

# 火烧迹地不同恢复方式土壤团聚体微生物量碳特征

李红运, 辛颖, 赵雨森

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为探讨不同恢复方式对大兴安岭重度火烧迹地土壤团聚体形成及其团聚体碳循环的影响, 以大兴安岭 1987 年重度火烧后分别经过人工恢复(兴安落叶松、樟子松)和天然恢复的林分为研究对象, 分析不同恢复方式下土壤团聚体有机碳、团聚体微生物量碳和团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳的分布特征。结果表明: (1) 不同林型间土壤团聚体有机碳含量、团聚体微生物量碳含量和团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其大小关系均是兴安落叶松人工林  $>$  天然次生林  $>$  樟子松人工林。(2) 在不同植被恢复方式下, 土壤有机碳含量和微生物量碳含量呈随团聚体粒径增大而增大的趋势, 且大团聚体显著高于微团聚体 ( $P < 0.05$ ), 土壤  $K_2SO_4$  浸提碳主要分布于 1~0.5 mm 粒径及其更大粒径团聚体中。(3) 土壤团聚体有机碳和团聚体微生物量碳富集于土壤表层(0—5 cm), 其含量均随土层深度的增加而减小。除  $>2$  mm 和 2~1 mm 粒径外, 其余粒径团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量呈随土层深度增加而减小的趋势。(4) 土壤微生物量碳与土壤有机碳和  $K_2SO_4$  浸提碳呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 说明土壤微生物量碳与有机碳和  $K_2SO_4$  浸提碳之间有密切联系。

**关键词:** 大兴安岭; 火烧迹地; 土壤团聚体; 微生物量碳;  $K_2SO_4$  浸提碳

**中图分类号:** S714.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)05-0342-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.057

## Characteristics of Microbial Biomass Carbon in Soil Aggregates of Burned Area under Different Restorations

LI Hongyun, XIN Ying, ZHAO Yusen

(School of Forestry Northeast Forestry University, Harbin 150040)

**Abstract:** In order to explore the effects of different restoration approaches on soil aggregates' formation and its cycle carbon of severely burned area in Greater Xing'an Mountains, the artificial restoration (*Larix gmelini* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica*) and the natural regeneration of forest in Greater Xing'an Mountains after the severely burned in 1987 respectively were chosen as the research object and analyzed the distribution features of organic carbon, microbial biomass carbon and  $K_2SO_4$ -extractable carbon in soil aggregates under different restoration approaches. The results showed that: (1) There were significant difference ( $P < 0.05$ ) for the contents of organic carbon, microbial biomass carbon and  $K_2SO_4$ -extractable carbon in soil aggregates among different forest types, which the characteristics were *Larix gmelini* plantation  $>$  natural secondary forest  $>$  *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation. (2) Under different vegetation restorations, soil organic carbon and microbial biomass carbon presented an increasing trend along with increasing of particle size of aggregate, and the large aggregates were significant higher amounts of both the soil organic carbon and microbial biomass carbon than the micro aggregates ( $P < 0.05$ ), the  $K_2SO_4$ -extractable carbon mainly distributed in the 1~0.5 mm particle size and larger size aggregate. (3) The organic carbon and microbial biomass carbon in soil aggregates mainly distributed in soil surface layer (0—5 cm), which the contents decreased with the increase of soil depth. Except  $>2$  mm and 2~1 mm aggregates, the contents of  $K_2SO_4$ -extractable carbon in soil aggregates presented a decreasing trend along with the increase of soil depth. (4) Microbial biomass carbon had significant positive correlations ( $P < 0.01$ ) with soil organic carbon and  $K_2SO_4$ -extractable carbon, revealing that microbial biomass carbon had close relationship with soil organic carbon

收稿日期: 2016-03-12

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD08B02)

第一作者: 李红运(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 531449266@qq.com

通信作者: 赵雨森(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhaoy1957@163.com

and K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-extractable carbon.

**Keywords:** Great Xing'an Mountains; burned area; soil aggregates; microbial biomass carbon; K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-extractable carbon

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤微生物活动的主要场所,土壤的物质和能量循环转化主要发生在团聚体内,团聚体的数量和质量决定土壤的性质和肥力<sup>[1-3]</sup>。土壤微生物与土壤团聚体的形成密切相关,许多细菌细胞和真菌菌丝直接参与了土壤颗粒的团聚<sup>[4]</sup>。土壤微生物量直接参与和调控土壤的能量流和养分循环,对土壤养分转化和有效供应起着非常重要的作用,在很大程度上反映了土壤的质量和微生物数量,是评价土壤微生物数量和活性的重要指标<sup>[5]</sup>,因此研究土壤团聚体微生物量碳的分布,对阐明土壤团聚体形成、土壤养分循环以及确定土壤生物学指标指示作用具有重要的意义<sup>[6]</sup>。大小不同的团聚体其有机碳含量和微生物数量及种群差异较大,有研究认为,大团聚体较小团聚体微生物量碳含量高,也有研究指出微团聚体中微生物活性更高<sup>[7]</sup>,可见不同大小的团聚体在土壤肥力保持、稳定及提高上所起的作用不一样<sup>[8]</sup>。目前国内对土壤微生物量研究较多,如耕作方式<sup>[9]</sup>,不同土地利用<sup>[10]</sup>以及植被类型<sup>[11]</sup>对土壤微生物量碳、氮等的影响,但关于团聚体中微生物量分布特征的研究较少,以及植被恢复方式对土壤团聚体中微生物量影响的研究更是缺乏。

