2.51
	标准差	5.86	2.21	1.54	0.49	1.07	0.27	0.10

大平均含量略有增加; Fe_2O_3 随深度增大平均含量略有减少; MgO 含量在腐殖质层到淀积层缓慢增加,在母质层降低; 生物累积元素 CaO 随深度增大含量降低; 整体上 SiO_2 和 Al_2O_3 比较稳定,个别剖面母质层 Al_2O_3 降低(图2).

3)微量元素特征

从各剖面微量元素含量平均值(表 2)可以看出,全磷、全氮、S、Mn、B、I、Ge、Se 和有机碳平均值均明显

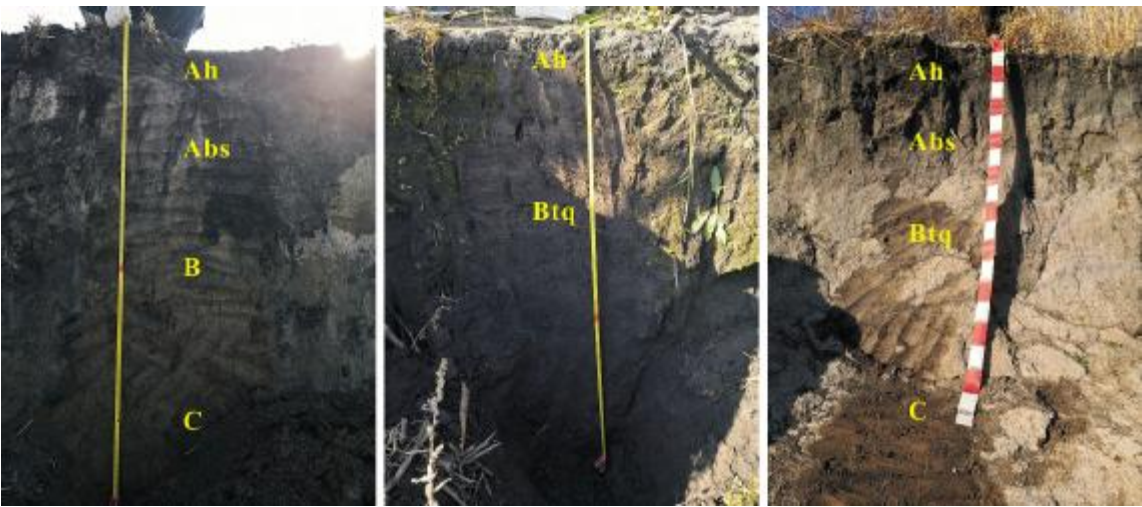


图 1 拜泉地区典型黑土剖面野外照片

Fig. 1 Field photographs of typical black soil sections in Baiquan area

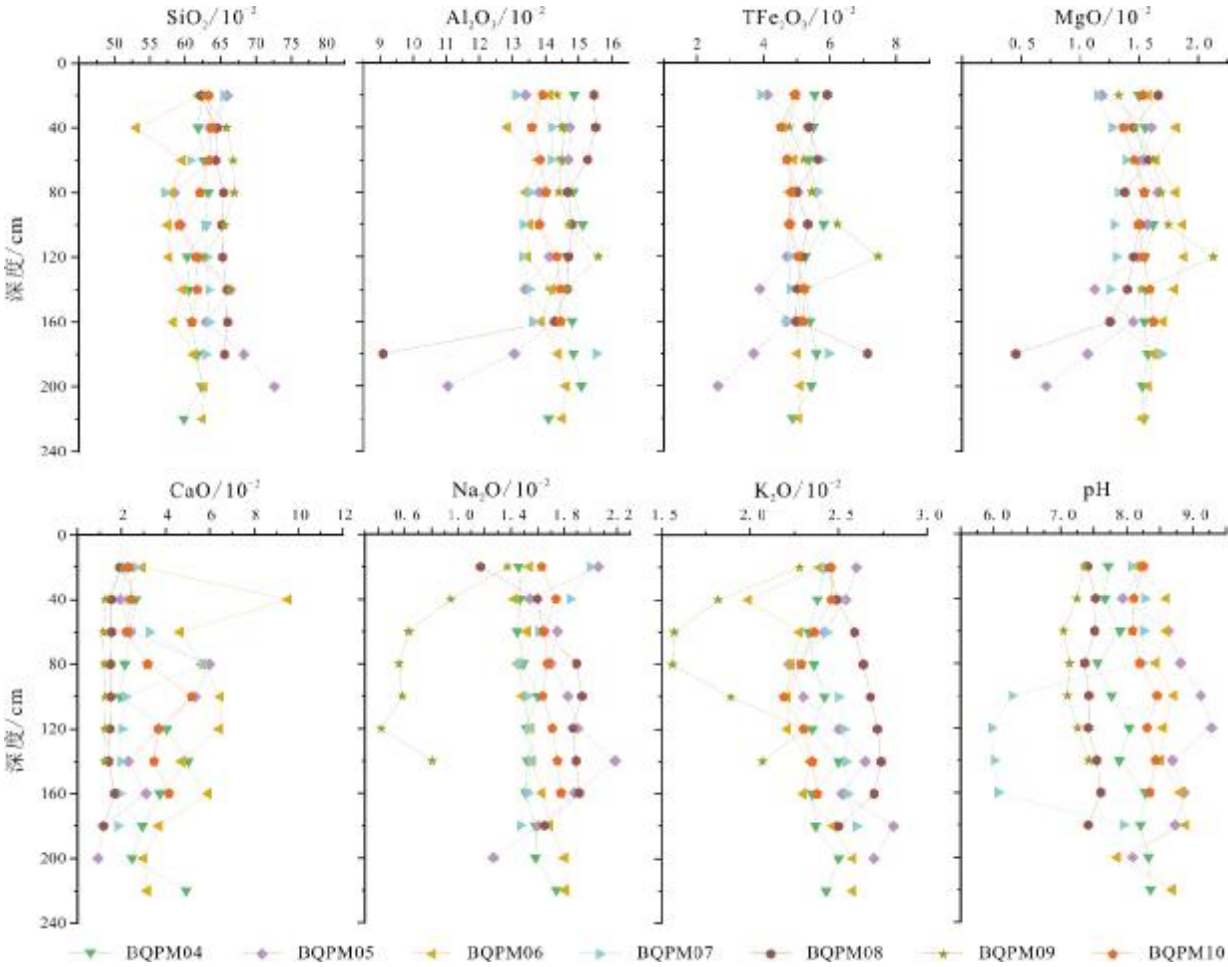


图 2 拜泉土壤剖面常量元素分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of major elements in the soil sections, Baiquan area

高于松辽平原平均值. Mo 元素含量与松辽平原均值基本一致. 重金属元素 As、Ni、Pb 和 Cr 背景值高于松辽平原均值, 尤其 As 和 Ni 元素相对含量高, 这可能是由于区内存在几个极高值地点. Cu、Zn、Hg 和 Cd 含量小于松辽平原均值.

土壤全氮、Se 元素、有机碳和 S 元素含量存在表生富集现象, 符合寒冷干燥地区强碱性土壤营养元素垂向分布特征, 即随着深度的增加元素含量降低, 并且深度在 1 m 左右含量逐渐趋于稳定. 表生富集现象主要受到淋滤作用、有机质、生物富集作用和人为因素的影响^[13-14] (图 3).

从垂直剖面上看, As 和 Hg 元素比较好地继承了深层土壤含量特征, 受地表人为活动和外部影响不大; Cu 和 Cd 元素主要积累在黑土表层, 而表层以下不同施肥处理间 Cu、Cd 含量的差异和变幅不大^[15]. 在剖面

BQPM05 和 BQPM08 中, Cr、Zn、Pb 和 Ni 在母质层存在明显的锐减现象(图 4), 表明受人为污染叠加作用明显.

