

# 辽东山地冰缘地貌上覆土壤粒度及元素地球化学

刘剑刚<sup>1</sup>, 张华<sup>1,2</sup>, 朱夏夏<sup>1</sup>, 朱岩<sup>1</sup>, 何红<sup>1</sup>, 刘玉国<sup>1</sup>, 兰玉波<sup>3</sup>, 王颖<sup>3</sup>, 马明军<sup>3</sup>

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029; 3. 辽宁老秃顶子国家级自然保护区管理局, 辽宁 桓仁 117218)

**摘要:**对辽东山地典型冰缘地貌上覆土壤的粒度、常量化学元素进行测试分析,结果表明:土壤颗粒组成包括黏粒 20.79%、粉粒 69.54%和砂粒 9.67%,平均粒径整体偏细,约为 6.45 $\Phi$ ,不同土壤类型、地貌类型及坡向的粒度分布存在一定差异。土壤元素化学组成以 SiO<sub>2</sub> (45.60%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12.90%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.90%), K<sub>2</sub>O (2.17%) 为主,最大比例可达 73.36%。元素 Ca, Na, P, Sr 显著淋溶,而 Mn, Ti, Cu, Zn 则相对富集,其他元素迁移不甚明显。少数元素还表现出与粒度分布存在显著关联,其中 K, Na, Sr, Ba 多存在于砂质土壤中,而元素 Ti 则容易在粒度更细致的黏土颗粒中留存。化学风化指数 CIA 均值约为 65.50, Rb/Sr 约为 0.70,反映风化程度较低,且长期经历干冷气候, A—CN—K 三角模型表明,研究区土壤风化以脱钙钠、富铝为主,风化水平尚处于低等风化阶段中后期。

**关键词:**冰缘地貌; 老秃顶子; 元素地球化学; 粒度; 化学蚀变指数

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0331-05

## Grain Size and Geochemical Characteristics of Overlying Soil on Periglacial Landforms in Eastern Liaoning

LIU Jiangang<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1,2</sup>, ZHU Xiaxia<sup>1</sup>, ZHU Yan<sup>1</sup>, HE Hong<sup>1</sup>,  
LIU Yuguo<sup>1</sup>, LAN Yubo<sup>3</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, MA Mingjun<sup>3</sup>

(1. School of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 2. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 3. Administration of Laotudingzi National Nature Reserve, Huanren, Liaoning 117218, China)

**Abstract:** The grain-size, major elements and microelements of the overlying soil in the typical periglacial landform in Mt. Laotudingzi have been analyzed. The results showed that most of the soil particles were fine, the mean grain size ranged from 5.41 $\Phi$  to 6.95 $\Phi$  with an average of 6.45 $\Phi$ , and the soil particles were made up of clay (20.79%) and silt (69.54%) and sand (9.67%). The distribution of grain sizes varied in different soils, landforms and aspects. The geochemical composition of soil elements are mainly dominated by SiO<sub>2</sub> (average value 45.60%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (12.90%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.90%) and K<sub>2</sub>O (2.17%), and the total proportion of them may reach up to 73.36%, which indicates that the silicate and aluminosilicate can be found widely in the soil. Under the condition of long-term chemical weathering, the amount of water soluble Ca leaching significantly increased, and it is the same as Na, P, Sr. However, the elements for low chemical reactivity are enriched at the same phase, such as Mn, Ti, Cu and Zn, and the transference of other elements is not obvious. All of the elements have been standardized by UCC. In addition, the correlation between grain-size and a few elements was observed, which could be interpreted that elements such as K, Na, Sr and Ba distributed widely in sandy soil and gradually dropped off in silt soil, while the element Ti was just reverse. The chemical index of alteration (CIA) was widely used as the index ascertaining the degree of chemical weathering, the value here ranged from 57.41 to 70.44 with an average of 65.50. With the addition of value of Rb/Sr, which ranged from 0.35 to 1.54 with an average of 0.70, it was reflected that the soil was slightly weathered and suffered long-term dry and cold climate. The introduction of the diagrammatize of A-CN-K made the research on chemical weathering intensity more direct and intuitive, as was indicated in the graph,

the weathering level of samples was at mid-late stage of lower chemical weathering which was characterized by leaching of Na, Ca and enriching of Al.