大兴安岭林区位于我国最北端,地处寒温带季风气候区,是我国东北林区的重要组成部分。因其独特的地理位置及气候特征使本地区成为我国重要的木材供应基地,同时,也在维护东北亚地区的生态安全上具有不可替代的作用<sup>[12]</sup>。然而该地区也是我国森林火灾发生最严重的地区,林火是威胁该地区森林资源安全的最严重因子,严重的森林火灾会显著地改变森林生态系统的结构和演替过程。因此,火烧迹地的植被更新、土壤质量健康是森林生态系统结构和功能恢复的关键,也是人们密切关注的焦点。

本文以大兴安岭重度火烧后经过人工恢复和天然恢复的森林生态系统为研究对象,分析土壤团聚体微生物量碳特征分布,探讨火烧迹地不同恢复方式下土壤团聚体碳循环特征,为火烧迹地植被恢复与重建提供理论依据。

2.2 样品采集及测定

2.2.1 样品采集 在每个临时标准地内,按“Z”字形

1 研究区概况

研究地区位于阿木尔林业局红旗林场,隶属黑龙江省大兴安岭地区漠河县所属管辖,地理坐标为东经 122°38′30″—124°05′05″,北纬 52°15′03″—53°33′15″。东临塔河林业局,南临呼中林业局,西与图强林业局接壤,北与俄罗斯隔江相望。阿木尔林业局地势总体情况较为平缓,大多数为坡度低于 15°的中低山丘陵地区,全局南高北低,平均海拔为 500~800 m。属于寒温带大陆性气候,夏季炎热、短暂,冬季严寒、漫长,昼夜温差大。年平均气温-2.6℃,7 月份最高气温 35℃,1 月份最低气温-49.5℃。年平均降水量 428.6~526.8 mm,全年无霜期 80~110 d,冰封期 180~200 d。土壤以棕色针叶林土为主,另有沼泽土和泥炭土。土层普遍较薄,砾石含量较大。植物资源丰富,主要乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelini*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphlla*)等,主要灌木树种有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)、杜香(*Ledum palustre* var. *dilatatum*)等,主要草本植物有莎草科(Cyperaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、菊科(Compositae)、豆科(Leguminosae)等植物。

2 研究方法

2.1 样地设置

2015 年 7 月,对大兴安岭阿木尔林业局 1987 年重度火烧后分别经过人工恢复和天然更新的森林生态系统进行踏查,选取立地条件相同且具有典型代表性的樟子松人工林、兴安落叶松人工林和天然次生林为研究对象,所选林分重度火烧前均为兴安落叶松林。樟子松人工林和兴安落叶松人工林是 1989 年在重度火烧迹地上栽植的人工林(3 300 株/hm<sup>2</sup>,栽种后连续 3 年人工抚育);天然次生林是自 1987 年重度火烧后天然更新、未受任何人为干扰。在每个林分内分别设置 3 个 20 m×30 m 临时标准地,进行标准地调查,详情见表 1。

表 1 样地基本情况

| 样地类型     | 火烧年份(年) | 造林年份(年) | 坡向 | 坡度/(°) | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 郁闭度 |
|----------|---------|---------|----|--------|---------|--------|-----|
| 樟子松人工林   | 1987    | 1989    | 半阳 | 5      | 7.64    | 6.80   | 0.6 |
| 兴安落叶松人工林 | 1987    | 1989    | 阳  | 6      | 13.16   | 11.90  | 0.7 |
| 天然次生林    | 1987    | 天然更新    | 阳  | 7      | 4.30    | 6.12   | 0.4 |

设置 5 个取样点,每个取样点分别按 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 3 层用取样盒采集原状土样,避免挤压,

保持原状土壤结构。将采集的土样在室内沿自然结构轻轻掰成直径约 1 cm 的小土块,除去植物残体和其他杂物。取少量土壤用于测定土壤的基本理化性质(表 2),余下的土壤用沙维诺夫干筛法分离出>2 mm,2~

1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm,<0.25 mm 5 级团聚体。将分级后的土壤样品的湿度调节至田间持水量的 50%,25 ℃ 下培养 7~10 d 后,迅速测定微生物量碳和 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳。所有测定均重复 3 次。

