#### doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.06.10

引用格式:于俊博,周传芳,梁中恺,等,重要生态功能区土壤化学元素的空间分布模式——以大兴安岭松岭区为例[J].中国地质调查,2021,8(6):105-113. (Yu J B,Zhou C F,Liang Z K,et al. Spatial distribution patterns of soil chemical elements in important ecological function areas: A case study in Songling area of the Greater Khingan Mountains[J]. Geological Survey of China, 2021,8(6):105-113.)

# 重要生态功能区土壤化学元素的空间分布模式 ——以大兴安岭松岭区为例

# 于俊博,周传芳,梁中恺,孙彦峰,姜平,胡 宸

(中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**大兴安岭森林带是我国"两屏三带"生态安全战略格局中的重要一环,其北段松岭区目前是生态地质调查的空白区,查明区内土壤中的元素含量以及空间分布模式,可以为该区生态保护与修复提供基础支撑。以松岭区表层土壤和深层土壤为研究对象,利用多目标区域地球化学采样及分析方法,探讨了各元素指标的地球化学特征及分布模式。研究区土壤的元素分布模式有以下特征:全C、N、P、S在表层土壤中显著富集;K<sub>2</sub>O、CaO、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>在表层土壤中明显贫化;F、Cl、Br、I在表层土壤中高值区的分布受深层土壤影响,同时 Br和I在表层土壤中的富集与有机质关系密切;内梅罗综合指数显示 As、Cd、Hg、Ni、Pb、Zn等重金属元素在土壤中轻微超标。

关键词: 生态地质调查; 土壤; 生态地球化学; 元素分布模式

中图分类号: P595; X171.4; S153.6 文献标志码: A 文章编号: 2095-8706(2021)06-0105-09

### 0 引言

大兴安岭是我国重要的生态功能区,也是敏 感的生态脆弱区,同时大兴安岭山区是我国纬度 最高的冻土区。近年来,国外学者以地球化学视 角研究高纬度冻土地区的土壤问题,例如土壤中 微量元素的浓度<sup>[1-2]</sup>、土壤中的重金属污染<sup>[3-5]</sup>、 人类活动对土壤的影响<sup>[6]</sup>、气候变化引起冻土融 化从而导致土壤中有机质发生变动<sup>[7]</sup>等。而国内 对于大兴安岭冻土区土壤的研究主要侧重于土壤 中的微生物和真菌群落<sup>[8-11]</sup>、土壤中的温室气 体<sup>[12-13]</sup>以及土壤对植被生长的影响<sup>[14-15]</sup>等方 面,而从地球化学视角分析土壤中化学元素分布 的研究较少。本文依托大兴安岭山区生态地质调 查项目<sup>[16]</sup>,在大兴安岭北区松岭区土壤中化学 元素的空间分布模式,为区域生态保护与修复提供基础支撑。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省大兴安岭松岭区,处于大 兴安岭北段,属于高纬度寒温带湿润区,夏短冬长, 结冰期一般在7个月左右,根据加格达奇气象局日 气温统计数据,计算得出 2000—2019 年平均气温 为0.23 ℃,最低气温为-35.2 ℃。降雨期主要集 中在7—9月,年平均降雨量约460 mm。

区内主要出露晚三叠世一早侏罗世混合花岗 岩、中侏罗世二长花岗岩和花岗闪长岩、早白垩世 正长花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩 等,零星分布早志留世一中泥盆世泥鳅河组大理 岩、晚侏罗世玛尼吐组英安岩与英安质凝灰岩以及 第四纪松散堆积物<sup>[17]</sup>(图1(a))。

收稿日期: 2021-08-29;修订日期: 2021-11-23。

**基金项目:**中国地质调查局"生态地质调查工程(编号:0703)""大兴安岭山区生态地质调查(编号:DD20191014)"项目联合资助。 第一作者简介:于俊博(1989—),男,助理工程师,主要从事勘查地球化学方面的研究。Email:409999177@qq.com。

通信作者简介:周传芳(1985—),男,工程师,主要从事区域地质矿产调查、生态地质调查及多金属勘查工作和研究。 Email: 546011015@ qq. com。