**Keywords:** periglacial landform; Mt. Laotudingzi; element geochemistry; grain size; chemical index of alteration

土壤的化学风化是地表圈层间相互作用的重要方式之一,化学元素的分布和迁移与土壤的发生及演化关系密切,同时,土壤的元素含量及粒度组成对植物群落的演替和生态系统的维持也具有重要意义<sup>[1-2]</sup>,良好的土壤环境是改善植被生境、降低山地灾害的必要条件<sup>[3]</sup>。辽东山地冰缘地貌广布,常见硕大砾石的杂乱堆积,其上覆浅薄土壤难成规模,胶结作用微弱,植物根系难以稳固,在暴雨、地震等诱发条件下,容易发生泥石流、山啸等山地灾害,而且植被自然更新缓慢,生态系统一旦遭到破坏便难以恢复<sup>[4]</sup>。因此,掌握研究区土壤的质地组成,合理利用土壤特性调节林分布局,加快演替进度,促进土壤进程,提高生态系统的稳定性已成为本区水土保持的重要内容。本文以典型冰缘地貌上覆土壤为研究对象,从元素地球化学角度给予初步研究,得到本区土壤特性的一些量化表达,为林业资源的经营管护、山地灾害的碎屑源研究及后续相关科考工作提供了有益的数据资料。

## 1 研究区概况

辽东山地老秃顶子国家级自然保护区(124°41′13″—125°5′15″E,41°11′11″—41°21′34″N)位于辽宁省东部桓仁、新宾两县交界处,主峰海拔1 367.3 m,被誉为辽宁第一峰。受白头山末次冰期影响,发育典型冰缘地貌,土壤类型以棕壤、暗棕壤为典型代表,多由花岗岩残积母质发育而成。地带性植被为温性落叶阔叶林,植物区系属长白区系西南边缘,兼有华北植物区系的过渡性。植物多样性丰富且垂直带谱明显,森林覆盖率达97%,属典型的北温带中山山地森林生态系统。境内气候类型属于温带大陆性季风湿润气候,年平均气温6.0℃,年降雨量651~1 315 mm,年平均相对湿度72%,年无霜期139 d<sup>[5]</sup>。

## 2 研究方法

于2013年6—7月,在辽东山区老秃顶子国家级自然保护区核心区进行野外调查研究,区分地貌类型并采用样地法(20 m×30 m)<sup>[6]</sup>,在不同海拔高度选取45处典型冰缘地貌,囿于上覆土壤沉积厚度普遍很薄,无法做完整剖面取样,且颗粒无明显粘连,故根据实际土层厚度取样0—20 cm不等。凋落物收集采用样方收获法(设置0.5 m×0.5 m)<sup>[7]</sup>,经纬度由易测宝T2 GIS采集器测定,地貌坡度、坡向、海拔高度

均从1:50 000 DEM中提取(图1)。

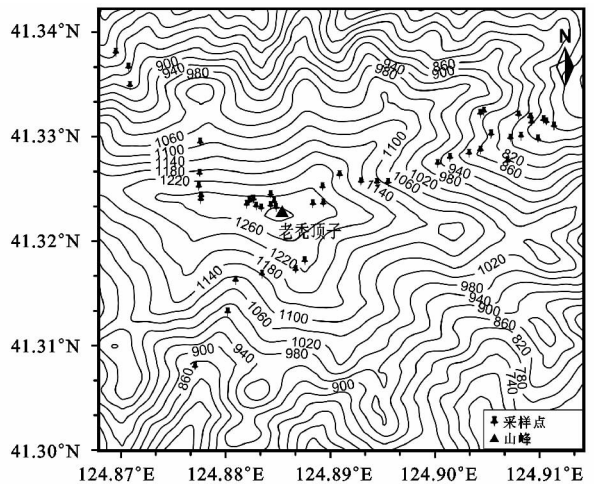


图1 研究区样地分布情况

采用日本 Rigaku ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪进行土壤地球化学分析。供试土壤样品均经自然风干、碾碎、去渣、过2 mm筛、压样处理,分析结果以元素氧化物为标度方法。粒度分析采用美国 Beckman 公司生产的 LS13 320 激光衍射粒度分析仪(测量范围0.04~2 000 μm),粒径表达参照Φ标尺:Φ值由克伦宾公式转化: $\varphi = -\log_2 d$ (d为mm单位直径值),粒度参数由矩值法计算得出<sup>[8]</sup>。土壤化学风化程度采用化学蚀变指数(CIA)表达, $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO^*)] \times 100$ (表示长石风化成黏土矿物的程度,式中氧化物以分子摩尔数计算,CaO\*指硅酸盐矿物中CaO摩尔含量),其值越大指示化学风化越强<sup>[9]</sup>。另完成烧失量测量及土壤pH值测定(ExStik-PH100笔式pH计)。试验均在辽宁师范大学测试中心完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤粒度

