

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160078

黑土区坡耕地与坡林地地表土团聚体有机碳库差异

李 露 曹 伟 赵鹏志 王恩姮
(东北林业大学林学院)

摘要:以东北黑土区典型坡耕地(玉米)和坡林地(退耕还落叶松林和樟子松林)表层土壤为研究对象,分别在坡上、坡中上、坡中、坡中下、坡下5个坡位设置取样点采集非原状土,风干后将土壤筛分为2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 cm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm 5个粒级团聚体,分别计算每个粒级土壤风干团聚体所占比例,测定各粒级土壤风干团聚体有机碳含量,并以此为基础计算土壤团聚体有机碳贮量。通过对比不同坡位、各粒级风干团聚体组成及其有机碳含量与贮量变化规律,探明黑土区不同土地利用方式下坡地土壤团聚体有机碳库对不同侵蚀类型的响应特征。结果表明:坡耕地土壤团聚体迁移、沉积过程不同于坡林地,耕地土壤>2 mm团聚体的组成比例显著高于2种林地,并在坡下达到最高值(70.30%);有机碳含量均随团聚体粒级减小逐渐增加,樟子松林地内各粒级有机碳含量(25.57~142.60 g/kg)显著高于耕地(22.58~30.06 g/kg)和退耕还落叶松林地(21.58~66.53 g/kg);坡林地土壤团聚体有机碳贮量由坡上至坡下逐渐增加,相同坡位处土壤团聚体有机碳贮量均为樟子松林地>退耕还落叶松林地>耕地。研究结果证实了黑土区耕作侵蚀的存在及其对土壤团聚体、团聚体有机碳库分布的影响,同时印证了退耕还林是减缓坡地黑土耕作侵蚀、提升有机碳库的长效途径。

关键词:黑土;退耕还林;耕作侵蚀;坡位;土壤有机质

中图分类号:S714.5;S157.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)12-0046-08

LI Lu; CAO Wei; ZHAO Peng-zhi; WANG En-heng. **Differences of soil organic carbon storage in surface soil aggregates between sloping farmland and sloping forestland in black soil region.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)**38**(12) 46-53 [Ch,33 ref.] School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

A typical sloping field in the black soil region of northeastern China was selected to analyze characteristics of soil aggregate composition and soil organic carbon of different size fractions under three different soil surface conditions, namely, sloping farmland, sloping forestland of larch (*Larix gmelinii*) converted from cultivated land, and sloping forestland of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*). The sampling sites were situated at upper slope, upper to middle slope, middle slope, middle to lower slope, and lower slope positions. After air drying, the soil samples were sieved to 2-5 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm, 0.25-0.5 mm and <0.25 mm size classes and then their proportions were calculated. Soil organic carbon content was measured by vario TOC instrument manufactured by Elementar Company, and then the soil organic carbon storage of each aggregate size class and total aggregates was calculated. Results showed that: the transportation and deposition processes of soil aggregates in farmland were different from those in forestland mainly because of tillage effects. Compared with forestland, the proportion of soil aggregates >2 mm in farmland was significantly higher, especially in the lower slope position with a proportion of 70.30%. For all three types of sloping lands, soil organic carbon content of aggregates increased with their diameter decreasing. The most pronounced difference of soil organic carbon content was found in Mongolian pine forestland (25.57-142.60 g/kg), which

收稿日期:2016-03-01 修回日期:2016-04-26
基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAD07B05)、国家自然科学基金青年科学基金项目(41302222)、林业公益性行业科研专项(201404202)、大学生创新训练计划项目(201410225067)。
第一作者:李露。主要研究方向:土壤侵蚀与土地生产力恢复。Email: 296179031@qq.com 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路26号东北林业大学林学院。
责任作者:王恩姮,副教授。主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。Email: enheng_wang@nefu.edu.cn 地址:同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

remained highest in all positions compared with sloping farmland (22.58–30.06 g/kg) and sloping larch forestland (21.58–66.53 g/kg). Soil organic carbon storage showed a trend of increasing from upper to lower slope position in forestland; in the same slope position, it was the highest in the Mongolian pine forestland, followed by larch forestland, and sloping farmland in the last place. The results confirm the existence of tillage erosion in sloping land of this area as well as its effects on the redistribution of soil organic carbon. It also suggests that converting cultivated land to forest plays an important role as a type of measure to reverse ecological destruction and maintain higher productivity of black soil in the long run.