有少量沼泽土和草甸土<sup>[18]</sup>。植被以针阔混交林为 蒙古栎,低矮草本植物主要以小叶章为主[19]。  $S_2D_n$ Oh **ľ** km (b) 研究区土壤类型分布图 (a) 研究区地质简图 现代堆积及河漫滩堆积 花岗斑岩 正长花岗岩 J<sub>3</sub>mn 玛尼吐组  $S_{3}D_{n}$ 泥鳅河组 二长花岗岩 二长花岗岩 花岗闪长岩 yoJ\_ 花岗闪长岩 ymT\_J. 混合花岗岩 地质界线 棕壤 暗棕壤 草甸土 松岭区 建筑用地 深层土壤 表层土壤 沼泽土 图1 研究区地质简图(a)与土壤类型分布图(b)

Fig. 1 Geological sketch(a) and soil type distribution (b) in the study area

# 2 样品采集与分析测试

根据大兴安岭生态地质调查的工作要求以及 多目标区域地球化学调查规范<sup>[20]</sup>,结合松岭区的自 然地理条件,通过试验确定对森林、沼泽生态系统地 质调查样品采集的具体方法。在研究区范围内每 1 km<sup>2</sup>采集1个表层土壤样品,采样深度0~20 cm, 样品质量1 kg,共采集284 件。每4 km<sup>2</sup>采集1个 深层土壤样品,采样层位为C层(成土母质层)土 壤,采样深度45~150 cm,共采集72 件(图1(b))。 土壤样品为多点组合采集,样品风干后按实际采样 点数送样测试。在样品采集过程中,尽量避开农 田、河边、道路等人为干扰较为严重的区域。

本研究分析测试了 19 项土壤样品的组分指标,测试工作由黑龙江省地质矿产实验测试研究中心完成。SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O、P、Pb、Cl、Br、CaO、Zn、Na<sub>2</sub>O 由X 射线荧光光谱法(XRF)测定; Ni 由电感耦合等离子体发射光谱法(ICP – OES)测定; Cd 由电感

耦合等离子体质谱法(ICP - MS)测定; As、Hg 由 原子荧光法(AFS)测定; F 由离子选择性电极 (ISE)和玻璃电极法测定; I 由光度法(COL)测 定; N 和有机质由容量法(VOL)测定; S 和全 C 由高频燃烧 - 红外吸收光谱法测定。各元素分析 数据的准确度和精密度均满足《DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》<sup>[20]</sup> 的质量要求,分析结果可信。

主,优势树种为兴安落叶松,次优势树种为白桦和

## 3 地球化学参数特征

对土壤样品数据进行分析处理,本研究采用  $X \pm$ 3S 为临界值, 剔除异点。计算 剔除后的土壤中各 组分的最大值、最小值、中位数、平均值、标准离差、 变异系数等地球化学参数特征见表 1。从变异程度 看,研究区表层土壤中 Cl、F、Ni、Pb、Zn、SiO<sub>2</sub>、CaO、 K<sub>2</sub>O 的变异系数小于 25%, 呈弱变异性; As、Cd、 Hg、I、N、P、S、Na<sub>2</sub>O、全 C 的变异系数为 25% ~ 50%, 呈 中度变异性; Br 的变异系数为 51%, 呈高度变异性。 研究区深层土壤中 Cl、F、Pb、SiO<sub>2</sub>、CaO、K<sub>2</sub>O 的变异