3 讨论

3.1 土壤风化程度

化学蚀变指数 (Chemical Index of Alteration, CIA) 是判别由硅酸盐矿物组成的沉积物风化程度最常用的化学指标, 其计算公式为:

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

式中氧化物均为分子摩尔数. CaO* 为硅酸盐相, 采用 McLennan^[16] 计算方法. 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. CIA 值介于 50~60 之间反映寒冷干燥气候条件下的弱风化程度, 60~80

表 2 拜泉土壤剖面微量元素参数

Table 2 Contents of trace elements in the soil sections, Baiquan area

分层	含量/ 10^{-6}	As	B	Cd	Cr	Cu	Ge	Hg	I	Mn	Mo	N	Ni	P	Pb	S	Se	Zn
腐殖质层	最小值	7.12	32.90	0.05	57.00	18.90	1.20	0.01	1.70	527	0.46	961	22.80	582	20.00	167	0.14	50.90
	最大值	14.70	48.70	0.12	80.90	30.60	1.59	0.02	4.55	1496	1.12	2573	39.70	844	28.60	368	0.33	83.90
	平均值	11.45	40.76	0.07	68.34	23.54	1.42	0.02	3.43	828	0.64	1917	31.44	707	23.27	268	0.25	65.81
	标准差	2.55	5.57	0.03	8.78	4.03	0.15	0.00	1.03	400	0.23	645	6.45	101	3.73	73	0.08	10.83
淀积层	最小值	2.27	29.80	0.04	60.50	19.80	1.19	0.01	0.69	305	0.45	961	26.00	304	20.10	58	0.04	61.50
	最大值	12.50	51.10	0.12	89.10	29.00	1.86	0.04	4.69	1060	0.80	2573	37.70	1183	29.80	538	0.36	80.20
	平均值	8.94	39.50	0.07	70.50	23.94	1.41	0.02	2.50	609	0.57	1917	31.27	618	22.59	209	0.14	69.10
	标准差	3.26	6.73	0.03	9.83	3.21	0.22	0.01	1.31	274	0.15	645	4.46	284	3.57	156	0.11	7.27
母质层	最小值	9.57	34.40	0.04	65.20	25.20	1.25	0.01	1.65	556	0.46	390	14.90	462	17.10	128	0.04	36.00
	最大值	10.90	47.20	0.08	68.00	27.30	1.67	0.03	4.14	1119	0.87	692	40.30	592	24.30	202	0.08	76.60
	平均值	10.24	40.80	0.07	66.60	26.25	1.41	0.02	3.05	745	0.64	547	27.33	526	20.97	162	0.05	62.30
	标准差	0.94	9.05	0.02	1.98	1.48	0.23	0.01	1.27	324	0.21	151	12.71	65	3.63	37	0.02	22.81