Key words black soil; converting cultivated land into forestland; tillage erosion; slope position; soil organic matter

东北黑土区主要分布在松嫩平原东部及北部的山前台地,是我国最重要的商品粮生产基地之一。经受百余年开垦耕种,黑土质量退化日趋严重。土壤侵蚀是黑土退化的主要原因,主要表现为土壤结构的破坏和土壤团聚体的再分布^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其组成和稳定性决定了土壤水、热、气、肥等功能的有效性,而土壤有机碳是团聚体的主要胶结物质^[2-3],二者关系密切^[4-5]。提升土壤有机碳含量能够促进团聚体数量的增加和稳定性的增强^[6],但土壤侵蚀引起土壤团聚体的破碎和迁移,使包裹在团聚体中的有机碳暴露进而加速矿化,最终导致有机碳含量的减少以及不同粒级团聚体内有机碳含量的差异^[7-9],因而研究土壤团聚体粒级组成及其有机碳含量变化可以在一定程度上解释土地退化的机理。

土地利用/土地覆盖变化不仅可以直接改变土壤外源有机物的输入情况,还可以通过小气候和土壤条件的改变来影响土壤有机碳分解速率,进而改变土壤有机碳含量和贮量^[10]。不同植被类型和土壤类型,其团聚体中有机碳含量和贮量不同,刘毅^[11]等研究发现,农田和人工林地有机碳含量以 0.25 ~ 1 mm 土壤团聚体最高,自然林地和裸地有机碳含量以 <0.25 mm 土壤结构体最高;而有机碳贮量却呈相反规律,农田和人工林地以 <0.25 mm 结构体所占比例最大。自然林地和裸地则以 0.25 ~ 1 mm 土壤团聚体最高。退耕还林是通过改变地表覆盖而减缓水土流失的主要措施之一,同时能够显著增加土壤有机碳密度。但也有研究表明,土壤碳密度随退耕还林年限的延长呈先降低后增加的趋势^[9,12-13]。有关黑土团聚体有机碳含量和贮量的相关研究虽已有报道^[14-16],但主要集中在坡耕地施肥管理等方面,进一步对比其与坡林地之间差异及其与土壤侵蚀之间关系却少见研究。

本研究通过对比分析坡耕地、退耕还林落叶松坡林地和樟子松坡林地不同坡位、不同粒级土壤团聚体的组成比例及有机碳含量及贮量分布特征,以

期阐明不同土地利用方式下土壤团聚体、团聚体有机碳库的变化规律及其与坡地黑土侵蚀的关系,为进一步优化黑土区坡地利用方式、减缓土壤侵蚀、科学评价黑土区退耕还林的生态效益提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省西北部的克山农场(48°12' ~ 48°23'N、125°08' ~ 125°37'E),属克拜漫川漫岗地带,海拔 240 ~ 340 m,平均坡度 3°。区域内土壤类型以粘化湿润均腐土为主,属典型黑土区。温带大陆性季风气候特征明显,年平均气温 0.9℃,≥10℃有效积温 2 296.2℃,年平均降水量 501.7 mm,平均蒸发量 1 329.4 mm,无霜期 115 d,土壤冻结期从 11 月初至翌年 6 月中旬,最大结冻深度可达 2.5 m。

1.2 研究方法

在克山农场 14 连队选择坡型(凸形坡)、坡度(上段坡 2.9°、下段坡 3.6°)、坡长(200 m)、坡向(正南)相同的耕地,退耕还林落叶松林地和樟子松林地为研究对象(林地特征见表 1);分别在每个样地内平行于坡的方向设 3 条样线,每条样线按照坡上、坡中上、坡中、坡中下、坡下 5 个坡位依次间隔 50 m 设置取样点,采集 5 kg 表层 0 ~ 10 cm 土壤带回实验室。在实验室将土壤中肉眼可见的小石块和植物根系剔除,平摊在通风透气处自然风干。称取 500 g 风干后土壤用干筛法筛成 2 ~ 5 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、<0.25 mm 5 个粒级团聚体,分别计算每个粒级土壤风干团聚体所占比例,并用德国 Elementar 公司生产的 vario TOC 仪测定各粒级土壤风干团聚体有机碳含量。本研究将着重讨论坡耕地、坡林地团聚体分布特征与土壤侵蚀的关系,进而对团聚体有机碳库的影响;因此研究对象为土壤团聚体,并非原状土体,所以本文计算的是土壤团聚体有机碳,不是土壤有机碳。土壤各团聚体内有机碳贮量是不同粒级团聚体有机碳含量与相应团

