

DOI: 10.5846/stxb201906211313

任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 宋学姝, 陆森. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征. 生态学报, 2020, 40(19): 6991-6999.
Ren R X, Du Z L, Sun Y H, Song X S, Lu S. Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of north China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6991-6999.

华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征

任荣秀^{1,2}, 杜章留³, 孙义亨^{1,2}, 宋学姝^{1,2}, 陆森^{1,2,*}

1 国家林业局林木培育重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要: 土地利用变化影响土壤团聚性及有机碳分布, 进而改变土壤碳循环过程。对太行山南部 50 年刺槐人工林(R50)、17 年刺槐人工林(R17)、自然恢复林(NR)和农田(CL)等不同土地利用方式下的表层土壤(0—20 cm)进行了系统研究, 利用湿筛法对土壤团聚体进行分级, 并计算土壤结构稳定性参数(平均重量直径 MWD, 团聚体比例 AR)及不同粒径团聚体有机碳贡献率, 进而分析弃耕后土壤团聚体分布及团聚体有机碳含量变化。结果表明, 土地利用方式对土壤团聚体粒径分布及团聚体有机碳含量有显著影响, 自然恢复林与刺槐林的大团聚体(>0.25 mm)含量都高于农田, 且自然恢复林的大团聚体增加更显著。MWD 的计算结果表明: 自然恢复林>刺槐人工林>农田, 说明该区域的自然恢复方式更容易促进大团聚体的形成, 并显著改良土壤结构及增强土壤团聚体稳定性。弃耕后, 不同土地利用方式 0—10 cm 土层各粒径团聚体有机碳含量均高于农田, 且团聚体有机碳含量与团聚体稳定性呈正相关。这些结果说明, 研究区域的自然植被恢复和人工造林都可以显著提高土壤的固碳能力, 且储存的有机碳主要存于大团聚体中, 而农田的有机碳大都存于粘粒+粉粒团聚体中。自然植被恢复和人工造林均提高了土壤结构稳定性, 是改善团粒结构、提高土壤质量的有效方式。

关键词: 土地利用方式; 团聚体; 土壤有机碳; 有机碳贡献率

Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of north China

REN Rongxiu^{1,2}, DU Zhangliu³, SUN Yiheng^{1,2}, SONG Xueshu^{1,2}, LU Sen^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Land use patterns affect the organic carbon distribution of soil aggregates and the carbon cycle process. In this study, a 50 years-old (R50) and a 17 years-old (R17) *Robinia pseudoacacia* plantations, a natural restoration forest (NR), and a cropland (CL) in the south Taihang hilly area were studied. Soil aggregates size distribution was determined by the wet-sieving method, and the organic carbon contribution and stability indexes of soil aggregates were calculated. The results showed that land use patterns had significant impact on the particle size distribution and organic carbon content of soil aggregates. The content of large aggregate (>0.25 mm) in the natural restoration forest and *Robinia pseudoacacia* plantations was larger than that in the cropland. The increasing of large aggregate (> 0.25 mm) content in the natural

基金项目: 中国林科院院基金(CAFYBB2017QC001, CAFYBB2019GC001-1)

收稿日期: 2019-06-21; 网络出版日期: 2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lusen@caf.ac.cn

restoration forest was more significant. The calculated mean weight diameter (MWD) was in the order of NR>*Robinia pseudoacacia plantations*>CL. It indicates that the natural restoration forest in the studied region is easier to form large aggregates than other land uses due to few manual disturbances. In 0—10 cm layer, the organic carbon content of soil aggregates with different diameters at three forests was larger than that of cropland. Moreover, the organic carbon content of various aggregates was positively related with the stability of aggregates. These results shows that the conversion of cropland to plantations is capable of improving soil carbon sequestration capacity in the studied region, and the organic carbon is stored mainly in the large soil aggregates. In the cropland, however, most of the organic carbon is stored in the silt and clay of soil. The natural restoration forest and *Robinia pseudoacacia* plantations both are the effective land use patterns for improving soil structure and soil quality.