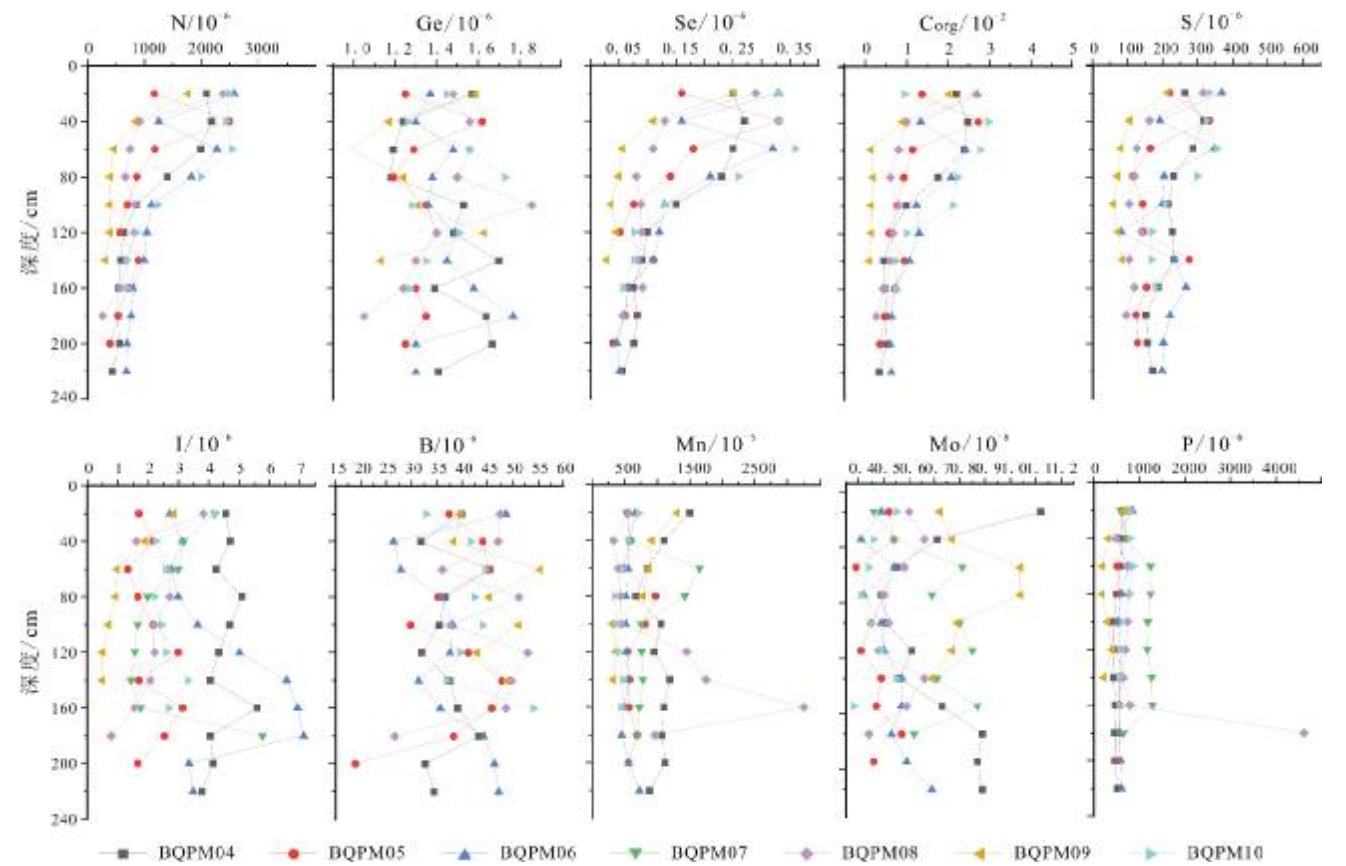


图 3 拜泉土壤剖面粉植物吸收微量元素分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of trace elements absorbed by plants in the soil sections, Baiquan area