表 2 土壤的基本理化性质

| 林型    | 土层<br>/cm | pH   | 土壤容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 微生物量碳/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 微生物量氮/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------|-----------|------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 兴安落叶松 | 0—5       | 5.26 | 0.76                           | 114.66                        | 2.84                         | 1199.69                          | 102.46                           |
|       | 5—10      | 5.32 | 0.98                           | 83.61                         | 2.20                         | 882.66                           | 86.67                            |
| 人工林   | 10—20     | 5.31 | 1.12                           | 61.17                         | 1.62                         | 463.79                           | 58.55                            |
| 樟子松   | 0—5       | 6.38 | 1.13                           | 53.12                         | 1.17                         | 351.35                           | 46.61                            |
|       | 5—10      | 6.14 | 1.23                           | 28.20                         | 0.61                         | 251.52                           | 40.91                            |
| 人工林   | 10—20     | 6.19 | 1.38                           | 16.60                         | 0.42                         | 200.85                           | 36.12                            |
| 天然次生林 | 0—5       | 4.38 | 0.87                           | 71.01                         | 1.57                         | 894.53                           | 79.55                            |
|       | 5—10      | 4.91 | 1.05                           | 52.91                         | 1.04                         | 463.74                           | 66.51                            |
|       | 10—20     | 5.15 | 1.24                           | 32.64                         | 0.91                         | 250.01                           | 41.45                            |

2.2.2 土壤微生物量碳 采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量碳<sup>[4]</sup>。称取 25 g 相当于烘干土壤质量的预培养湿润土壤于 50 ml 的烧杯中,与盛有 50 ml 氯仿的烧杯一起放入真空干燥器中,抽真空至氯仿沸腾后保持 5 min。将干燥器放入 25 ℃ 的黑暗条件下培养 24 h 后,再次抽真空至完全去除土壤中的氯仿。将去除氯仿的土壤完全转移到 200 ml 三角瓶中,加入 50 ml 0.5 mol/L 的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,振荡 30 min 后过滤,迅速测定滤液中的含碳量,或在低温(−17 ℃)下保存。熏蒸开始的同时,另称取等量预培养土壤,加入等量 0.5 mol/L 的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提并迅速测定碳含量,视为未熏蒸。测定滤液碳含量,并根据下列公式计算微生物碳含量。

土壤微生物生物量碳:MBC= $E_c/K_E$

式中: $E_c$  为熏蒸和未熏蒸土壤的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取液的碳含量的差值; $K_E$  为转换系数,取值为 0.38。

2.2.3 土壤矿质营养测定 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳是指采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取法浸提的可溶性有机碳。将 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液(0.5 mol/L)按土水比 1:5 振荡浸提 30 min 过滤,滤液采用德国生产的 multi N/C 2100 分析仪测定,有机碳也采用 multi N/C 2100 分析仪测定。有机碳单位为 g/kg,K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳单位为 mg/kg。

2.3 数据处理

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件。方差分析采用最小显著极差法(LSD),不同字母表示差异性显著( $P<0.05$ ),所有数据测定结果以平均值±标准差的形式表达。

3 结果与分析

3.1 土壤团聚体分布特征

由图 1 可知,不同恢复方式下林地土壤各粒径团聚体质量分数存在一定差异。0—5 cm 土层,兴安落叶松人工林和樟子松人工林土壤>2 mm 粒径质量

分数显著大于其他粒径,分别为 48.16%和 38.66%;天然次生林土壤 1~0.5 mm 粒径质量分数在 5 个粒径中最大,值为 36.16%,<0.25 mm 粒径质量分数最小,值为 8.46%,且与其他粒径之间差异显著( $P<0.05$ )。5—10 cm 土层,3 个林地土壤的各粒径间质量分数差异与 0—5 cm 土层相似。10—20 cm 土层,人工林(兴安落叶松林、樟子松林)和天然次生林土壤>2 mm 粒径质量分数显著大于其他粒径。

不同土层相比较,兴安落叶松人工林和樟子松人工林土壤>2 mm 粒径团聚体比例没有差异,而天然次生林>2 mm 粒径团聚体比例随土层深度的增加而增加。说明植被恢复方式不同,土壤大团聚体(>2 mm)的垂直分布特征不同,导致土壤的团聚能力随土层的变化特征不同。兴安落叶松人工林和樟子松人工林土壤的团聚能力垂直变化不明显;天然次生林随土层深度增加土壤的团聚能力增强。

人工林(兴安落叶松林、樟子松林)的 3 个土层以>2 mm 粒径团聚体为主,除 1~0.5 mm 粒径团聚体外,各团聚体所占比例均随粒径减小而减小;天然次生林在 0—5 cm 土层和 5—10 cm 土层以 1~0.5 mm 粒径团聚体为主,在 10—20 cm 土层以>2 mm 粒径团聚体为主。人工林和天然次生林土壤大团聚体(>2 mm)在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的差异导致人工林表层土壤的团聚能力优于天然次生林。人工林和天然次生林土壤团聚体在不同土层中的分布也有相似之处,除 1~0.5 mm 粒径团聚体外,各团聚体所占比例均随粒径减小而减小,其中<0.25 mm 粒径团聚体质量分数均是最小的。