Key Words: land use pattern; soil aggregate; soil organic carbon; organic carbon contribute rate

土地利用变化等人为干扰是引起全球气候不平衡的重要因素^[1],合理的土地利用变化管理可促进土壤有机碳(SOC, Soil Organic Carbon)积累并在缓解全球气候变化方面发挥关键作用^[2]。森林土壤有机碳库是全球最大的土壤碳库,其含量的细微变化都可能引起大气 CO₂浓度的巨大改变^[3]。作为土壤结构的基本单元,团聚体是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境^[4-5],不同粒径的团聚体会影响土壤持水性、通透性和孔隙性^[6]。良好的团粒结构不仅可以增强土壤稳定性、降低水土流失,还可以增强有机碳的物理保护作用^[7]。因此,土壤团聚体稳定性目前已被视为土壤质量或土壤健康的重要指标^[8]。

在土壤团聚体研究中,不同土地利用方式下团聚体的粒径分布及其有机碳含量变化和成因,一直以来都是研究的热点问题。目前对团聚体稳定性及其有机碳含量的研究主要集中在不同耕作方式、不同施肥处理等农田土壤^[9-10],或者研究不同林分类型之间的团聚体及有机碳差异^[11-12]。如王峻等在研究不同耕作方式、秸秆还田对土壤团聚体及有机碳的影响后发现,采用免耕和秸秆还田等保护性耕作措施可以增加团聚体稳定性,同时伴随着土壤固碳潜力的增强^[13]。于法展等在对马尾松林、黄山松林等六种不同森林植被的土壤团聚体及有机碳含量研究后发现,不同林分类型间土壤 MWD 值差异较大^[14]。但长期以来,对弃耕还林引起的自然植被恢复与人工植被恢复的团聚体及其有机碳动态变化研究较少涉及。华北低丘山地是华北平原的重要生态屏障,是我国林业生态建设的重点区域之一。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为该区域的主要造林树种之一,现已在华北低丘地区形成了多龄级人工林。但目前对该区域弃耕后各种土地利用方式下的团聚体有机碳变化及其物理保护机制仍不清楚。为此,本文以华北南部低丘山地不同林龄的刺槐人工林为主要研究对象,通过与自然恢复样地和农田进行对比,深入探讨弃耕后不同土地利用方式变化对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响,并分析二者之间的相互关系。研究结果可为深入认识该区域弃耕后的土壤质量演变、选择合理的土地利用方式进而提高生态效益提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01'N, 112°28'E)进行,实验区域海拔为 382 m,地处河南省济源市境内的太行山南段与黄河流域的交接处(图 1)。属暖温带大陆性季风气候,年均气温为 12.4—14.3 °C,年日照时数为 2367.7 h,年均降水量为 641.7 mm,无霜期历年平均为 213.2 d,土壤类型主要为石灰岩风化母质淋溶性褐土。

1.2 采样地点及样品采集

采样时间为 2018 年 4 月。遵循试验样地与周边环境一致性的原则,在土壤类型、地势起伏及海拔接近的半阳坡、以 500 m 为半径的圆形研究区范围内,选取弃耕 17 年刺槐人工林、弃耕 50 年刺槐人工林、弃耕 50 年自然恢复林、农田为研究对象(图 1)。其中,刺槐林地为不同时期的农田弃耕后人工种植,之后没有人为扰动;自然恢复样地为农田弃耕 50 年后的自然恢复结果,历经多年自然恢复演替,无人扰动。样地调查结果

显示,17年林龄刺槐林的平均胸径为7.5 cm,平均树高为9.5 m,郁闭度为75%;50年林龄刺槐林的平均胸径为12.66 cm,平均树高为13.79 m,郁闭度为85%;两块刺槐林样地主要草本植物有竹叶草(*Oplismenus compositus*)、藟头(*Allium chinense*)、垂序商陆(*Phytolacca Americana*)、地胆草(*Elephantopus scaber*)、绢毛匍匐委陵菜(*Potentilla reptans* var. *sericophylla*)等。弃耕50年自然恢复样地内的现有优势物种为构树(*Broussonetia papyrifera*),经测量构树的平均胸径为8.6 cm,平均树高为9.31 m;自然恢复样地的地上其他植被十分丰富,主要为荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus*)、藟头(*Allium chinense*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)等。对照的农田样地为冬小麦—夏玉米轮作地,耕作采用旋耕方式,耕作深度约为20 cm,施肥和灌溉均遵循当地农民的传统习惯。在采样期间,农田地表除农作物外未见明显其他植被。