表 1 林地基本特征

Tab.1 Basic characteristics of forestland in experimental field

样地类型 Sample plot type	起源 Origin	林龄/a Age of stand/year	胸径 Diameter at breast height (DBH)/cm	树高 Tree height/m	郁闭度 Canopy density	密度/(株·hm ⁻²) Density/ (trees·ha ⁻¹)
落叶松 Larch forest	人工林 Plantation	14	8.82	8.2	0.5	3 950
樟子松 Mongolian pine forest	人工林 Plantation	43	19.79	13.0	0.5	775

聚体质量的乘积^[11],其大小能够反映土壤团聚体有机碳库真实贮量,本研究中团聚体有机碳贮量为每 1 kg 土壤各粒级结构体有机碳贮存量,并通过以下公式计算团聚体有机碳总贮量^[17]:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i p_i$$

式中:W 为每 1 kg 土壤中不同粒级团聚体有机碳总贮量,g;w_i为某粒级团聚体有机碳含量,g/kg;p_i为相应粒级团聚体组成比例,% ;n 为团聚体粒级数。

1.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 进行统计分析,不同土地利用类型之间、不同坡位之间、不同粒级之间均采用 LSD 法进行显著性检验(P=0.05)。

2 结果与分析

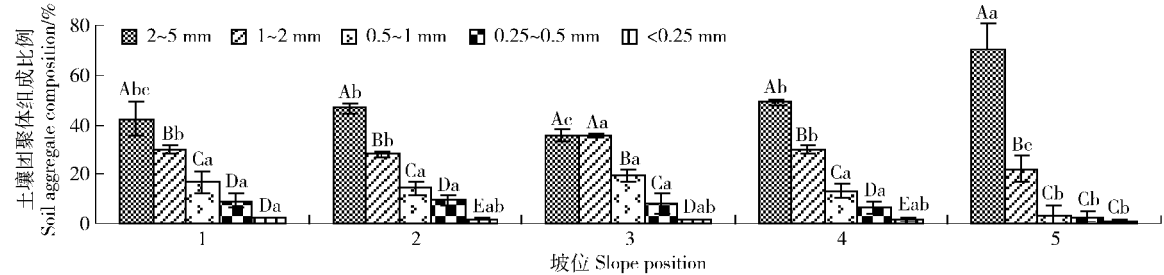
2.1 风干团聚体组成特征

坡耕地各坡位处土壤团聚体组成比例较为相似(图 1),整体表现出随团聚体粒级减小,各比例逐渐降低的趋势。以 1 mm 团聚体为分界,2~5 mm 和 1~2 mm 粒级团聚体所占比例较大,且分别与 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm 粒级团聚体比例达到显著差异水平(P<0.05)。对于<0.25 mm 粒级团聚体而言,除坡上和坡下位置外,其余 3 个坡位所占比例显著小于其他粒级团聚体所占比例(P<0.05),5 个坡位上的变化范围为 1.19%~2.22%。

相同粒级团聚体比例分配情况随坡位的变化呈

现出不同的规律。2~5 mm 大粒级团聚体在坡上一坡中一坡下的变化过程中总体呈现出先减小后增加的趋势(P<0.05),其比例变化范围为 35.53%~70.30%。1~2 mm 和 0.5~1 mm 中粒级团聚体变化规律相反,即从坡上到坡中比例逐渐增加,从坡中到坡下比例逐渐减小,且在坡下处 1~2 mm 和 0.5~1 mm 粒级团聚体比例与其他 4 个坡位相比差异均达显著水平(P<0.05)。0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 较小粒级团聚体所占比例总体呈现随坡位的降低而减少的趋势,且坡下位置显著小于坡中下位置(P<0.05)。

除坡中下处的规律明显不同外,退耕还落叶松林地其他坡位处土壤团聚体组成比例也较为相似(图 2),仍以 2~5 mm 和 1~2 mm 大粒级团聚体居多,但 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒级团聚体所占比例较耕地有大幅度增加。各坡位处<0.25 mm 粒级团聚体所占比例显著小于其他粒级团聚体所占比例(P<0.05),其变化范围为 1.96%~6.63%。在坡中下位置,团聚体组成表现出了与其他坡位不相同的特征,1~2 mm、0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 3 个中间粒级团聚体所占比例显著大于其他粒级(P<0.05)。各粒级团聚体比例分配情况随坡位的变化无明显规律;但在坡中下位置,2~5 mm 大粒级团聚体所占比例显著下降(P<0.05);0.5~1 mm、0.25~0.5 mm