按乌顿—温德华氏粒级标准,区内土壤颗粒组成主要为黏粒20.79%(<0.004 mm)、粉砂颗粒69.54%(0.004~0.063 mm)和砂颗粒9.67%(0.063~2 mm)。其中黏粒比例介于10.52%~26.85%,标准差为3.74%,后两者则分别为56.32%~82.35%,1.40%~30.89%,标准差5.17,5.41,变幅稍大,是各样品粒度分布差异的主要贡献者。根据海洋地质调查规范中分类命名原则<sup>[10]</sup>,区内土壤质地可分为:黏土质粉砂、粉砂、砂质粉砂。供试样品平

均粒径约为  $6.45\Phi(5.41\Phi\sim6.95\Phi)$ , 偏度以正偏为主(占 55.6%), 峰态介于 2.43~4.04, 很窄峰( $K_g<3.00$ )占 83.3%, 反映土壤颗粒整体较细、集中度高, 粗粒度端拉长趋势明显, 但比重很低。对比不同土壤类型, 暗棕壤颗粒(平均粒径约  $6.48\Phi$ ) 细于棕壤( $6.41\Phi$ ), 石海地貌土壤颗粒( $6.40\Phi$ ) 粗于石流坡( $6.61\Phi$ ), 北坡( $6.57\Phi$ ) 土壤颗粒细于向阳南坡( $6.49\Phi$ )。其中石海地貌以灌丛、灌草丛覆盖为主, 覆盖率高; 石流坡则植被覆盖率较低; 石河地貌植被覆盖优良, 以高大乔木为主, 林下凋落物量积累程度不高, 反映微生物的分解作用显著。

3.2 土壤元素分布特征

研究区上覆土壤有机质含量较高, 常量元素氧化物以  $\text{SiO}_2$  (45.60%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.90%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3.90%),  $\text{K}_2\text{O}$  (2.17%) 为主要组分, 合计含量最高可达 73.36%,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  含量较低, 分别为 1.44%, 1.32%, 1.14%,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量均不

足 1%, 各为 0.09%, 0.60%, 0.24%。微量元素氧化物  $\text{SrO}$  为  $169.11\text{ }\mu\text{g/g}$ ,  $\text{BaO}$  为  $484.89\text{ }\mu\text{g/g}$ ,  $\text{CuO}$  为  $35.22\text{ }\mu\text{g/g}$ ,  $\text{ZnO}$  为  $109.93\text{ }\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$  为  $115.53\text{ }\mu\text{g/g}$ (图 2)。海拔梯度上, 常量元素  $\text{Ca}$  和  $\text{Mn}$  含量波动显著, 变异系数达 35.05%, 37.35%,  $\text{P}$  元素( $\text{C.V.}20.00\%$ ) 含量明显随海拔降低呈波动减小, 是与针叶林下(石流坡地貌) 土壤酸性淋溶有密切关系<sup>[11]</sup>,  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$  变异系数约为 10%, 变化相对较小; 微量元素含量整体波动明显, 变异系数介于 19.05%~31.01%, 元素  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sr}$  含量变幅相对突出, 余者相差不大。此分布形式缘于  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}$  等都是水溶性较强的元素, 易发生淋溶作用, 极易在化学风化过程中迁移,  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$  化学活性比较稳定, 在表生环境中不易迅速风化, 即使被解析出来, 也多转变为次生黏土矿物存留下来, 而  $\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}$  稳定性虽较前者稍差, 但不易形成可溶化合物, 所以元素含量变化并不显著。