3.2 土壤团聚体有机碳分布特征

由表 3 可知,不同恢复方式下土壤团聚体有机碳含量存在差异。兴安落叶松人工林、樟子松人工林和天然次生林土壤团聚体有机碳含量表现出一定的垂直变

化规律,即随土层深度增加而减小,各土层间差异显著( $P<0.05$ )。樟子松人工林 0—5 cm 土层土壤团聚体有机碳含量是 5—10 cm 土层的 1.89~2.14 倍,是 10—20 cm 土层的 3.10~3.29 倍;兴安落叶松人工林 0—5 cm 土层土壤各团聚体有机碳含量是 5—10 cm 土层的 1.35~1.57 倍,是 10—20 cm 土层的 1.52~1.89 倍;天然次生林 0—5 cm 土层土壤各团聚体有机碳含量是 5—10 cm 土层的 1.42~1.70 倍,是 10—20 cm 土层的 2.44~2.92 倍。各林地土壤有机碳出现土壤表层富聚的现象,主要是因为植物的凋落物归还于土壤表层,在表层形成较厚的凋落叶层,经微生物分解作用在表层富集有机质从而形成表层有机碳含量相对较高的特征。

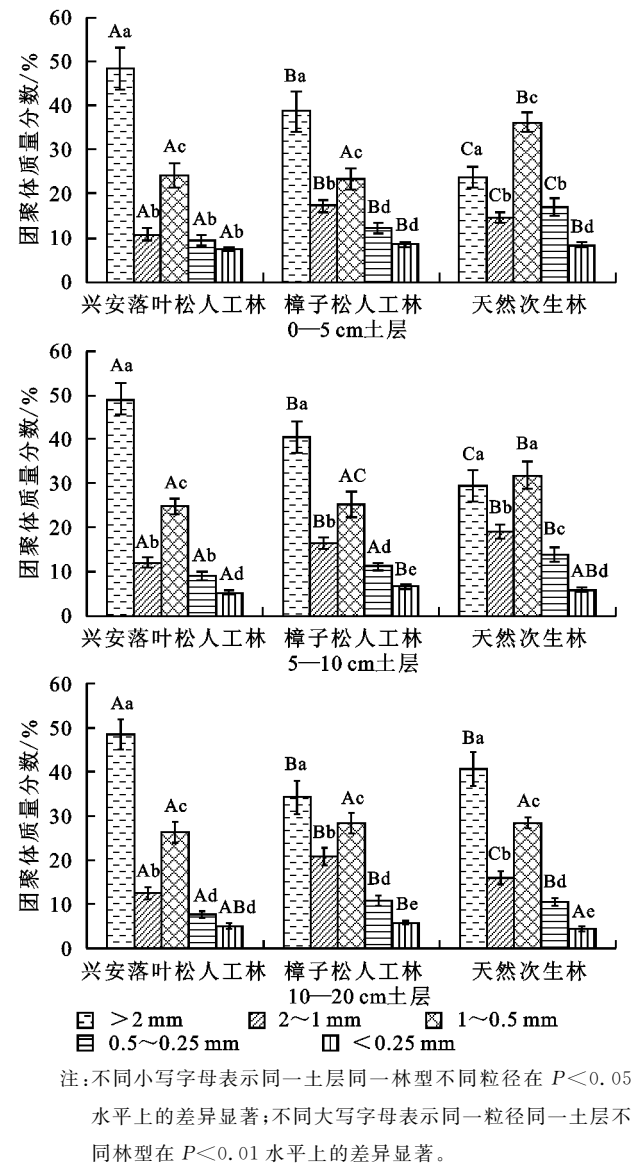


图1 不同林型土壤团聚体分布特征

同一土层不同林型间土壤团聚体有机碳含量差异显著( $P<0.05$ )。相同土层下,兴安落叶松人工林土壤团聚体有机碳含量最高,樟子松林人工林最低。兴安落叶松人工林土壤团聚体有机碳含量最高值出现在>2 mm 粒径中,为 77.57 g/kg;樟子松人工林土壤团聚体有

机碳含量最低值在 0.5~0.25 mm 粒径中,为 9.29 g/kg。不同土层土壤各团聚体有机碳含量具有随土壤粒径增大而增大的变化趋势,大团聚体(>2 mm)与微团聚体(<0.25 mm)间差异达显著水平( $P<0.05$ )。

3.3 土壤团聚体微生物量碳分布特征

由表 4 可知,不同粒径土壤团聚体中微生物量碳含量不同,大团聚体(>2 mm)与微团聚体(<0.25 mm)间差异显著( $P<0.05$ )。土壤 2~1 mm 粒径团聚体微生物量碳含量最大,其次是>2 mm 粒径,<0.25 mm 粒径土壤微生物量碳含量最小。此外,除>2 mm 外,各林型土壤团聚体微生物量碳含量均随团聚体粒径的增大而增大。土壤微生物量碳含量在不同粒径中存在差异,主要是由于不同粒径团聚体可供微生物生长繁殖的碳源含量及生存环境不同。