研究区土壤类型主要以暗棕壤和棕壤为主,伴

系数小于 25%, 呈弱变异性; As、Br、Cd、Hg、I、N、Ni、P、S、Zn、Na<sub>2</sub>O的变异系数在 25% ~ 50%, 呈中度

变异性;全C和有机质的变异系数在50%~75%, 呈高度变异性。

					0.000	r r						- <b>r</b>			
	表层土壤含量特征							深层土壤含量特征							中国
元素	样品数	最大值	最小值	中位数	、 平均值	「标准 「商差	变异 系数	样品数	最大值	最小值	中位数	平均值	标准 离差	变异 系数	_ 土壤 丰度 <sup>[21]</sup>
As	283	11.00	1.80	6.10	6.03	1.67	28.00	72	12.30	1.40	5.95	6.08	2.25	37.10	11.40
Br	263	12.20	1.00	3.80	4.54	2.33	51.40	70	6.50	0.70	2.60	2.85	1.29	45.20	6.30
Cd	267	0.13	0.02	0.06	0.06	0.02	40.70	67	0.01	0.02	0.04	0.04	0.02	42.40	0.08
Cl	263	125.00	38.00	69.00	71.80	17.10	23.70	68	80.00	32.00	48.00	50.20	10.30	20.40	47.00
F	272	625.00	255.00	421.00	434.00	73.10	16.90	70	660.00	235.00	426.00	445.00	84.70	19.00	450.00
Hg	276	0.07	0.02	0.04	0.04	0.01	28.70	72	0.05	0.01	0.03	0.03	0.01	32.80	0.03
Ι	277	4.12	0.62	1.82	1.97	0.73	36.90	72	3.29	0.43	1.57	1.57	0.64	40.70	3.80
Ν	277	6 462.00	691.00	2 490.00	2 805.00	1 288.00	45.90	71	2 278.00	346.00	966.00	1 117.00	516.00	46.20	1 822.00
Ni	280	30.20	7.72	19.70	19.50	4.30	22.10	72	29.30	6.22	16.70	16.90	5.30	31.40	25.00
Р	279	2 420.00	450.00	1 291.00	1 337.00	377.00	28.20	70	1 375.00	401.00	771.00	821.00	266.00	32.40	571.00
Pb	277	34.40	18.90	25.60	25.90	3.18	12.20	69	34.20	20.30	26.20	26.40	2.98	11.30	24.00
$\mathbf{S}$	274	788.00	87.00	296.00	327.00	158.00	48.40	71	298.00	33.00	132.00	149.00	63.50	42.60	280.00
Zn	280	141.00	39.10	84.20	85.80	20.10	23.40	71	157.00	39.10	79.70	82.80	25.00	30.20	60.00
全C	278	10.30	0.76	4.00	4.47	2.02	45.30	72	4.15	0.42	1.60	1.77	0.97	54.50	2.20
CaO	275	1.86	0.46	1.09	1.12	0.25	22.00	70	1.80	0.66	1.03	1.08	0.26	24.50	1.70
Na <sub>2</sub> O	284	3.79	0.38	2.04	2.10	0.58	27.50	71	4.26	1.33	2.40	2.51	0.70	27.80	1.89
$K_2O$	278	3.13	1.79	2.46	2.46	0.23	9.40	71	3.31	2.12	2.61	2.62	0.25	9.30	2.47
$\mathrm{SiO}_2$	280	69.50	45.70	59.00	58.20	4.33	7.50	72	69.10	56.90	63.70	63.50	2.72	4.30	61.00
有机质	278	9.93	0.63	3.85	4.23	1.91	45.20	72	4.13	0.41	1.51	1.70	0.96	56.30	1.93

表 1 土壤样品地球化学参数特征 Tab.1 Geochemical parameter characteristics of the soil samples

注:SiO<sub>2</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、全C、有机质含量以及变异系数单位为%,Cd和Hg单位为10<sup>-9</sup>,其余元素单位为10<sup>-6</sup>;中国土壤含量参考中国大兴安岭弧盆系表层土壤剔除异值后的中位数<sup>[21]</sup>。

由于中值比平均值抗干扰性更好,因此采用中 值作为研究区各元素在土壤中含量的估计 值<sup>[22-25]</sup>。环境富集系数(q)=表层土壤元素含量/ 深层土壤元素含量<sup>[26]</sup>,它可以直观地反映土壤中 元素的分散与富集规律。如图 2 所示, As、F、Pb、 Zn、SiO<sub>2</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 的 q 值在0.85~1.15 之 间,与其自然土壤中元素含量接近, Br、Cd、Cl、Hg、 I、Ni 的 q 值在1.15~1.5 之间呈弱富集, Na<sub>2</sub>O、P、





Fig. 2 Environmental concentration coefficients of the element compositions in the stady area

 $S_{c}$  C 的 q 值在 1.5~4 之间呈强富集。

与中国大兴安岭弧盆系表层土壤中元素指标 含量值<sup>[21]</sup>相比(表1),研究区表层土壤中 Cl、Hg、 N、P、Pb、S、Zn、Na,O、全C等指标的含量更高,As、 Br、Cd、F、I、Ni、SiO,、CaO、K,O等指标的含量更低。