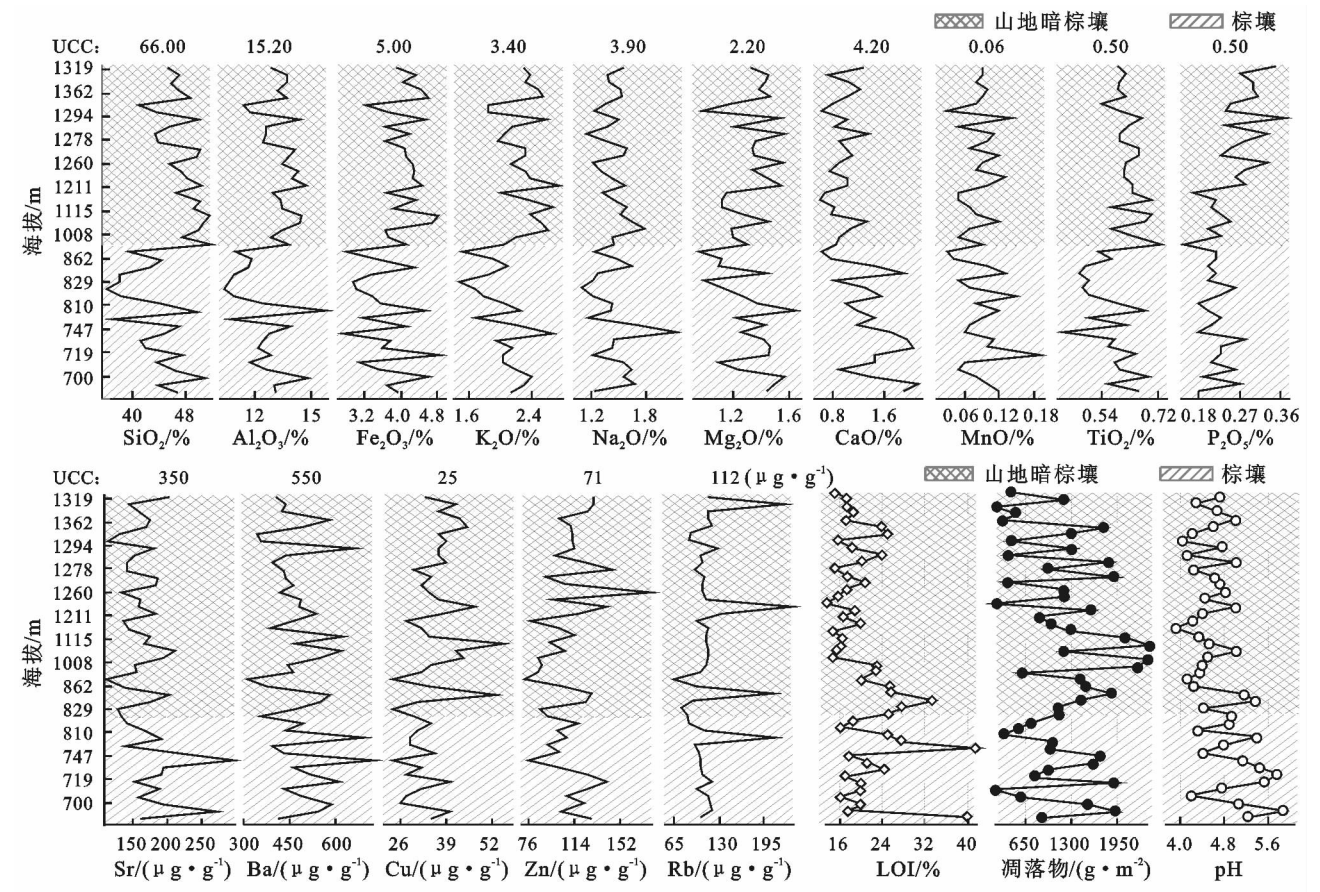


图 2 常、微量元素氧化物含量及烧失量、pH、凋落物量变化

对供试样品常微量元素进行上陆壳标准化处理(上陆壳 UCC 及陆源页岩 PAAS 来源于文献[12]) 得到图 3: 常量元素无论按土壤类型、地貌类型, 还是不同坡向, 均表现为  $\text{Mn}$  和  $\text{Ti}$  高于 UCC,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{P}$  依次呈低值, 其他元素与 UCC 水平接近。其中  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$  等稳定元素的含量比大连七顶山黄土、洛川黄