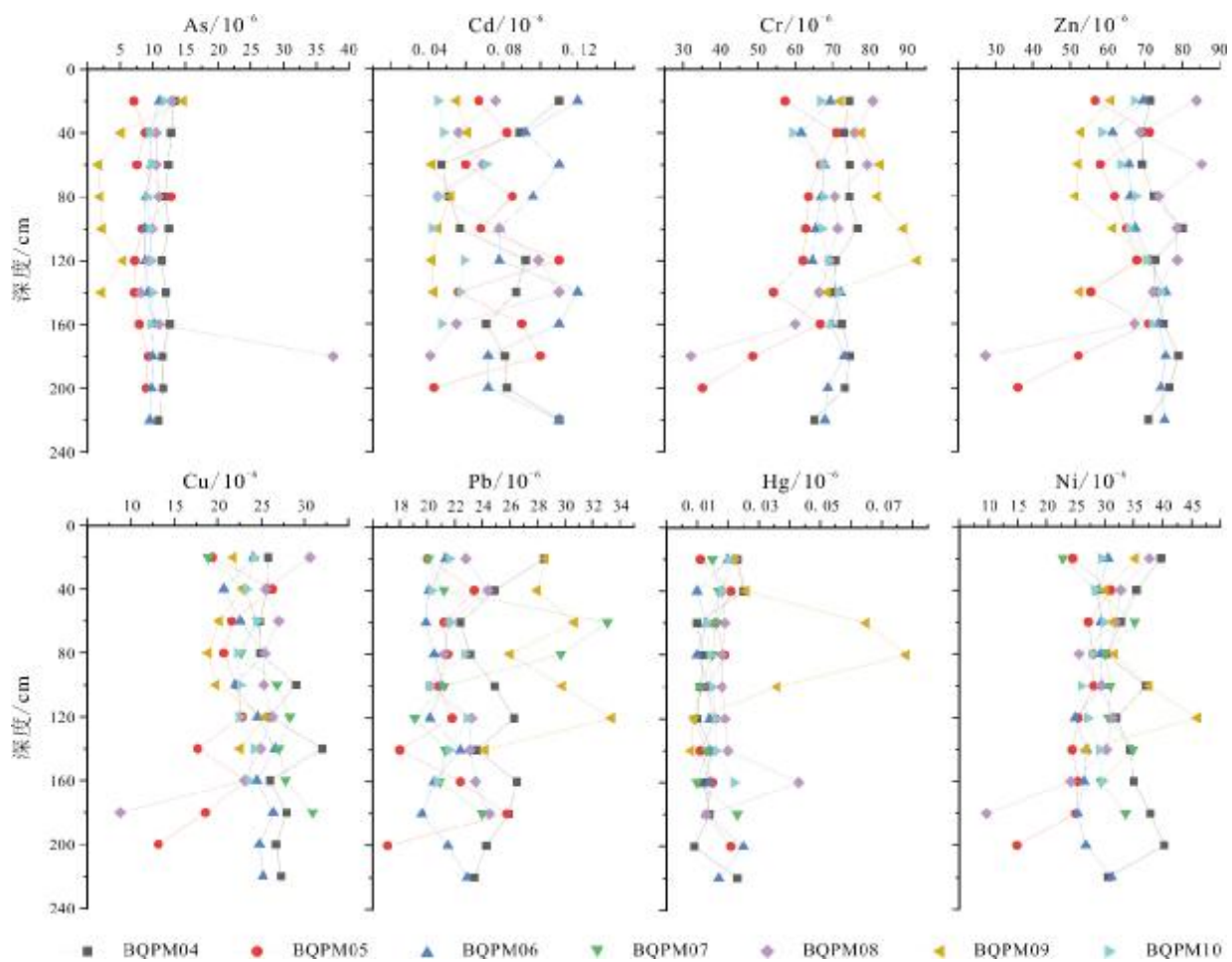


图 4 拜泉土壤剖面金属微量元素分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of metal trace elements in the soil sections, Baiquan area

之间反映温暖湿润气候条件下的中等风化程度,大于 80 反映炎热潮湿的热带-亚热带条件下强烈的化学风化程度^[17-19]。同时,也常采用硅铝铁率(Saf)来衡量脱硅富铁铝程度,即剖面遭受的风化作用程度,计算公式为:

$$\text{Saf}=\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

(2)

Saf 值越小,说明脱硅富铝化程度越强,遭受风化强度越强^[20]。

拜泉土壤剖面 CIA 值在 44~75 之间,平均值为 58,属于弱风化程度。Saf 值在 5.7~8.1 之间,高于北方土壤平均值,说明盐基离子淋失程度低,风化作用较弱。从图 5 中可以看出,随着深度的增加,CIA 值有降低的趋势,Saf 值有升高的趋势,说明拜泉剖面在成土过程中氧化程度在逐渐增加,风化程度在逐渐增强,环境越来越潮湿。