各林地不同土层土壤微生物量碳含量差异显著( $P<0.05$ )。0—5 cm 土层土壤团聚体微生物量碳含量在 109.79~1 084.50 mg/kg 间变化,5—10 cm 土层在 114.37~703.13 mg/kg 间变化,10—20 cm 土层在 45.63~508.35 mg/kg 间变化。各林地土壤团聚体微生物量碳含量表现与土壤团聚体有机碳相似的垂直分布规律,即含量随土层深度增加而减小,说明土壤上层微生物活性大于下层。

同一土层不同林型间土壤团聚体微生物量碳含量差异显著( $P<0.05$ )。相同土层下,兴安落叶松人工林土壤团聚体微生物量碳最高,天然次生林次之,樟子松林人工林最低。其中,最高值出现在兴安落叶松人工林表层土壤 2~1 mm 粒径中,为 1 084.5 mg/kg。

3.4 土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳分布特征

不同林地间土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量差异显著( $P<0.05$ ) (表 5)。各林地土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳在 141.89~25.51 mg/kg 间变化,土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量最高的兴安落叶林人工林,最低的是樟子松林人工林,其分布特征表现出与土壤团聚体有机碳相似的规律,说明植被群落对土壤团聚体有机碳和土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳的影响是一致的。

在不同植被恢复方式下,土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳表现出一定的垂直分布特征,除>2 mm 和 2~1 mm 粒径外,其余粒径团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量均有随土层深度增加而增大的变化趋势。此外兴安落叶松人工林和天然次生林 0—5 cm 土层土壤各粒径 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量明显高于 5—10 cm 土层和 10—20 cm 土层,主要与土壤表层有机碳富聚及微生物活动旺盛有关。

不同土层各粒级土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量不同,土壤团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳主要分布于 1~0.5 mm 及较大粒径的团聚体中。0—5 cm 土层,天然次生

林土壤各粒径团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量差异显著 ( $P<0.05$ ), 最大值出现在  $>2\text{ mm}$  粒径中, 为  $107.66\text{ mg/kg}$ ; 樟子松人工林和兴安落叶松人工林土壤各粒径团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量差异不显著。5—10 cm 土层, 兴安落叶松人工林和天然次生林团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量最大值出现在  $1\sim0.5\text{ mm}$  粒径中, 分别为  $131.47\text{ mg/kg}$  和  $96.22\text{ mg/kg}$ ; 樟子松人工林最

大值出现在  $2\sim1\text{ mm}$  粒径中, 为  $34.73\text{ mg/kg}$ 。10—20 cm 土层, 樟子松人工林和天然次生林团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳含量最大值出现在  $>2\text{ mm}$  粒径中, 分别为  $37.17\text{ mg/kg}$  和  $101.49\text{ mg/kg}$ , 且各粒级  $K_2SO_4$  浸提碳含量变化趋势是随粒径的增大而增大; 兴安落叶松人工林最大值出现在  $1\sim0.5\text{ mm}$  粒径中, 为  $135.84\text{ mg/kg}$ 。

表 3 不同林型土壤团聚体有机碳分布特征 g/kg

| 土层/cm | 林型       | $>2\text{ mm}$           | $2\sim1\text{ mm}$       | $1\sim0.5\text{ mm}$     | $0.5\sim0.25\text{ mm}$  | $<0.25\text{ mm}$       |
|-------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0—5   | 兴安落叶松人工林 | $77.57\pm5.94\text{Aa}$  | $74.55\pm5.67\text{Aa}$  | $68.06\pm5.30\text{Aab}$ | $62.18\pm5.43\text{Ab}$  | $59.95\pm5.56\text{Ab}$ |
|       | 樟子松人工林   | $30.34\pm2.43\text{Ba}$  | $31.39\pm2.59\text{Ba}$  | $30.23\pm2.30\text{Ba}$  | $30.57\pm2.47\text{Ba}$  | $30.92\pm2.01\text{Ba}$ |
|       | 天然次生林    | $59.91\pm5.11\text{Ca}$  | $57.67\pm4.64\text{Cab}$ | $48.92\pm4.10\text{Cbc}$ | $45.35\pm5.72\text{Cc}$  | $41.99\pm5.42\text{Cc}$ |
| 5—10  | 兴安落叶松人工林 | $52.61\pm4.35\text{Ba}$  | $47.54\pm4.26\text{Ba}$  | $45.88\pm5.04\text{Ba}$  | $44.91\pm5.49\text{Ba}$  | $44.51\pm5.06\text{Ba}$ |
|       | 樟子松人工林   | $15.53\pm1.83\text{Aa}$  | $16.35\pm1.91\text{Aa}$  | $15.98\pm1.45\text{Aa}$  | $15.77\pm1.52\text{Aa}$  | $14.48\pm1.29\text{Aa}$ |
|       | 天然次生林    | $35.33\pm2.82\text{Cab}$ | $35.95\pm3.48\text{Ca}$  | $32.40\pm3.50\text{Cab}$ | $30.24\pm3.24\text{Cab}$ | $29.66\pm3.63\text{Cb}$ |
| 10—20 | 兴安落叶松人工林 | $41.45\pm4.40\text{Ba}$  | $39.42\pm4.27\text{Ba}$  | $37.11\pm3.19\text{Ba}$  | $37.90\pm3.98\text{Ba}$  | $39.44\pm4.48\text{Ba}$ |
|       | 樟子松人工林   | $9.33\pm0.79\text{Aa}$   | $10.03\pm1.18\text{Aa}$  | $9.75\pm0.88\text{Aa}$   | $9.29\pm0.34\text{Aa}$   | $9.68\pm0.55\text{Aa}$  |
|       | 天然次生林    | $20.49\pm2.94\text{Cab}$ | $21.09\pm1.71\text{Ca}$  | $19.69\pm1.82\text{Cab}$ | $18.29\pm1.82\text{Cab}$ | $17.20\pm1.31\text{Cb}$ |