土酸不溶相、镇江下蜀黄土等都要低<sup>[12]</sup>, 甚至表现出轻微的量亏损。根据  $\text{pH}$  值测试结果, 供试样品  $\text{pH}$  值约为 4.69(图 2), 说明本区土壤酸性较强, 元素整体都发生了不同程度的淋溶。活性元素  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$  多存在于碳酸盐矿物中, 在山地小气候的丰富降雨条件下会因水溶而显著淋失, 微量元素  $\text{Sr}$  同样在丰水条件

下容易以游离态随地表水、地下水流失或存在土壤溶液中。而 Mn, Ti, Cu, Zn 的相对富集一方面在于化学稳定性较好(如 Ti 不易形成可溶化合物), 另一方面在于植物体在充分利用这些必需元素后, 还会以凋落物的形式将元素返还地表, 其含量多少及波动状况与植物量也有一定关系, 而且游离的 Cu, Mn, Zn 也容易附着于有机质及黏土矿物, 所以其含量的多少在

一定程度上也指示了土壤所受的风化程度。另外, 地处较高海拔的暗棕壤元素含量变幅较棕壤更大、海拔较低且植被覆盖良好的石河地貌常微量元素变幅较小, 冰缘遗迹较多的北坡常微量元素比向阳南坡淋失更多、富集更少、元素含量变幅也更小, 反映水热条件差异及植被覆盖程度对元素的分布存在一定影响, 植物体在元素的迁移过程中起到一定的吸收、缓冲作用。