采样时,在每块样地上随机选择五个样点作为重复,分别取0—10 cm和10—20 cm土层的原状土装入保鲜盒带回实验室。所取样品沿自然裂隙掰开,立即去除可见的砾石、植物残体、根系和土壤动物,风干后采用Six等^[15]的土壤团聚体湿筛法进行颗粒分级:称取100 g风干土样分成两份,每份通过一个3层套筛(2 mm, 0.25 mm, 0.053 mm),在纯水中进行湿筛分离(震荡振幅3 cm,频率50次/分),分别得到>2 mm、2—0.25 mm、0.25—0.053 mm、<0.053 mm 4个不同的组分,对不同组分在60℃条件下烘48 h后称重,并进行土壤团聚体有机碳含量测定。

在本研究中,土壤有机碳的测定使用德国Elementar IsoPrime 100(*Elementar Analysen systeme GmbH*,德国)稳定同位素比质谱仪进行。该仪器使用燃烧法进行元素测定,因而对待测土样需要先用0.1 mol/L盐酸进行去酸前处理,去除无机碳后再进行有机碳测定^[16]。

1.3 数据分析

在本研究中,分别计算平均重量直径(MWD, Mean Weight Diameter)和团聚体比例(AR, Aggregate Ratio)作为土壤结构稳定性的评价指标^[17]。

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

式中, n 为粒径分组的组数, w_i 为该组团聚体占有所有粒径团聚体的质量分数, x_i 为该组团聚体的平均直径(mm)。

$$AR \text{ 的计算公式为} \quad AR = \frac{\text{Macroaggregate}}{\text{Microaggregate}} \quad (2)$$

式中,Macroaggregate为粒径>0.25 mm的团聚体占有所有粒径团聚体的质量分数,Microaggregate为粒径<0.25 mm团聚体占有所有粒径团聚体的质量分数。

团聚体有机碳贡献率的计算方法为^[18]:

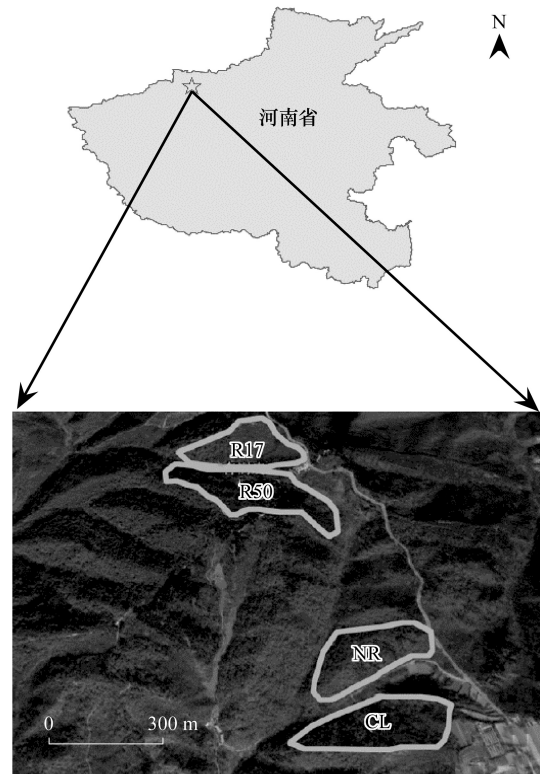


图1 研究区位置(济源,中国)

Fig.1 Location of the study area (Jiyuan, China)

R50:弃耕50年刺槐林 50-years-age *Robinia pseudoacacia* plantation;
R17:弃耕17年刺槐林 17-years-age *Robinia pseudoacacia* plantation;
NR:弃耕50年自然恢复林 natural restoration forest; CL:农田 cropland

$$\text{团聚体有机碳贡献率} = \frac{\text{该粒径团聚体有机碳含量} \times \text{该粒径团聚体质量分数}}{\text{土壤总有机碳含量}} \quad (3)$$

统计分析利用 SPSS 22.0 进行方差分析,其中平均值的检验采用 LSD 法,显著性水平 $P=0.05$,误差线为 SE。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对土壤团聚体分布及土壤结构稳定性的影响