元素的空间分布及分布模式 4

土壤是地球圈层中重要的组成部分,它受成土 母质、气候、牛物、地形、时间等因素的影响,同时土 壤也控制着物质、能量和信息的转化<sup>[27-30]</sup>。对土 壤中元素的空间分布来说,一般情况下,表层土壤 更容易受生物、地表水以及人类活动等影响,使其 元素分布模式发生改变。而深层土壤中元素的分



(a) 表层(左) 与深层(右) 土壤全 C 元素含量分布



(c) 表层(左) 与深层(右) 土壤 P 元素含量分布

图 3 表层与深层土壤中全 C、N、P、S 元素分布模式

Fig. 3 Distribution patterns of total C, N, P, S in surface and deep soils

#### 4.2 K、Ca、Na、Si 的分布模式

从K<sub>2</sub>O<sub>x</sub>CaO<sub>x</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>x</sub>SiO<sub>2</sub>的分布模式来看,CaO 在表层土壤中含量较高,而K,O、Na,O、SiO,含量明 显低于在深层土壤中的含量(图4)。CaO和 Na,O 在表层土壤中高值区的分布和深层土壤中高值区 的分布一致,但表层土壤中高值区的强度和面积更 小,低值区的强度和面积更大。

研究区内基岩主要以花岗岩类为主,花岗岩 风化成土的过程也是碱金属水解淋失的过 布模式更多受成土母质的影响<sup>[31]</sup>。本文使用 GeoIPAS 软件对土壤数据进行处理分析,并利用克 里金插值法对数据进行离散数据网格化,从而绘制 元素含量分布图。

#### 4.1 全 C、N、P、S 的分布模式

C、N、P、S 是植物牛长所需的必需元素,所有的 氨基酸中均含有 N, 而 P、S、C 则是糖类、脂类等物 质的主要化学成分。研究区内全 C、N、P、S 在表层 土壤中呈显著富集,目高值区的面积明显比深层土 壤中的面积大,但深层土壤中各元素的高值区位置 在表层土壤中得到了继承。在大兴安岭山区的森 林和沼泽生态系统中,地表腐殖质较厚,生物地球 化学活动频繁,致使全 C、N、P、S 等生物必需元素 在表层土壤中累积(图3)。



(b) 表层(左)与深层(右)土壤N元素含量分布



<sup>(</sup>d) 表层(左) 与深层(右) 土壤 S 元素含量分布

程<sup>[32]</sup>。大兴安岭地区7、8月为雨季,表层土壤 含水量大,而深层土壤温度低且含水量较少,因 此 Na,O 在表层土壤中更易溶于水,并在水动力 下流失。花岗岩中 SiO<sub>2</sub>含量较高,从表层土壤一 深层土壤--基岩,SiO,的含量随深度的增加而升 高。表层土壤在地表水和风化作用的影响下, SiO,和K,O易于流失,这是表层土壤对深层土壤 中 SiO,和 K,O 的分布模式继承相对较弱的主要 原因。



(a) 表层(左) 与深层(右) 土壤 CaO 含量分布



(c) 表层(左)与深层(右)土壤 Na20 含量分布

(K,O)/% 3.37 3.20 2.86 2.59 2.44 2.37 2.29

(b) 表层(左)与深层(右)土壤 K<sub>2</sub>O 含量分布



(d) 表层(左)与深层(右)土壤 SiO<sub>2</sub> 含量分布

图 4 表层与深层土壤中氧化物分布模式

#### Fig. 4 Distribution patterns of oxides in surface and deep soils

#### 4.3 F、Cl、Br、I的分布模式

研究区表层土壤中 Cl、Br、I的含量分别比深层 土壤高 43.8%、46.8% 和 15.9%,而 F 的含量比深 层土壤低 1.29%(表 1)。F 在表层土壤中继承了 深层土壤高值区的位置,但表层土壤中的高值强度 和范围有所减少。Cl、Br、I 在表层土壤的高值区同 样继承了深层土壤高值区的位置,但是表层土壤中



(a) 表层(左)与深层(右)土壤 F 元素含量分布





Cl、Br、I的高值强度和范围都有明显的增加,表明 Cl、Br、I在表层土壤的富集有一部分原因是受基岩 影响。通过计算有机质与 Br、I含量的相关性,得 出有机质与 Br 的相关系数为0.709,有机质与 I的 相关系数为0.641,说明 Br、I与有机质之间为正相 关,Br 和 I 除受深层土壤高值的影响,在表层土壤 的富集也受到土壤上部腐殖质层的影响(图5)。