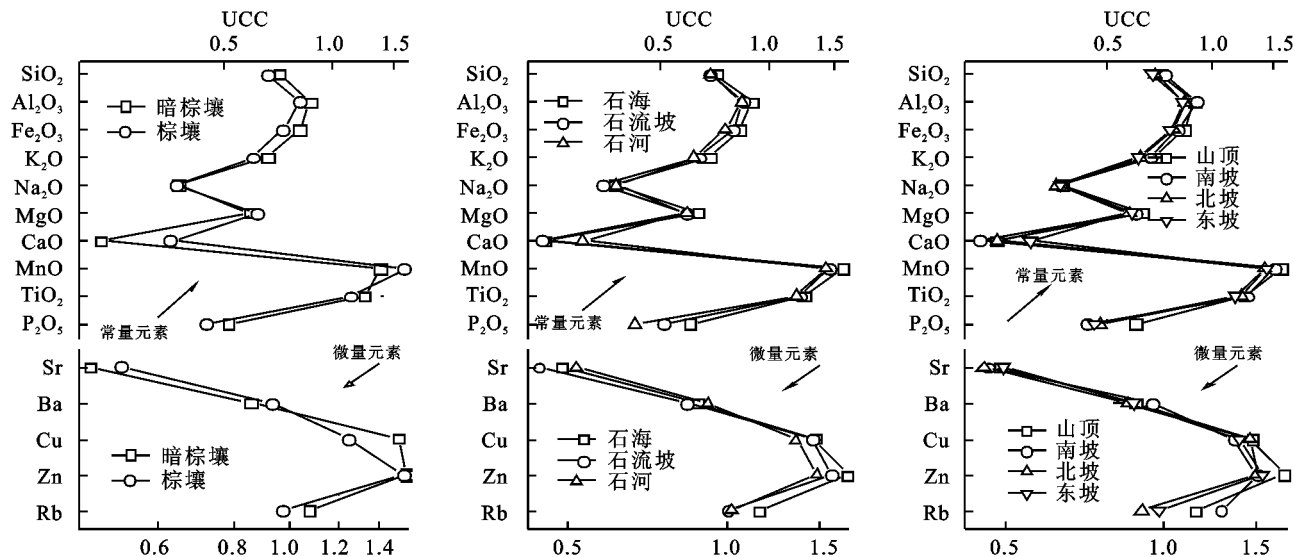


图 3 经上陆壳标准化的常微量元素氧化物含量变化

### 3.3 化学风化强度

供试土壤样品 CIA 介于 57.41~70.44, 平均值为 65.50, 其中, 介于 55~70 的样品占 97.8%, 对比前人结果<sup>[13]</sup>, 可知本区成土母质来源于黄土和更新世冰川黏土, 而矿物多以斜长石风化, 转向伊利石、蒙脱石为主, 风化水平不高。另外, 对 Rb/Sr<sup>[14]</sup> 的计算结果显示, 比值介于 0.35~1.54, 平均值仅为 0.70, 指示风化环境以干冷气候占据主导, 暖湿气候则相对较少。对比暗棕壤(66.98)、棕壤(63.07), 石海(66.50)、石流坡(66.58)、石河(64.29), 山顶(66.50)、北坡(66.13)、南坡(68.02)、东坡(64.37)等不同土壤类型、不同地貌、不同坡向的样品 CIA 值, 能够发现较低植被覆盖率(对应石流坡地貌植被覆盖)<sup>[5]</sup> 和较高海拔有利于化学风化, 尤其是向阳坡风化强度将更大, 而且, 常微量元素的淋失和富集强度与不同环境下的 CIA 值变化具有一致性。风化过程中元素的迁移行为, 可以通过 A-CN-K 三角模型来表达, 其原理: 陆源页岩(PAAS)是典型的上陆壳(UCC)初级风化产物, UCC 指向 PAAS 的方向代表典型的大陆初期风化趋势<sup>[12]</sup>。供试样品数据点整体排列方向与 UCC→PAAS 方向一致, 供试样品 CIA 集中在 60~70(83.3%), 小于 PAAS(70.36)<sup>[15]</sup>, 但远高于 UCC(47.9)<sup>[16]</sup>, 指示研究区土壤已经过长期低等风化, 但尚未超过陆源页岩的风化程度。其中斜长石矿物大量风化, 土壤进程表

现出脱钙钠、富铝的主要趋势, 钾长石矿物比例在此间稍有上升, 说明土壤风化水平处于低等风化阶段中后期, 并将逐渐进入脱钾、富铝阶段。相对澧阳平原沉积物(74.37)和洛川黄土(63.73)<sup>[17]</sup>, 本区 CIA 更接近辽南马兰黄土(64.14)<sup>[12]</sup>, 说明风化强度与其大体一致, 或稍强于地处半岛南端的马兰黄土, 对应的风化环境主要为寒冷、干燥气候。

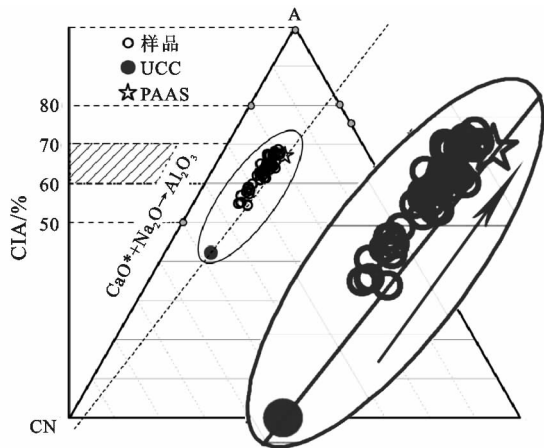


图 4 A-CN-K 三角图解

## 4 讨论与结论

研究区冰缘地貌上覆土壤在成土过程中长期经历干冷环境, 鲜有暖湿气候交替变换, 土壤厚度很薄、风化程度尚处于初等阶段末期, 但自然肥力较强。对

烧失量的计算结果(图 2)显示,本区土壤中有有机质含量高达 19.54%,此缘于冰缘期的冰冻条件对有机质的积累和冰缘期后<sup>[18]</sup>温暖、湿润气候导致的气温回升、降水增加、地表植被迅速覆盖。同时,凋落物量也相应增大,约为 1 153.37 g/m<sup>2</sup>(图 2),这既促进了元素循环,又有利于土壤表层腐殖质的累积,对增强土壤肥力,提高成壤水平起到积极作用<sup>[19]</sup>。

根据前人研究成果<sup>[20]</sup>,土壤粒度与元素的分布存在一定的控制关系。对本区土壤粒度和元素的相关分析结果表明(表 1),K,Na,Sr,Ba 都呈现出与砂粒显著正相关,与粉砂显著负相关(Ba 负相关),表明四种元素多存在于透水较好、粒度稍粗的砂质土壤

当中,而当颗粒细至粉砂、甚至到黏粒时,元素含量将随风化淋溶强度的增大逐渐减小。其中,元素 Sr 的分布与粒度关系密切,其元素活性强于 Ba,吸附能力弱于 K,在暖湿环境下的酸性土壤中,容易以 Sr<sup>2+</sup> 的游离态存在于土壤溶液中。而同样显著淋失的 Ca 并未与粒度表现出良好的相关关系,是由于淋失后的 Ca 会以其他化合物形式存留(如胶体沉淀、生物壳体)<sup>[21]</sup>,元素 Ti 则因化学性质较稳定,即使经历较强风化,仍难形成可溶化合物,表现为随风化程度的加深而逐渐累积。本区土壤粒度与元素的关系特征大体契合了低等风化阶段元素的淋失与富集规律。