弃耕后,不同的土地利用方式影响各个深度土壤团聚体大小的分布。如图 2 所示,在自然恢复林 0—10 cm 土层, >2 mm 粒径的团聚体含量显著高于其他 3 种土地利用方式 ($P<0.05$),而 0.053—0.25 mm 粒径的团聚体含量明显低于其他土地利用方式 ($P<0.05$)。在 <0.053 mm 粒径中,农田土壤的该粒径含量显著高于其他几种土地利用方式 ($P<0.05$),刺槐林与自然恢复林在该团聚体粒径之间含量也存在差异,其中弃耕还林 17 年刺槐林土壤与自然恢复林间差异显著 ($P<0.05$)。总的来说,除自然恢复林外, >2 mm 粒径团聚体在各个土地利用方式中均含量最低;四种不同土地利用方式的土壤团聚体含量均随着团聚体粒径的减小呈现先增高后降低趋势。

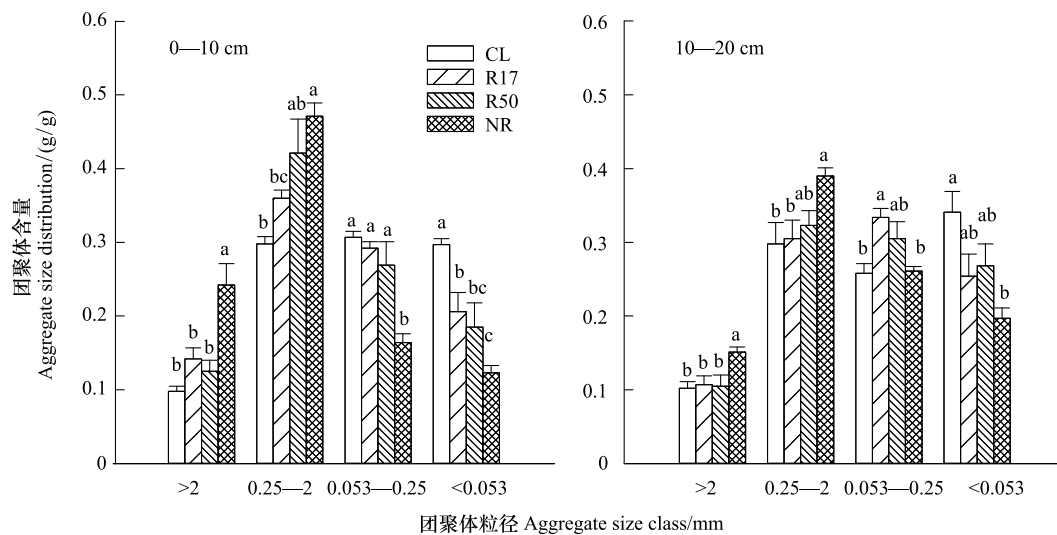


图 2 各土地利用方式不同粒径土壤团聚体含量

Fig.2 Soil aggregate contents with different sizes in four land use patterns

不同小写字母表示同一土层不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$)

在 10—20 cm 土层,自然恢复林 >2 mm 粒径团聚体含量显著高于其他 3 种土地利用方式 ($P<0.05$),这一趋势和 0—10 cm 一致。计算结果表明,自然恢复林 0.25—2 mm 粒径的团聚体含量分别是 50 年刺槐林土壤、17 年刺槐林土壤、农田土壤的 1.21、1.28、1.31 倍。对于 <0.053 mm 粒径,农田土壤在该粒径含量均高于其他几种处理,但统计显示只与自然恢复林差异显著 ($P<0.05$)。

由 0—10 cm 与 10—20 cm 两个土层测定结果可以看出,不同土地利用方式对土壤团聚体粒径的影响在表层更加明显。除农田土壤外各土地利用方式大团聚体 (>0.25 mm) 含量在 10—20 cm 土层都比 0—10 cm 土层低,而农田土壤的大团聚体 (>0.25 mm) 含量在两个土层差异较小。

团聚体比例及平均重量直径计算结果如图 3 所示,在 0—10 cm 土层,弃耕 17 年刺槐林、弃耕 50 年刺槐林与自然恢复林 3 种土地利用方式的 AR 值分别是农田的 1.33、1.46、3.49 倍,自然恢复林与其他 3 种土地利用方式间均呈显著差异 ($P<0.05$)。在 10—20 cm 土层,3 种土地利用方式 AR 值分别是农田处理的 0.78、0.91、1.31 倍,自然恢复林与其他 3 种土地利用方式呈显著差异 ($P<0.05$)。