1. 坡上;2. 坡中上;3. 坡中;4. 坡中下;5. 坡下。同坡位不同粒级之间的差异显著性用大写字母标注(P<0.05);同粒级不同坡位之间的差异显著性用小写字母标注(P<0.05)。下同。1,Upper slope position; 2,Upper to middle slope position; 3,Middle slope position;4,Middle to lower slope position;5,Lower slope position. A, B, C represent significant differences among soil aggregates of varied diameter classes at the same slope position(P<0.05); a,b,c represent significant differences among varied slope positions for the same diameter class(P<0.05). The same as below.

图 1 耕地土壤团聚体组成比例

Fig.1 Soil aggregate composition under sloping farmland

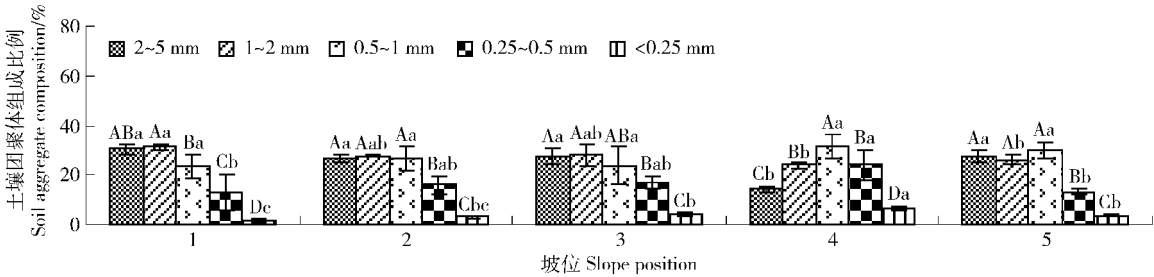


图 2 退耕还落叶松林地土壤团聚体组成比例
Fig. 2 Soil aggregate composition under sloping larch forestland

及<0.25 mm中小粒级团聚体所占比例显著上升($P<0.05$)。

除坡中位置规律明显不同外,樟子松林地各粒级团聚体组成比例按粒级由大到小呈“Λ”型分布(图 3)。 <0.25 mm 粒级团聚体所占比例显著小于其他粒级团聚体所占比例,其变化范围在 3.53% ~ 8.22%。相同粒级团聚体比例分配情况随坡位的变

化呈现出不同的规律:2~5 mm 大粒级团聚体所占比例在坡上一坡中位置持续增加,在坡中下位置减小,在坡下位置又回升,变化范围为 17.27% ~ 31.99%。1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 中小粒级团聚体所占比例的变化规律与之相反,在坡上一坡中位置持续减小,在坡中下位置逐渐增加,在坡下位置又有所降低。

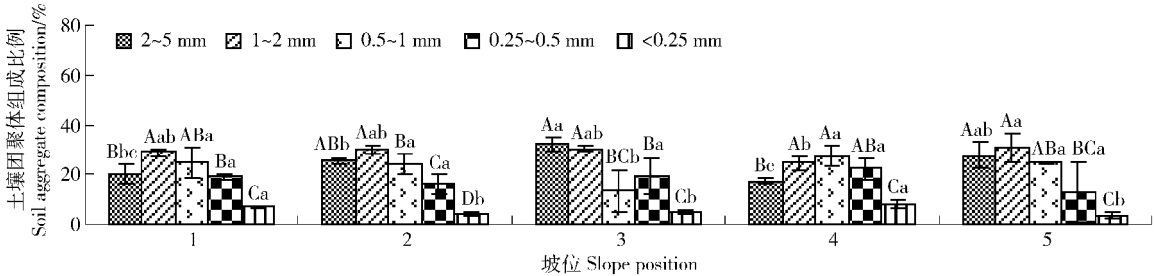


图 3 樟子松林地土壤团聚体组成比例
Fig. 3 Soil aggregate composition under sloping Mongolian pine forestland

2.2 各粒级土壤团聚体有机碳含量变化规律

在耕地不同坡位处,<0.25 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量变化范围为 27.61 ~ 30.06 g/kg,始终高于其他 4 个粒级,且在坡上、坡中上、坡中、坡中下 4 个坡位处差异均达到了显著水平($P<0.05$)。0.25~2 mm 粒级团聚体有机碳含量在各坡位处均随粒级减小而增加。对于 2~5 mm 粒级团聚体而言,其变化范围在 22.98 ~ 29.32 g/kg,仅在坡中上位置显著小于 0.25~2 mm 粒级团聚体有机碳含量($P<0.05$),在其他坡位并无显著差异(图 4)。