表 1 元素含量与粒度的相关性

常量元素	黏粒	粉粒	砂粒	常量元素	黏土	粉粒	砂粒	微量元素	黏土	粉粒	砂粒
SiO <sub>2</sub>	0.233	-0.256	0.083	MgO	0.048	-0.017	-0.017	Sr	-0.367 *	-0.512 * *	0.742 * *
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.134	-0.215	0.113	CaO	-0.255	-0.090	0.262	Ba	-0.044	-0.375 *	0.389 * *
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.267	-0.018	-0.201	MnO	0.063	0.175	-0.210	Cu	0.156	-0.031	-0.078
K <sub>2</sub> O	0.011	-0.423 * *	0.397 * *	TiO <sub>2</sub>	0.326 *	0.116	-0.337 *	Zn	0.145	0.144	-0.237
Na <sub>2</sub> O	-0.201	-0.701 * *	0.808 * *	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.094	0.180	-0.108	Rb	0.0945	-0.277	0.199

注: \* \* 表示  $p=0.01$ ,极显著相关; \* 表示  $p=0.05$ ,显著相关。

通过不同坡位的元素及粒度特征对比结果,能够发现影响本区成土进程的主要因素有两方面:一是水热条件直接影响土壤形成过程的方向和强度,如温暖、湿润的气候有利于氧化、水解等化学作用的进行。二是植物体对土壤中元素的利用及归还,不仅促进了物质循环,还通过制造有机质推动了土壤的形成和演化。由此可知,增加植被覆盖,人为植苗造林(尤其混交林)是改善土壤质量,提高地貌稳定的实际工作需要。另外,淋溶土的肥力下降较快,容易发生水土流失,固土保肥和防止内涝同样是不可忽视的重要工作。综上可概括本文结论为:

(1) 辽东山地冰缘地貌上覆土壤粒度组成以粉砂为主,平均粒径 6.45Φ, 粒级较为集中且整体颗粒细致,在良好植被覆盖和向阳坡条件下,土壤粒度表现更粗。元素地球化学组成以 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 为主,活性较强的常、微量元素 Ca, Na, P 和 Sr 显著淋溶,而较稳定元素 Mn, Ti 和 Cu, Zn 则相对富集,水热条件及植被覆盖对元素的迁移均有影响。

(2) 少数元素与粒度特征存在显著关联,元素 K, Na, Sr, Ba 多存在于透水较好、粒度稍粗的砂质土壤中,其含量变化随土壤颗粒变细逐渐减小;而稳定元素 Ti 则易于留存在颗粒更细的黏粒中,其富集量在一定程度上能够反映本区土壤的风化进程。

(3) CIA 指数(57.41~70.44)和 Rb/Sr(0.35~1.54)平均值各为 65.50, 0.70, 结合 A—CN—K 图解所示,本区土壤长期处于寒冷、干燥的气候环境,风

化水平尚处于低等风化中后期,土壤进程以脱钙钠、富铝为主要趋势,并将逐渐进入脱钾、富铝阶段。

参考文献:

[1] 邓羽松,丁树文,蒋代华,等. 苍梧县崩岗洪积扇不同培肥模式土壤肥力特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (1):56-60.

[2] 罗志忠,高华端,李圆玥,等. 长顺冗雷河小流域草地治理模式下土壤肥力评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (1):44-50.

[3] 张华,刘剑刚,伏捷,等. 辽东山地老秃顶子冰缘地貌植物群落类型及基本特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2):500-510.

[4] 董厚德,唐炯炎. 辽东山地“乱石窖”植被演替规律的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1965, 3(1): 117-130.

[5] 刘剑刚,张华,伏捷,等. 辽东山地老秃顶子冰缘地貌特征及其环境意义[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6):1420-1429.

[6] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海:华东师范大学出版社, 2001.

[7] 王百群,姜峻,都全胜,等. 黄土丘陵区人工草地牧草营养元素累积及土壤有机碳与养分特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6):127-132.