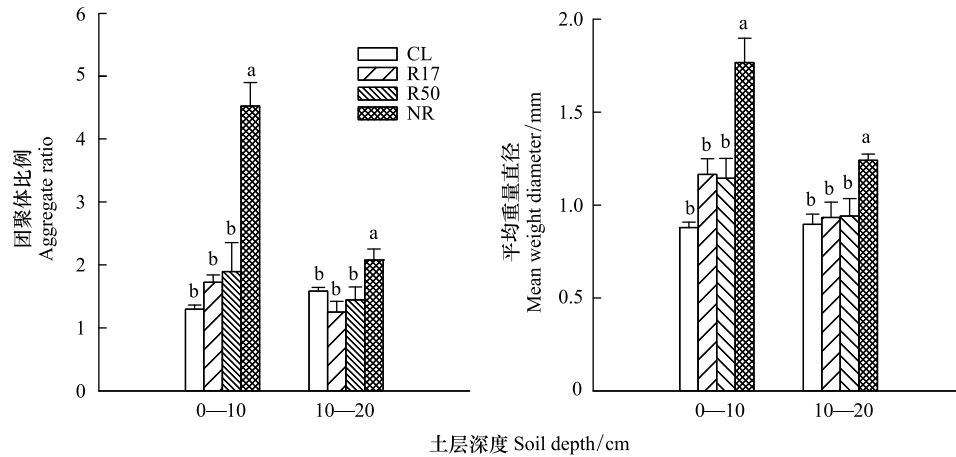


图3 各土地利用方式土壤团聚体比例(AR)与平均重量直径(MWD)

Fig.3 The results of soil aggregate ratio (AR) and mean weight diameter (MWD) at four land use patterns

不同小写字母表示同一土层不同土地利用方式间差异显著(P<0.05)

在0—10 cm 土层,4 个土地利用方式的 MWD 值范围为 0.879—1.77 mm,弃耕 17 年刺槐林、弃耕 50 年刺槐林与自然恢复林 3 种土地利用方式的 MWD 值分别是农田的 1.33、1.30、2.01 倍,其中自然恢复样地 MWD 值显著高于其他 3 种土地利用方式;弃耕后,50 年林龄刺槐和 17 年林龄刺槐土壤 MWD 值均高于农田土壤,但差异并不显著。对比不同土壤深度的计算结果显示,10—20 cm 土层中弃耕 17 年刺槐林、弃耕 50 年刺槐林与自然恢复林 3 种土地利用方式的 MWD 值比 0—10 cm 土层分别降低 19.8%、17.8%和 29.9%。

以上结果表明,在 4 种土地利用方式的两个土层,自然恢复林 AR 与 MWD 值均最高,而农田呈现较低的团聚体稳定性指标值。这说明在该区域的自然恢复较其他土地利用方式更有利于大团聚体形成,对土壤结构的稳定性有最积极作用。对比自然恢复林与人工林的结果也可以看出(图 3),自然恢复林在两个土层上均呈现出相对大团粒结构,并和人工林呈显著差异(P<0.05)。