微量元素的地球化学行为受常量元素的控制,As、

Pb、Cd、Zn 含量与 Fe 的含量呈现很好的相关性^[20-21]。拜泉土壤剖面重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg 与 Fe 的相关系数见表 3。由此可见,As、Cd、Cu、Pb、Hg 含量与 Fe 含量具有显著正相关性,说明这些重金属元素的含量及其剖面分布主要受常量组分 Fe 的控制,其中 As 和 Hg 的垂向变化与 Fe 元素具有很好的偶合性。Cu、Cr、Cd 和 Pb 具有较好的相关性,研究认为,Cu、Cd 和 Pb 易在酸性条件下以二价离子态发生活化迁移,而在碱性条件下比较稳定;Cr 在表生条件下易被氧化形成含氧酸根离子,从而发生迁移^[20, 22]。因此这些元素在表层土壤风化条件下具有相似分布特征。

3.2 常量元素迁移规律

在化学风化过程中,风化成壤作用改变沉积物的化学组成,化学淋滤作用使土壤中的易溶元素淋溶出土壤,从而造成稳定元素的相对富集。目前往往采用

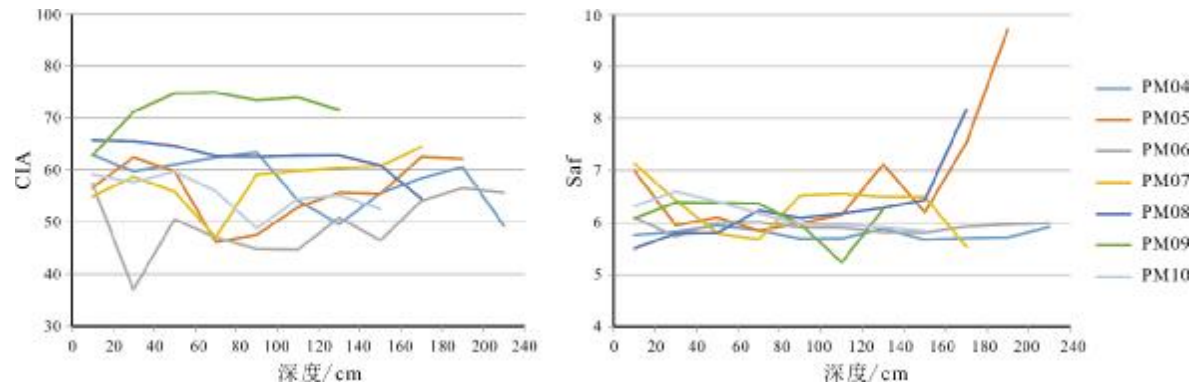


图 5 拜泉土壤剖面化学风化指数及硅铝铁率

Fig. 5 The CIA and Saf diagrams for soil sections in Baiquan area

表 3 拜泉土壤剖面微量元素相关系数
Table 3 Correlation coefficient of trace elements in the soil sections, Baiquan area

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Fe
As	1.00	0.52	-0.57	-0.12	0.98	0.02	0.27	-0.50	0.99
Cd	0.52	1.00	0.41	-0.91	0.35	0.86	0.96	0.48	0.38
Cr	-0.57	0.41	1.00	-0.75	-0.72	0.81	0.64	1.00	-0.69
Cu	-0.12	-0.91	-0.75	1.00	0.08	-0.99	-0.99	-0.80	0.04
Hg	0.98	0.35	-0.72	0.08	1.00	-0.17	0.08	-0.66	1.00
Ni	0.02	0.86	0.81	-0.99	-0.17	1.00	0.97	0.86	-0.14
Pb	0.27	0.96	0.64	-0.99	0.08	0.97	1.00	0.70	0.11
Zn	-0.50	0.48	1.00	-0.80	-0.66	0.86	0.70	1.00	-0.63
Fe	0.99	0.38	-0.69	0.04	1.00	-0.14	0.11	-0.63	1.00