[8] Friedman G M, Sanders J E. Principles of Sedimentology[M]. New York:John Wiley& Sons, 1978.

[9] Nesbitt H W, Young G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299:715-717.

- 26(11):358-361.
- [3] 易秀,谷晓静,侯燕卿,等. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(6):217-221,252.
- [4] 刘勇,岳玲玲,李晋昌,等. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011,31(6):1285-1293.
- [5] 程街亮,史舟,朱有为,等. 浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. 水土保持学报, 2006,20(1):103-107.
- [6] 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006,26(1):146-153.
- [7] 巫和听,胡雪峰,张国莹,等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2004,10(4):400-405.
- [8] 王芬,彭国照,蒋锦刚,等. 基于双层神经网络与 GIS 可视化的土壤重金属污染评价[J]. 农业工程学报, 2010,26(4):162-168.
- [9] 刘勇,张红,尹京苑,等. 汾河太原段土壤中 Hg,Cr 空间分布与污染评价[J]. 农业工程学报, 2008,24(5):57-60.
- [10] 钟山,高慧,张漓衫,等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2014,23(1):164-169.
- [11] 贺跃,胡艳华,王秋潇,等. 大冶大港河水系沉积物中重金属来源分析[J]. 地球化学, 2011,40(3):258-265.
- [12] 宋泽峰,栾文楼,崔邢涛,等. 冀东平原土壤重金属元素的来源分析[J]. 中国地质, 2010,37(5):1530-1538.
- [13] 易治伍,王灵,钱翌,等. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009,23(2):150-154.
- [14] 李国莉. 奎屯市北郊蔬菜污灌区土壤重金属污染调查[J]. 干旱环境监测, 2003,17(4):218-221.
- [15] 陈洪,特拉津·那斯尔,杨剑虹,等. 伊犁河流域土壤重金属含量空间分布及其环境现状研究[J]. 水土保持学报, 2013,27(3):100-105.
- [16] 赵彩凤,陈蜀江,梁艳,等. 新疆夏尔西里自然保护区生态系统评价[J]. 科技创新导报, 2013(10):146-149.
- [17] 赵阳,陈蜀江,马静,等. 夏尔西里自然保护区野生近缘植物研究[J]. 科技创新导报, 2013(13):142-143.
- [18] 马春林. 基于 RS 的山地植被 NPP 遥感地形模型研究[J]. 国土资源信息化, 2009(1):33-36.
- [19] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008,31(2):112-115.
- [20] 穆叶赛尔·吐地,吉力力·阿布都外力,姜逢清,等. 天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(7):883-890.
- [21] 程芳,程金平,桑恒春,等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013,34(3):1062-1066.
- [22] 邱海源. 土壤重金属潜在生态危害评价及其同源相关性研究[J]. 资源节约与环保, 2011(1):68-70.

~~~~~

(上接第 335 页)

- [10] 国家海洋局. 海洋调查规范(第 8 部分):海洋地质地球物理调查 GB/T12763.8—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [11] 郑楠,张华,武晶,等. 辽宁老秃顶子北坡植物群落物种多样性及其与土壤特性的相关性分析[J]. 生态科学, 2009,28(6):510-515.
- [12] 张威,董应巍,于洋,等. 辽南黄土化学风化特点及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013,33(5):163-171.
- [13] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J]. 中国沙漠, 2014,34(6):1441-1453.
- [14] 曾艳,陈敬安,朱正杰,等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. 地球科学进展, 2011,26(8):805-810.
- [15] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochem Cosmochim Acta*, 1980,44(11):1659-1666.
- [16] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. London:Blackwell Scientific Publications, 1985:277.
- [17] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等. 澧阳平原岩板挡剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. 地理科学, 2013,33(3):335-341.
- [18] 牟翠翠,张廷军,曹斌,等. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究[J]. 冰川冻土, 2013,35(1):1-9.
- [19] 刘骄,黄义雄,叶功富,等. 福建沿海主要防护林树种的生物量、凋落物及其对林下土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2011,18(1):146-152.
- [20] 许冬. 海南岛近海沉积地球化学研究[D]. 杭州:国家海洋局第二海洋研究所, 2007.
- [21] 杜德文,石学法,孟宪伟,等. 黄海沉积物地球化学的粒度效应[J]. 海洋科学进展, 2003,21(1):78-82.