相同粒级团聚体有机碳含量随坡位的变化同样呈现出不同的规律:<0.25 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量在坡上一坡中一坡下位置呈现出先减小后增加的趋势,但变化差异未达显著水平。1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 中粒级团聚体随着坡位变化呈波动变化趋势,其有机碳含量在坡上至坡中上过渡时有所增加,但仅 0.25~0.5 mm 粒级显著高于 0.5~2 mm 粒级($P<0.05$),在坡中上一坡中位置团聚体有机碳含量显著降低($P<0.05$),在坡

中一坡下位置持续增加。在随坡位变化的过程中,2~5 mm 粒级团聚体有机碳含量先降低后增加,在坡中上含量最低,从坡中到坡下有有机碳含量持续增加。

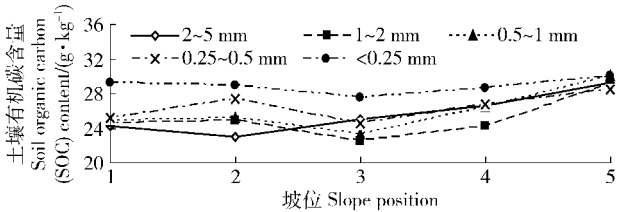


图 4 耕地土壤团聚体有机碳含量
Fig. 4 SOC content of aggregates under sloping farmland

在退耕还落叶松林地上,土壤团聚体有机碳含量变化范围为 21.58 ~ 66.53 g/kg;<0.25 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量显著高于其他粒级,其变化范围在 39.16 ~ 66.53 g/kg;0.25~0.5 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量总体上显著高于 0.5~5 mm 大中粒级($P<0.05$)。2~5 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 3 个粒级团聚体有机碳含量并无显著性差异

(图 5)。

相同粒级团聚体有机碳含量随坡位的变化同样呈现出不同的规律。2~5 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量在坡上一坡中一坡下呈现先减小后增加的趋势,且在坡中下和坡下位置的增加幅度达到显著差异水平 ($P < 0.05$)。0.25~2 mm 中小粒级土壤团聚体有机碳含量由坡上到坡下呈现逐渐增加的趋势,在坡下位置达显著水平。而 <0.25 mm 粒级土壤团聚体有机碳含量呈现“W”型变化趋势,且在坡中一坡中下一坡下位置变化显著 ($P < 0.05$)。

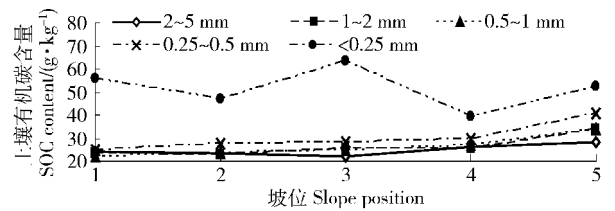


图 5 退耕还落叶松林地土壤团聚体有机碳含量
Fig. 5 SOC content of aggregates under sloping larch forestland

樟子松林地上,大粒级土壤团聚体有机碳含量较低,而小粒级土壤有机碳含量较高。相同粒级团聚体有机碳含量随坡位的变化也呈现出一致的规律:各粒级土壤团聚体有机碳含量在坡一坡中上逐渐增加,仅 0.25~0.5 mm 粒级团聚体变化未达差异显著水平,在坡中上到坡下呈现“N”型变化趋势,变化幅度较坡上一坡中上增大,所有变化均达差异显著水平 ($P < 0.05$) (图 6)。

所有粒级土壤团聚体有机碳含量随坡位波动幅度随着粒级减小依次增大,<0.25 mm 小粒级团聚体有机碳含量波动幅度最大,最大值(坡下)和最小值(坡上)相差 96.04 g/kg。在所有坡位中,坡中下一坡下位置土壤团聚体有机碳含量变化幅度最为明显,按粒级由大到小,其最大值和最小值分别相差 22.59、40.26、48.83、68.00、96.04 g/kg。