注: 同一行不同小写字母表示不同粒径在  $P<0.05$  水平上的差异显著; 同一列不同大写字母表示同一粒径同一土层不同林型在  $P<0.01$  水平上的差异显著。下同。

表 4 不同林型土壤团聚体微生物量碳分布特征 mg/kg

| 土层/cm | 林型       | $>2\text{ mm}$             | $2\sim1\text{ mm}$           | $1\sim0.5\text{ mm}$          | $0.5\sim0.25\text{ mm}$    | $<0.25\text{ mm}$         |
|-------|----------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0—5   | 兴安落叶松人工林 | $996.45\pm90.69\text{Bab}$ | $1\ 084.50\pm69.60\text{Ba}$ | $1\ 034.00\pm49.30\text{Bab}$ | $927.15\pm28.62\text{Bb}$  | $794.25\pm41.04\text{Bc}$ |
|       | 樟子松人工林   | $259.49\pm8.71\text{Aa}$   | $210.17\pm32.83\text{Ab}$    | $199.83\pm9.93\text{Ab}$      | $109.79\pm13.92\text{Ac}$  | $112.97\pm7.10\text{Ac}$  |
|       | 天然次生林    | $652.56\pm55.84\text{Cac}$ | $785.89\pm79.92\text{Cb}$    | $710.63\pm43.01\text{Cab}$    | $603.18\pm21.11\text{Ccd}$ | $538.97\pm26.24\text{Cd}$ |
| 5—10  | 兴安落叶松人工林 | $674.29\pm46.82\text{Bac}$ | $703.13\pm65.66\text{Ba}$    | $651.63\pm59.92\text{Bac}$    | $593.17\pm12.65\text{Bcd}$ | $561.98\pm35.44\text{Bd}$ |
|       | 樟子松人工林   | $185.39\pm17.06\text{Aa}$  | $159.34\pm4.22\text{Aa}$     | $114.96\pm16.41\text{Ab}$     | $114.37\pm17.98\text{Ab}$  | $164.91\pm16.77\text{Aa}$ |
|       | 天然次生林    | $436.14\pm25.47\text{Ca}$  | $443.81\pm10.02\text{Ca}$    | $211.59\pm13.36\text{Cb}$     | $187.23\pm21.38\text{Ab}$  | $101.51\pm9.01\text{Cd}$  |
| 10—20 | 兴安落叶松人工林 | $444.55\pm28.17\text{Ba}$  | $495.93\pm14.27\text{Ba}$    | $508.35\pm20.57\text{Ba}$     | $485.68\pm21.59\text{Ba}$  | $308.10\pm31.29\text{Bb}$ |
|       | 樟子松人工林   | $109.36\pm2.54\text{Aa}$   | $107.06\pm6.79\text{Aa}$     | $92.42\pm3.58\text{Aa}$       | $88.17\pm4.51\text{Aa}$    | $58.09\pm5.29\text{Ab}$   |
|       | 天然次生林    | $186.27\pm15.00\text{Ca}$  | $198.99\pm22.49\text{Ca}$    | $137.12\pm13.89\text{Cb}$     | $79.88\pm3.44\text{Ac}$    | $45.63\pm4.85\text{Ad}$   |