(b) 表层(左)与深层(右)土壤 Cl 元素含量分布



(d) 表层(左)与深层(右)土壤 I 元素含量分布

图 5 表层与深层土壤中卤族元素分布模式

#### Fig. 5 Distribution patterns of halogen elements in surface and deep soils

#### 4.4 重金属元素的分布模式

密度大于 4.50 g/cm<sup>3</sup>的金属一般被认为是重 金属。在天然金属中密度大于 4.50 g/cm<sup>3</sup>的金属

元素有 54 种,其中工业上认定 Cu、Pb、Zn、Sn、Ni、 Co、Sb、Hg、Cd、Bi 等为重金属元素<sup>[31-33]</sup>。

在研究区内重点选择 As、Cd、Hg、Ni、Pb、Zn 进

行研究。单因子指数法和内梅罗综合污染指数法 是评价重金属污染的常用手段,但单纯的数理统计 方法不能完全解释地质现象,因此本文除了采用单 因子指数法和内梅罗综合污染指数法,还结合重金 属元素分布模式图探讨研究区内重金属元素的分 布模式<sup>[34-35]</sup>。

单因子污染指数计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中:  $P_i$ 为表层土壤中 i 类重金属元素的污染指数;  $C_i$ 为 i 类重金属元素的实际测量值,  $10^{-6}$ ;  $S_i$ 为大兴安岭弧盆系表层土壤 i 类重金属元素的背景值,  $10^{-6}$ 。

内梅罗综合污染指数计算公式为

$$P_{\text{$\missive max}} = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + (P_{\text{imax}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{gs}}$ 为表层土壤重金属污染综合指数;P为表 层土壤中各项污染指数的平均值; $P_{\text{imax}}$ 为表层土壤



(a) 表层(左) 与深层(右) 土壤 As 元素含量分布



(c) 表层(左) 与深层(右) 土壤 Ni 元素含量分布



(e) 表层(左) 与深层(右) 土壤 Hg 元素含量分布

中最大单项污染指数。

如表 2 所示, As、Cd、Ni 的单因子指数小于 1, 表明研究区表层土壤未受 As、Cd、Ni 污染, Hg、Pb、 Zn 单因子指数大于 1,表明 Hg、Pb、Zn 在研究区表 层土壤中轻微超标。研究区表层土壤内梅罗综合 指数为 1.26,表明研究区内表层土壤重金属元素轻 微超标<sup>[33-34]</sup>。

#### 表 2 表层土壤重金属元素 单因子指数与内梅罗综合指数

# Tab. 2 Single index and Nemerow comprehensive index of heavy metal elements in surface soils

	研究区	研究区重金属元素					
As	Cd	Hg	Ni	Pb	Zn	内梅罗综合指数	
0.535	0.679	1.48	0.788	1.070	1.400	1.26	

如图 6 所示, Pb、Ni、Zn 在表层土壤中的高值 区均较好地继承了深层土壤中高值区的位置和规 模, As 在表层土壤中的大部分高值区继承了深层 土壤中高值区的位置,但表层土壤个别高值区的规 模和强度要比深层土壤高值区的规模和强度大。



(b) 表层(左) 与深层(右) 土壤 Pb 元素含量分布



(d) 表层(左)与深层(右)土壤 Zn 元素含量分布



(f) 表层(左)与深层(右)土壤 Cd 元素含量分布

图6 表层与深层土壤中重金属元素分布模式

Fig. 6 Distribution patterns of heavy metal elements in surface and deep soils

Cd 在表层土壤中的高值区继承了深层土壤高值 区的位置,但高值区的强度没有深层土壤强,高值 区面积较深层土壤大。Hg 在表层土壤的高值区 强度高且范围大,结合单因子指数和重金属元素 分布模式图可以看出,除了深层土壤对表层土壤 的影响外,表层土壤中 Hg 的富集可能受地表腐殖 质、森林火灾、人类活动等方面影响<sup>[36]</sup>。

### 5 结论

从研究区各组分指标的分布模式来看,生物必 需元素、主量元素、卤族元素、重金属元素等均有各 自的分布模式。

(1)全 C、N、P、S 在表层土壤中的含量显著高 于其在深层土壤中的含量。造成全 C、N、P、S 在表 层土壤中含量较高的主要原因是地表腐殖质层较 厚以及生物地球化学活动频繁。