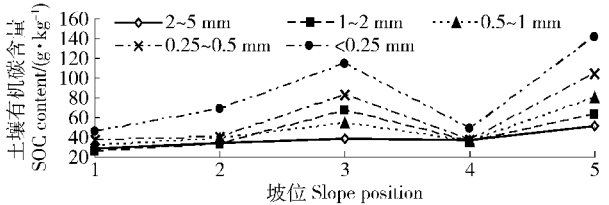


图 6 樟子松林地土壤团聚体有机碳含量
Fig. 6 SOC content of aggregates under sloping Mongolian pine forestland

2.3 土壤团聚体碳贮量分布差异

不同土地利用类型中,团聚体有机碳总贮量随坡位的变化表现出不同的变化规律(表 2)。耕地土壤团聚体有机碳贮量在坡上、坡中上、坡中、坡中下 4 个坡位的变化并无显著差异,但在坡下位置显著升高。退耕还落叶松林地土壤团聚体有机碳贮量随坡位的变化呈现出逐渐增加的趋势。在樟子松林地内,土壤团聚体有机碳贮量与团聚体有机碳含量随坡位变化规律相吻合,都在坡中和坡下位置增加最为显著 ($P < 0.05$),坡中下显著低于坡中和坡下。

在 3 种坡地类型的各坡位处,土壤团聚体有机碳贮量均表现为樟子松林地 > 落叶松林地 > 耕地,且樟子松林地土壤团聚体有机碳贮量显著高于其他 2 种土地利用类型 ($P < 0.05$)。对于耕地和退耕还落叶松林地而言,其土壤团聚体有机碳贮量无显著差异。

3 讨 论

3.1 坡耕地团聚体再分布规律印证耕作侵蚀

降雨致土壤结皮后,土壤团聚体被击散成更多小颗粒并发生迁移,从而造成土壤侵蚀^[18],团聚体越小越容易发生水蚀。安娟等^[19]研究发现,<0.25 mm 粒级团聚体是黑土区水蚀主要的流失粒级,可占到团聚体流失总量的 50% 以上。本次研究中,从

表 2 不同土地利用类型各坡位土壤团聚体碳贮量

Tab. 2 Soil organic carbon storage of aggregates in varied slope position under different land use types g·kg⁻¹

样地类型 Sample plot type	坡位 Slope position				
	坡上	坡中上	坡中	坡中下	坡下
	Upper slope position	Upper to middle slope position	Middle slope position	Middle to lower slope position	Lower slope position
耕地 Sloping farmland	24.67 ± 0.46Bb	24.35 ± 0.54Bb	23.85 ± 0.44Bb	25.82 ± 1.76Bb	29.50 ± 2.30Ba
落叶松林地 Sloping larch forestland	24.13 ± 0.09Bd	24.70 ± 0.23Bd	26.72 ± 0.065Bc	27.73 ± 0.19Bb	33.83 ± 0.44Ba
樟子松林地 Sloping Mongolian pine forestland	31.49 ± 0.20Ab	36.59 ± 5.74Ab	60.97 ± 11.71Aa	37.70 ± 0.33Ab	71.99 ± 4.12Aa

注:同坡位不同土地利用类型之间差异显著性用大写字母标注 ($P < 0.05$);同土地利用类型不同坡位之间差异显著性用小写字母标注 ($P < 0.05$)。Notes: A, B, C represent significant differences among different land use types of the same slope position ($P < 0.05$); a, b, c represent significant differences among different slope positions of the same land use type ($P < 0.05$).

不同坡位处的土壤团聚体组成变化规律可以看出,退耕还落叶松林地和樟子松林地也遵循这一侵蚀趋势,小粒级团聚体在坡下所占比例相对较高,是由于径流在此处减缓而发生沉积^[14]。但在坡耕地上,流失规律有所不同,小粒级团聚体所占比例随坡位的下降逐渐减少,大粒级团聚体所占比例反而增加,由于长期耕作导致土壤团聚体在坡面重新分配^[20],上坡大团聚体易被耕作机具牵引、搬运至下坡沉积。这与樊红柱等^[21]研究发现相似,即坡脚、坡趾沉积区 > 2 mm 大团聚体的组成比例显著高于坡上部侵蚀区,上坡土壤团聚体结构以微团聚体为主,下坡以大团聚体为主,并同样认为由长期强烈耕作而引起。由此可见,坡耕地土壤团聚体流失规律不同于单纯受到水蚀作用的林地,也印证了黑土区耕作侵蚀的存在。长期以来,黑土区坡耕地侵蚀的研究多关注水蚀,耕作侵蚀常被忽略,但几乎所有坡耕地系统中,耕作侵蚀和水蚀的侵蚀率均在同一个数量级上,甚至高于水蚀的侵蚀率^[22],在坡凸起的位置耕作侵蚀对总侵蚀速率的贡献可高达 70%^[23]。因此,在研究黑土区坡耕地侵蚀机理时,耕作侵蚀及其与水蚀的交互作用不可忽视。