元素的变化率来反映元素的迁移与富集程度. 采用某一种稳定元素(如 Al、Ti、K)作为参照, 计算样品中其他元素的变化率:

$$\Delta(\%) = \frac{\frac{X_s}{I_s}}{\frac{X_p}{I_p} - 1} \times 100 \tag{3}$$

X_s 、 I_s 分别代表样品中元素 X 和参比元素 I 的含量, X_p 、 I_p 为上述元素在原始母质中的含量. $\Delta < 0$ 反映元素 X 相对参比元素迁出, $\Delta > 0$ 反映元素 X 相对富集^[8,17]. 本文选择稳定元素 Al 作为参考元素, 计算腐殖层和淀积层剖面元素平均含量的变化率(图 6). 计算结果表明, 在腐殖层 Na、Ca、Mg 和 K 元素的 Δ 值小于 0, Fe 和 Si 元素的 Δ 值大于 0, 说明 Na、Ca、Mg、K

元素相对 Al 元素发生了迁移, Fe 和 Si 元素相对于 Al 元素发生了富集. 根据 Δ 值绝对值的相对大小, Ca 元素发生了显著迁移, Na 和 K 元素发生了轻微迁移. 由此得到土壤剖面腐殖层常量元素风化过程中的活动性和迁移能力为: Ca>Na>Mg>K>Al>Si>Fe. 淀积层 Na、Ca、Mg 和 Fe 元素相对迁移, K 和 Si 元素相对富集, 土壤元素迁移和活动性规律为: Na>Mg>Fe>Ca>Al>K>Si.

在温暖湿润时期, 土壤中活动性常量元素迁移现象明显; 在寒冷干旱时期, 淋溶作用相对较弱, 活动性弱的常量元素常出现富集现象. 从常量元素的迁移结果看, 拜泉地区土壤腐殖层 Ca、Na、Mg、K 淋失强烈, 土壤成熟度高, K、Si 组分发生一定程度的淋失贫化, 而表生活动性弱的 Al、Fe 则相对富集, 风化程度已达到脱硅富铝铁阶段, 说明成土过程中以温暖湿润气候为主; Ca 元素在淀积层富集比在腐殖层更为明显, K 离子易被土壤胶体所吸附, 土壤 K 的迁移能力比 Na 弱, 风化成土过程中 K 在土壤上的残留量比 Na 多, Si 元素在淀积层富集最明显, Fe 元素发生一定程度的淋失, 说明成土过程中气候属于相对寒冷干燥时期.

3.3 气候环境指示意义

影响植物生长所必需吸收的 N、P、S、Mn、B、I、Ge、Se、Mo 等元素的因素主要为与气候环境相关的生物地球化学循环过程. 风化成壤过程中生物活动特别是植物的生长需要吸收部分微量元素造成它们在土壤表层发生一定程度的聚集; 同时, 游离的微量元素又易被黏土矿物、有机质等吸附^[23]. 综上所述, 拜泉地区黑土形成于温带季风气候条件下, 夏季温暖多雨, 微量元素向下淋失, 停留在黏粒矿物较多的淀积层, 成土母质质地

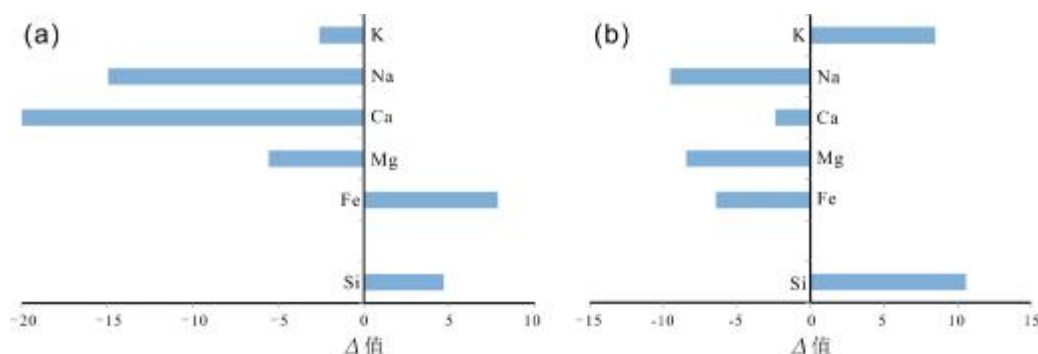


图6 拜泉土壤剖面常量元素迁移规律

Fig. 6 Migration rule of major elements in the soil sections, Baiquan area

a—腐殖层剖面(humus layer); b—淀积层剖面(illuvial layer)