(2)K<sub>2</sub>O、CaO、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>在表层土壤中含量明 显低于深层土壤中的含量,这主要是由于表生环境 中水分充足,导致这些组分更容易淋失。

(3)F、Cl、Br、I在表层土壤中高值区的分布位 置主要受深层土壤的影响,而 Br 和 I的富集与腐殖 质层中富含的有机质相关。

(4)内梅罗综合指数指示表层土壤中重金 属元素轻微超标,其中 Hg、Pb、Zn 单因子轻微超 标。As、Pb、Ni、Zn、Cd 在表层土壤中的高值区位 置多数继承于其深层土壤的高值区,而 Hg 在表 层土壤中含量较高,除了其对深层土壤高值区的 继承,还可能受地表腐殖质、森林火灾、人类活动 等方面影响。

#### 参考文献(References):

- Abakumov E V, Tomashunas V M, Lodygin E D, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in insular and coastal soils of the Russian Arctic [J]. Eurasian Soil Sci, 2015, 48 (12):1300 – 1305.
- [2] Moskovchenko D V, Kurchatova A N, Fefilov N N, et al. Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): Patterns of variation across landscapes[J]. Environ Monit Assess, 2017, 189(5):210.
- [3] Dauvalter V. Impact of mining and refining on the distribution and accumulation of nickel and other heavy metals in sediments of subarctic Lake Kuetsjärvi, Murmansk region, Russia[J]. J Environ Monit, 2003, 5(2):210-215.
- [4] Boyd R, Barnes S J, De Caritat P, et al. Emissions from the copper nickel industry on the Kola Peninsula and at Noril'sk, Rus-

sia[J]. Atmos Environ, 2009, 43(7): 1474 - 1480.

- [5] Zhulidov A V, Robarts R D, Pavlov D F, et al. Long term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr Peninsula (Russian Federation) North of the Norilsk Industrial Complex [J]. Environ Monit Assess, 2011, 181 (1/4): 539 – 553.
- [6] Antcibor I, Eschenbach A, Zubrzycki S, et al. Trace metal distribution in pristine permafrost affected soils of the Lena River delta and its hinterland, northern Siberia, Russia [J]. Biogeosciences, 2014, 11(1):1–15.
- [7] Desyatkin R V, Desyatkin A R. Thermokarst transformation of soil cover on cryolithozone flat territories [M]//Hatano R, Guggenberger G. Symptom of Environmental Change in Siberian Permafrost Region. Sapporo: Hokkaido University Press, 2006: 213 – 223.
- [8] 刘超,王宪伟,宋艳宇,等. 增温对冻土区泥炭沼泽土壤孔隙 水甲烷关联微生物和溶解性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2021,41(1):184-193.

Liu C, Wang X W, Song Y Y, et al. Effects of warming on abundances of methane – related microorganisms and concentration of dissolved organic carbon in soil pore water of permafrost peat swamp in Daxing' anling[J]. Acta Ecol Sin, 2021, 41 (1):184 – 193.

[9] 余炎炎,李梦莎,刘啸林,等.大兴安岭典型永久冻土土壤细 菌群落组成和多样性[J].微生物学通报,2020,47(9):2759-2770.

Yu Y Y, Li M S, Liu X L, et al. Soil bacterial community composition and diversity of typical permafrost in Greater Khingan Mountains[J]. Microbiol China, 2020, 47(9):2759 – 2770.

[10] 李泽宇,张志,邱天艺,等.来源于大兴安岭多年冻土可培养 真菌及其发酵物的生物活性[J].天然产物研究与开发, 2020,32(3):453-463.
Li Z Y,Zhang Z,Qiu T Y,et al. Culturable fungi from permafrost of Greater Khingan Mountains and biological activities of their fer-

mented products[J]. Nat Prod Res Dev,2020,32(3):453-463.
[11] 马大龙,刘梦洋,陈泓硕,等. 积雪覆盖变化对大兴安岭多年 冻土区土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报,2020, 40(3):789-799.
Ma D L,Liu M Y,Chen H S, et al. Effects of snow cover change on soil microbial community structure in permafrost region of Great Hing'an Mountains[J]. Acta Ecol Sin,2020,40(3):789-799.