表 5 不同林型土壤团聚体  $K_2SO_4$  浸提碳分布特征 mg/kg

| 土层/cm | 林型       | $>2\text{ mm}$           | $2\sim1\text{ mm}$        | $1\sim0.5\text{ mm}$      | $0.5\sim0.25\text{ mm}$   | $<0.25\text{ mm}$        |
|-------|----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 0—5   | 兴安落叶松人工林 | $133.22\pm5.49\text{Ba}$ | $138.76\pm4.35\text{Ba}$  | $141.89\pm5.95\text{Ba}$  | $134.99\pm3.25\text{Ba}$  | $134.53\pm5.54\text{Ba}$ |
|       | 樟子松人工林   | $30.66\pm1.76\text{Aa}$  | $29.46\pm2.10\text{Aa}$   | $28.14\pm2.56\text{Aa}$   | $31.51\pm1.93\text{Aa}$   | $29.92\pm2.15\text{Aa}$  |
|       | 天然次生林    | $107.66\pm7.88\text{Ca}$ | $104.41\pm4.17\text{Cab}$ | $95.03\pm7.83\text{Cbc}$  | $100.38\pm7.87\text{Cab}$ | $84.37\pm4.37\text{Cc}$  |
| 5—10  | 兴安落叶松人工林 | $122.07\pm7.96\text{Ba}$ | $125.70\pm8.61\text{Ba}$  | $131.47\pm10.57\text{Ba}$ | $128.59\pm8.00\text{Ba}$  | $120.27\pm9.73\text{Ba}$ |
|       | 樟子松人工林   | $33.03\pm3.44\text{Aab}$ | $34.73\pm2.46\text{Aa}$   | $34.25\pm1.80\text{Aab}$  | $30.23\pm1.44\text{Ab}$   | $26.02\pm1.58\text{Ac}$  |
|       | 天然次生林    | $83.17\pm3.38\text{Ca}$  | $94.02\pm7.59\text{Cb}$   | $96.22\pm3.95\text{Cb}$   | $75.00\pm4.20\text{Ca}$   | $65.57\pm3.84\text{Cd}$  |
| 10—20 | 兴安落叶松人工林 | $132.06\pm7.20\text{Ba}$ | $133.14\pm7.87\text{Ba}$  | $135.84\pm9.13\text{Ba}$  | $125.95\pm6.01\text{Bab}$ | $113.16\pm7.06\text{Bb}$ |
|       | 樟子松人工林   | $37.17\pm2.40\text{Aa}$  | $37.16\pm2.56\text{Aa}$   | $32.91\pm2.79\text{Ab}$   | $26.63\pm0.82\text{Ac}$   | $25.51\pm1.00\text{Ac}$  |
|       | 天然次生林    | $101.49\pm8.28\text{Ca}$ | $92.82\pm7.08\text{Ca}$   | $80.99\pm5.20\text{Cb}$   | $70.00\pm3.03\text{Cc}$   | $51.09\pm4.21\text{Cd}$  |

### 3.5 土壤微生物量碳与有机碳和 $K_2SO_4$ 浸提碳的关系

土壤微生物量碳与土壤有机碳、 $K_2SO_4$  浸提碳相关分析结果显示(图 2), 微生物量碳与土壤有机碳和  $K_2SO_4$  浸提碳均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.875 和 0.655 ( $P<0.01$ ), 说明微生物量碳与有机碳和  $K_2SO_4$  浸提碳之间关系密切。土壤微生物量碳和  $K_2SO_4$  浸提碳均是土壤有机质中较活跃的成分, 土壤微生物量碳含量主要受土壤有机质数量和质量的影响, 在一定的条件下有机质输入越多, 微生物量碳越高<sup>[4]</sup>;  $K_2SO_4$  浸提碳源于有机物质的溶解和土壤微生物生命活动, 它既是微生物分解有机质的代

谢产物, 又是微生物生长、繁殖所依赖的碳源和能源, 它可反映土壤微生物的周转速率和土壤潜在活性养分含量, 其含量主要受土壤、植被、管理措施等影响。

## 4 讨论

地上植物的枯枝落叶是土壤有机碳的主要来源之一, 地表植物的生长状况和生物量大小影响土壤有机碳含量<sup>[13]</sup>。本研究分析得知, 不同植被恢复方式下土壤各团聚体有机碳含量均是兴安落叶松人工林最高, 天然次生林次之, 樟子松人工林最低。由表 1 可知, 兴安落叶松人工林郁闭度高达 0.7, 平均树高和平均胸径值也较大, 说明兴安落叶松人工林林分密

度较高,植被生长状况较好,土壤有机质丰富,导致土壤团聚体有机碳含量较高;反观樟子松人工林植被生长状况一般,且樟子松人工林又从土壤中吸收大量土壤养分<sup>[14]</sup>,进而导致土壤团聚体有机碳含量较低。有研究认为与大团聚体相联系的有机碳比微团聚体有机碳易矿化,土壤大团聚体有机碳含量较微团聚体低,也有研究认为大团聚体的形成是微团聚体通过有