较黏重,微量元素难以达到。冬季寒冷漫长,微生物活动性弱,土壤表层积累大量腐殖质,对微量元素具有较强的吸附固定作用。

4 结论

1) 拜泉土壤剖面常量元素含量除 SiO_2 和 Na_2O 外,总体上高于东北平原平均值; CIA 平均值为 58, Saf 值较高,属于弱风化强度。

2) 植物生长所必需的微量元素 N、P、S、Mn、B、I、Ge、Se、Mo 等在温暖气候条件下,在表层和淀积层积累,含量较高,在淋溶层和母质层含量较低;寒冷干燥条件下,在表层积累。金属微量元素与 Fe 元素具有较强的相关性,说明其垂向组分不仅受气候条件控制,同时受常量元素控制。

3) 常量元素迁移规律表明,剖面腐殖层土壤成熟度高,成土过程中以温暖湿润气候为主;淀积层可能处于脱 Na、Ca 阶段,成土过程中气候相对寒冷干燥。

参考文献:

- [1]李艳华,庞奖励,黄春长,等. 关中东部全新世黄土——古土壤序列微量元素分布特征及意义[J]. 土壤通报,2012,43(1):125-130.
- [2]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.
- [3]陆继龙,周永昶,周云轩. 吉林省黑土某些微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报,2002(5):365-368.
- [4]陆继龙,周云轩,周永昶,等. 黑土农业区常量和微量元素环境地球化学特征[J]. 农业环境与发展,2002,19(1):27-29.
- [5]周国华,马生明,喻劲松,等. 土壤剖面元素分布及其地质、环境意义[J]. 地质与勘探,2002,38(6):70-75.
- [6]马溶之. 土壤剖面之研究及其地文意义[J]. 地质论评,1948,13(Z2):277-280.
- [7]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.
- [8]张明瑶,刘月,滕旭,等. 鸭绿江冲积平原土壤剖面常量元素的特征及其意义[J]. 辽东学院学报(自然科学版),2019,26(4):281-286.
- [9]佟宝辉,张忠庆,赵立刚,等. 吉林省中部黑土区土壤微量元素分布及空间变异特征研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(14):8143-8146.
- [10]李宁,武洪峰,林思伽. 基于 GIS 的黑龙江省拜泉县耕地地力评价[J]. 现代化农业,2012(6):63-66.
- [11]任为萍,臧晓凡. 明水-拜泉一带主要微量元素含量特征分析[J]. 黑龙江国土资源,2010(7):59.
- [12]汤彦辉,程岩,孙玉龙. 黑龙江省拜泉县耕地地力评价[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2016.
- [13]石建凡,施泽明,吴鹏盛. 四川万源大竹地区土壤垂向剖面晒的地球化学特征[J]. 地质论评,2015,61(Z1):38-39.
- [14]高宇,杜亮亮,海龙,等. 宁夏中宁县土壤微量元素垂向分布特征研究[J]. 资源环境与工程,2017,31(Z1):71-73.
- [15]韩晓凯,高月,姜翼来,等. 长期施肥对黑土中 Cu、Cd 含量及其剖面分布的影响[J]. 安全与环境学报,2008,8(3):10-13.
- [16]McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. The Journal of Geology, 1993,101(2):295-303.
- [17]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.
- [18]李徐生,韩志勇,杨守业,等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. 地理学报,2007,62(11):1174-1184.
- [19]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.
- [20]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.
- [21]王海荣,侯青叶,杨忠芳,等. 广东省典型花岗岩成土剖面元素垂向分布特征[J]. 中国地质,2013,40(2):619-628.
- [22]刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [23]贾耀锋,庞奖励,黄春长,等. 关中盆地全新世黄土-土壤剖面微量元素的地球化学特征及其古气候意义[J]. 土壤通报,2012,43(3):513-520.