- [12] 吴祥文,臧淑英,马大龙,等.大兴安岭多年冻土区森林土壤 温室气体通量[J].地理学报,2020,75(11):2319-2331.
  Wu X W,Zang S Y, Ma D L, et al. Greenhouse gas fluxes from forest soil in permafrost regions of Greater Hinggan Mountains, Northeast China [J]. Acta Geogr Sin, 2020, 75(11):2319 -2331.
- [13]常怡慧,牟长城,彭文宏,等.大兴安岭永久冻土区7种沼泽类型土壤温室气体排放特征[J].生态学报,2020,40(7):2333-2346.

Chang Y H, Mu C C, Peng W H, et al. Characteristics of greenhouse gas emissions from seven swamp types in the permafrost region of Daxing' an Mountains, northeast China[J]. Acta Ecol Sin, 2020,40(7):2333 – 2346.

[14] 张轩文,杨丽,刘晓宏,等.大兴安岭北部多年冻土区落叶松 和樟子松生长的气候响应差异研究[J].冰川冻土,2017, 39(1):165-174.

Zhang X W, Yang L, Liu X H, et al. Study of the difference in climate response of Dahurian Larch and Pinus sylvestris growth in the north Great Higgnan Mountains of permafrost regions, Northeast China[J]. J Glaciol Geocryol, 2017, 39(1):165 – 174.

- [15] 孙菊,李秀珍,王宪伟,等.大兴安岭冻土湿地植物的生态特征及分布区型[J].生态学杂志,2010,29(6):1061-1067.
  Sun J,Li X Z, Wang X W, et al. Ecological characteristics and areal types of permafrost wetland plants in Great Hing' an Mountains[J]. Chin J Ecol,2010,29(6):1061-1067.
- [16] 聂洪峰,肖春蕾,刘建宇,等. 生态地质调查工程与主要成果[J]. 中国质调查,2021,8(1):1-12.
  Nie H F,Xiao C L,Liu J Y, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. Geology Survey of Chi-

na,2021,8(1):1-12.
 [17] 黑龙江省地质矿产局.黑龙江省岩石地层[M].武汉:中国地

质大学出版社,1997:13-74. Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. Stratigraphy (Lithostratic) of Heilongjiang Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:13-74.

 [18] 李天杰,郑应顺,王云. 土壤地理学[M].2版. 北京:高等教育 出版社,1984:42-55.
 Li T J, Zheng Y S, Wang Y. Pedogeography[M]. 2nd ed. Beijing:

Higher Education Press, 1984;42 – 55.

[19] 姜海燕. 大兴安岭森林生态系统水文特性的研究[D]. 哈尔 滨:东北林业大学,2008.

Jiang H Y. Study on Hydrological Characteristics of Forest Ecosystem in Daxing'anling[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.

[20] 中华人民共和国国土资源部.多目标区域地球化学调查规范 (1:250 000):DZ/T 0258—2014[S].北京:中国标准出版社, 2014.

Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of multi – purpose regional geochemical survey (1:250 000);DZ/T 0258 – 2014[S]. Beijing; Standards Press of China,2014.

[21] 侯青叶,杨忠芳,余涛,等.中国土壤地球化学参数[M].北 京:地质出版社,2020;2180-2183.

Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil Geochemical Dataset of China [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 2180 – 2183.

- [22] 史长义,梁萌,冯斌. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景 值[J]. 地球科学,2016,41(2):234-251.
  Shi C Y, Liang M, Feng B. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. Earth Sci, 2016,41(2):234-251.
- [23] 史长义. 勘查数据分析(EDA)技术的应用[J]. 地质与勘探,

1993,29(11):52-58.

Shi C Y. Application of the exploratory data analysis technique [J]. Geol Explor, 1993, 29(11): 52 - 58.

- [24] Reimann C, Filzmoser P, Garrett R G. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination[J]. Sci Total Environ, 2005, 346(1-3):1-16.
- [25] Reimann C, Garrett R G. Geochemical background concept and reality[J]. Sci Total Environ, 2005, 350(1/2/3):12 – 27.
- [26] 廖启林,金洋,吴新民,等. 南京地区土壤元素的人为活动环 境富集系数研究[J]. 中国地质,2005,32(1):141-147.
  Liao Q L,Jin Y, Wu X M, et al. Artificial environmental concentration coefficients of elements in soils in the Nanjing area[J].
  Geol China,2005,32(1):141-147.
- [27] 雷传扬,李威,尹显科,等. 祁连山地区关键带过程与生态自然修复的关系研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2020,39
   (4):741-753.