3.2 团聚体有机碳含量和贮量的影响因素

无论何种土地利用方式,土壤有机碳含量都随土壤深度表现出逐渐降低的趋势^[15],且侵蚀的搬运对象主要为表层土壤^[24-25];因此在侵蚀部位,表层土壤被剥离,暴露出的亚表层土壤有机碳含量较低,而在沉积部位,表层土迁移至此导致其有机碳含量较高。以往研究表明耕作侵蚀强度在凸型坡的凸位处最大^[26],本研究中也显示在坡耕地系统中各粒级团聚体有机碳含量呈现出从坡上至坡下先降低后增加的特征。某一粒级土壤团聚体内有机碳贮量是由各粒级团聚体所占比例和团聚体有机碳含量共同决定,本研究中不同粒级团聚体所占比例对团聚体有机碳贮量起主导作用,而团聚体有机碳含量对其贮量影响相对较小。在坡林地系统中由于没有耕作干扰,其变化规律则有所差异。相比而言,樟子松林受人为扰动最小,能够揭示水蚀规律:坡中下侵蚀区由于有足够的汇水面积^[27],加之复合凸型坡增加了重力势能,蓄积的侵蚀力使该处土壤团聚体受消散作用而破碎,相应增加了小粒级团聚体比例,同时迁移到坡下的侵蚀物质在深埋作用下发生重新团聚作用^[25],因而沉积部位大团聚体所占比例小幅升高。与此同时侵蚀严重的坡中下位置团聚体有机碳含量由于径流冲刷和亚表层土壤稀释作用^[25]表现出明显的降低趋势,而在坡下沉积区团聚体有机碳含量显著升高,由于樟子松林地土壤各粒级团聚体分布

较为均匀,因此有机碳贮量表现出与含量一致的分布特征。

3.3 退耕还林对土壤团聚体有机碳的影响

本研究中退耕还落叶松林 > 0.25 mm 团聚体有机碳含量相对耕地并无显著增加,可能是退耕还林年限较短。虽已有研究表明不同恢复年限的退耕还林地土壤有机碳含量波动上升^[16,28],但在寒冷地区,落叶松的针叶分解速率较慢,年分解率仅为 20% ~ 30%;王春梅等^[13]发现退耕还落叶松林地土壤有机碳在 12 年左右降到最低,之后才逐年升高。大粒级团聚体是由小级团聚体团聚而成,团聚物质是年轻有机质(碳水化合物、菌丝、植物根系等),团聚体中有机碳以物理保护为主,周转快,变异性较大^[29-30]。而小粒级团聚体中有机碳以化学保护为主(微生物来源的腐殖质较多,并与黏粒结合),分解慢,有利于长期保存^[31-32]。随着团聚体粒级减小其有机碳周转时间变长,有机碳氧化稳定性增强,碳活性和氮活性降低^[32-33]。所以在长期不受人为干扰的情况下小粒级团聚有机碳累积明显,退耕还落叶松林地 < 0.25 mm 团聚体有机碳含量显著高于耕地,由此也反映退耕还林在较长时间尺度上有利于土壤有机碳库的提高。

4 结 论

坡地黑土团聚体再分布过程受土地利用方式及相应侵蚀营力的影响,进而导致团聚体内部有机碳含量和贮量的差异。与耕地相比,林地小粒级风干团聚体比例较高,2 种林地 < 2 mm 团聚体组成比例在各个坡位均大于耕地,且团聚体有机碳含量随粒级减小逐渐增加,土壤团聚体内有机碳贮量表现为林地大于耕地,樟子松林地内所有坡位土壤团聚体有机碳贮量(31.49 ~ 71.99 g/kg)均显著高于退耕还落叶松林地(24.13 ~ 33.83 g/kg)和耕地(23.85 ~ 29.50 g/kg)。退耕还林可以改善黑土团聚体结构进而恢复有机碳库。

参 考 文 献

[1] 于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 99-103.
YU L, ZHANG B. The degradation situations of black soil in China and its prevention and counter measures[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 99-103.
[2] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
[3] OADES J M, WATERS J M. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1991, 29(2): 815-828.
[4] 张兴昌, 邵明安. 水蚀条件下不同土壤氮素和有机质流失规