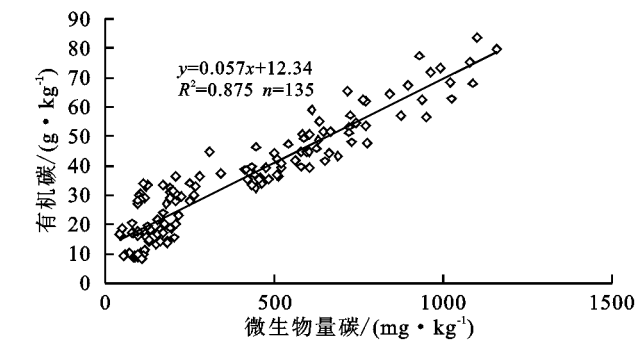


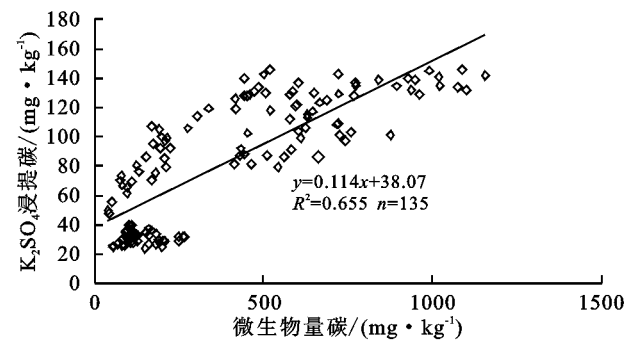
图 2 微生物量碳与有机碳、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳的相关性

土壤微生物量碳是土壤有机碳中最活跃的组分,对土壤扰动非常敏感,常常作为土壤对环境响应的指示指标。土壤微生物量碳含量主要取决于输入有机物质的数量和质量,在一定条件下,有机物质输入越多,土壤微生物量碳含量就越高<sup>[4]</sup>。本研究得知,不同植被恢复方式下的土壤团聚体微生物量碳总体分布特征与土壤团聚体有机碳一致,也是兴安落叶松人工林>天然次生林>樟子松人工林,主要是因为兴安落叶松人工林有大量凋落物归还于土壤,有机质丰富,为土壤微生物提供了丰富的碳源,同时也保持了土壤水分含量,利于微生物的生长繁殖<sup>[16]</sup>。有研究认为土壤大团聚体比小团聚体微生物量碳高<sup>[17]</sup>,也有研究认为土壤微生物主要吸附在小颗粒上,本研究结果是,土壤大团聚体微生物量碳含量显著大于微团聚体,微生物量碳含量呈随团聚体粒径增大而增大的趋势,主要可能是由于大团聚体中有机碳结构较小团聚体简单,易于被微生物分解利用。

已有研究表明,表层土壤微生物生物量主要由凋落物的数量、质量以及水分、温度等相关的环境因子决定,而下层土壤微生物生物量的主要影响因素是土壤中长期积累的营养元素以及根系的生产和周转<sup>[18]</sup>。本研究表明,土壤团聚体微生物量碳含量均随土壤深度的增加而减小,主要是因为不同植被恢复方式下植被枯落物聚集于土壤表层,且随土壤深度增加有机质减少,土壤通气性差,微生物活性低,相关分析发现(图 2),土壤微生物量碳与土壤有机碳呈极显著正相关,表明有机碳是影响微生物量碳的主要因素,本研究中的土壤团聚体有机碳也是均有随土壤深度增加而降低的趋势,与前人结论一致<sup>[7]</sup>。

K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳是土壤中较活跃的可溶性有机碳,

机碳的胶结形成的,大团聚体含有更多的有机碳<sup>[15]</sup>,大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝可以增加其中有机碳的浓度。本研究中土壤团聚体有机碳含量呈随粒径增大而增大的变化趋势,大团聚体有机碳含量显著大于微团聚体,这结果可能是与大兴安岭地区的特殊生态环境及火烧迹地植被恢复有关,导致团聚体内有机物质和菌丝胶结状况不同。



容易被土壤微生物氧化分解,对区域微环境的变化响应敏感,在碳循环与土壤养分供应方面有重要作用。研究认为 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳的影响因素除植物群落以外,土地利用及土壤性质、气候条件等自然条件也会对其产生影响<sup>[19]</sup>。本研究中 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳与土壤微生物量碳呈极显著正相关,说明在不同植被恢复方式下土壤微生物量碳是影响 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量的主要因素。

## 5 结论

(1)大兴安岭地区重度火烧迹地不同植被恢复方式对土壤团聚体干筛粒径、团聚体有机碳、团聚体微生物量碳和团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳的分布特征具有显著影响。兴安落叶松人工恢复方式表层土壤的团聚能力优于天然更新方式。土壤团聚体有机碳、团聚体微生物量碳和团聚体 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳含量均是兴安落叶松人工林>天然次生林>樟子松人工林。

(2)在不同植被恢复方式下,土壤团聚体有机碳和团聚体微生物量碳富聚于土壤表层(0—5 cm),其含量呈随土层深度增加而减小、随团聚体粒径增大而增大的趋势,大团聚体有机碳含量和微生物量碳含量显著高于微团聚体。土壤 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳主要分布于 1~0.5 mm 及其更大粒径的团聚体中。土壤微生物量碳与土壤有机碳和 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提碳之间关系密切。

### 参考文献:

[1] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2014,25(3):671-678.  
[2] 杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010,24(1):252-256.