Lei C Y, Li W, Yin X K, et al. Study on the relationship between process of critical zone and natural ecological restoration in the Qilian Mountains [J]. Bull Mineral, Petrol Geochem, 2020, 39(4):741-753.

- [28] 朱永官,李刚,张甘霖,等. 土壤安全:从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报,2015,70(12):1859-1869.
   Zhu Y G,Li G,Zhang G L, et al. Soil security:From earth's critical zone to ecosystem services [J]. Acta Geogr Sin, 2015, 70(12):1859-1869.
- [29] 安培浚,张志强,王立伟. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学进展,2016,31(12):1228-1234.
   An P J,Zhang Z Q,Wang L W. Review of Earth critical zone research[J]. Adv Earth Sci,2016,31(12):1228-1234.
- [30] 尼尔·布雷迪,雷·韦尔.土壤学与生活[M].李保国,徐建明,译.14版.北京:科学出版社,2019:38-60.
   Brady N C, Weil R R. The Nature and Properties of Soils[M]. Li B G, Xu J M, trans. 14th ed. Beijing: Science Press, 2019:38-60.
- [31] 成杭新,彭敏,赵传冬,等. 表生地球化学动力学与中国西南 土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J]. 地学前缘,2019, 26(6):159-191.
  Cheng H X, Peng M, Zhao C D, et al. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of distribution patterns of chemical elements in soil, Southwest China[J]. Earth Sci Front, 2019, 26(6):159-191.
- [32] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984:24-40.
  Liu Y J,Cao L M,Li Z L, et al. Geochemistry of Elements[M]. Beijing:Science Press,1984:24-40.
- [33] 李勇.重金属的生态地球化学与人群健康研究[M].广州:中山大学出版社,2014.
  Li Y. Study on the Ecological Geochemistry of Heavy Metals and Health of People [M]. Guangzhou: Sun Yat Sen University Press,2014.
- [34] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学,2012,33(1):260-265.

Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, et al. Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River basin [J]. Environ Sci, 2012, 33(1):260-265.

[35] 陆书玉.环境影响评价[M].北京:高等教育出版社,2001:163-164.

Lu S Y. Environmental Impact Assessment [M]. Beijing: Higher

Education Press, 2001:163 - 164.

[36] 戴前进,冯新斌,唐桂萍.土壤汞的地球化学行为及其污染的防治对策[J].地质地球化学,2002,30(4):75-79.
Dai Q J, Feng X B, Tang G P. The geochemical behavior of mercury in soil and its pollution control [J]. Geol - Geochem, 2002, 30(4):75-79.

# Spatial distribution patterns of soil chemical elements in important ecological function areas: A case study in Songling area of the Greater Khingan Mountains

YU Junbo, ZHOU Chuanfang, LIANG Zhongkai, SUN Yanfeng, JIANG Ping, HU Chen

(Center for Harbin Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Heilongjing Harbin 150056, China)

**Abstract**: The Greater Khingan Mountains forest belt is an important area in the ecological security pattern of *Two Barriers and Three Belts* in China. Songling area in the northern part of the Greater Khingan Mountains is currently a blank area for ecogeological survey. Exploring the content and spatial distribution pattern of soil elements can provide basic support for ecological protection and restoration in the study area. In this paper, based on the multi – purpose regional geochemical survey and analysis method, the authors discussed the geochemical characteristics and distribution patterns of each element index in surface and deep soils of Songling area. From the perspective of the elements distribution patterns, the content of total C, N, P and S in the surface soil was significantly higher, while the content of  $K_2O$ , CaO, Na<sub>2</sub>O and SiO<sub>2</sub> in the surface soil was significantly lower. The distribution positions of F, Cl, Br and I in the high value areas of the surface soil were mainly affected by the deep soil, and the enrichment of Br and I in surface soil was closely related to organic matter. As, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn and other heavy metal elements in the soil slightly exceeded the standard according to the Nemerow comprehensive index. **Keywords**: ecogeological survey; soil; ecological geochemistry; elements distribution pattern

(责任编辑:魏昊明,刘丹)