- 律[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 231-234.
- ZHANG X C, SHAO M A. Soil nitrogen and organic matter losses under water erosion [J]. Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 231-234.
- [5] 赵传燕, 李林. 兰州市郊区土壤水稳定性微团聚体的组成分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 90-94.
- ZHAO C Y, LI L. Composition of stable micro-aggregates in the soil of Lanzhou suburbs [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2003, 39(6): 90-94.
- [6] GUBER A K, PACHEPSKY Y A, LEVKOVSKY E V. Fractal mass-size scaling of wetting soil aggregates [J]. Ecological Modelling, 2004, 182(3-4): 317-322.
- [7] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1350-1358.
- [8] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [9] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
- HAN X H, TONG X G, YANG G H, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 223-229.
- [10] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533-544.
- [11] 刘毅, 李世清, 邵明安, 等. 黄土高原不同土壤结构体有机碳库的分布[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1003-1008.
- LIU Y, LI S Q, SHAO M A, et al. Distribution of organic carbon pools in different sizes of soil aggregates in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 1003-1008.
- [12] PAUL E A, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 168(1): 241-257.
- [13] 黎宏祥, 王彬, 王玉杰, 等. 不同林分类型对土壤团聚体稳定性及有机碳特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 84-91.
- LI H X, WANG B, WANG Y J, et al. Impact of different forest types on stability and organic carbon of soil aggregates [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 84-91.
- [14] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2853.
- FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the black soil region, Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2847-2853.
- [15] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1287-1293.
- LIANG A Z, ZHANG X P, YANG X M, et al. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [16] 史长婷, 王恩旭, 陈祥伟. 黑土区落叶松人工林土壤团聚体有机碳及动态变[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 208-212.
- SHI C T, WANG E H, CHEN X W. Organic carbon in soil aggregates and its dynamic changes of larch plantations in black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 208-212.
- [17] 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3411-3421.
- HU N, MA Z M, LAN J C, et al. Nitrogen fraction distributions and impacts on soil nitrogen mineralization in different vegetation restorations of karst rocky desertification [J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3411-3421.
- [18] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1944, 25: 131-136.
- [19] 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 100-104.
- AN J, LU J, ZHENG F L, et al. Soil aggregate transport during soil erosion process under different soil surface conditions on black soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 100-104.
- [20] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 180-185.
- WANG Y, ZHANG J H, LI F C. Tillage erosion influence on soil water-stable aggregate and moisture properties on the hillslope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 180-185.
- [21] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157-164.
- FAN H Z, ZHANG J H, WANG Y, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157-164.
- [22] OOST K V, GOVERS G, DE ALBA S, et al. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality [J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(4): 443-466.
- [23] LOBB D A, GARY K R. Modelling tillage translocation using step, linear-plateau and exponential functions [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 51(3-4): 317-330.
- [24] 王占礼, 邵明安, 李勇. 黄土地区耕作侵蚀过程中的土壤再分布规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 168-172.
- WANG Z L, SHAO M A, LI Y. Study on the soil redistribution induced by tillage erosion in loess region of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 168-172.

[25] 方华军,杨学明,张晓平,等. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 467-474.
FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Effects of soil erosion and deposition on loss and accumulation of soil organic carbon in physical fractions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 467-474.

[26] 王占礼,邵明安,雷廷武. 黄土区耕作侵蚀及其对总土壤侵蚀贡献的空间格局[J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1328-1335.
WANG Z L, SHAO M A, LEI T W. Spatial patterns of tillage erosion and its contribution to total erosion in loess region of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1328-1335.

[27] 王禹,杨明义,刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. 核农学报, 2010, 24(1): 98-103.
WANG Y, YANG M Y, LIU P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated slope[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(1): 98-103.

[28] 安韶山,张玄,张扬,等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 109-113.
AN S S, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Distribution of organic carbon in different soil aggregates size during revegetation in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 109-113.

[29] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.

[30] GOLCHIN A, ODAS J M, SKJEMSTAD J O, et al. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an oxisol under forest and pasture[J]. Australian Journal of Soil Research, 1995, 33(1): 59-76.

[31] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soil[J]. Journal of Soil Research, 1982, 33(2): 141-163.

[32] CAMBADELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 1071-1076.

[33] PUGET P, CHENU C, BALESDENT J. Total and young organic matter distribution in aggregates of silty cultivated soils [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 46(3): 449-459.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑委 孙向阳)