2.2 不同土地利用方式对各粒径土壤团聚体有机碳含量及其有机碳贡献率的影响

如图 4 所示,土地利用方式影响不同粒径土壤团聚体有机碳含量。在 0—10 cm 土层,团聚体有机碳含量

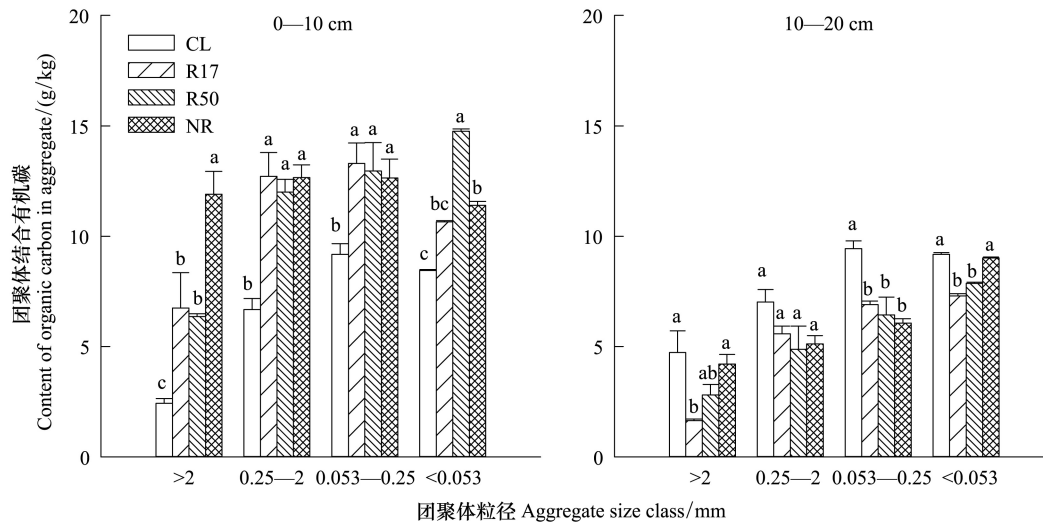


图4 各土地利用方式不同粒径团聚体有机碳含量

Fig.4 Organic carbon contents of soil aggregates with different particle sizes at four land use patterns

不同小写字母表示各土地利用方式在同一团聚体粒径间差异显著(P<0.05)

的最大值出现在弃耕 50 年刺槐林土壤 <0.053 mm 粒径团聚体内,而团聚体有机碳含量最低值出现在农田土壤的 >2 mm 粒径,并且各处理不同粒径团聚体有机碳含量均大于农田。而在 10—20 cm 土层,团聚体有机碳含量最高值出现在农田土壤的 0.053—0.25 mm 粒径,最低值出现在弃耕还林 17 年的刺槐林 >2 mm 粒径。对比 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层的结果显示,除农田外的各个土地利用方式其各个粒径团聚体有机碳含量均随深度增加有明显降低。对于农田土壤,其 10—20 cm 土层的部分粒径团聚体有机碳含量反而超过 0—10 cm 土层。

如图 5 所示,在 0—10 cm 土层,除农田外,其余 3 种土地利用方式土壤有机碳贡献率表现一致,均以 0.25—2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率最大,随着粒径的减小,团聚体有机碳贡献率逐渐降低。在农田土壤中,土壤有机碳贡献率最高的是 0.053—0.25 mm 和 <0.053 mm 两个粒径的团聚体。在 10—20 cm 土层,农田土壤团聚体有机碳贡献率随粒径增大而降低;而其他 3 种林地土壤这一土层中,除 >2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率较低外,其余几种粒径团聚体的有机碳贡献率之间差异均不显著。

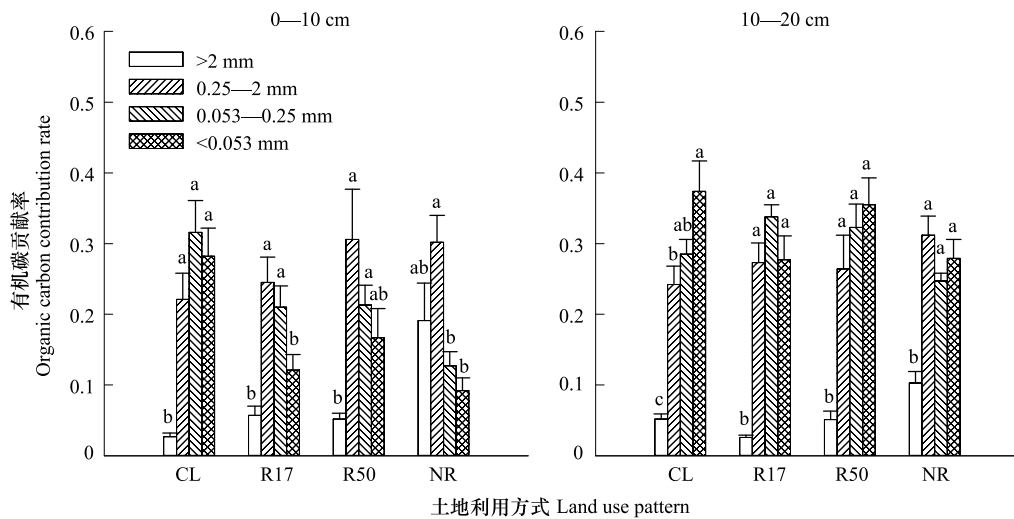


图 5 各土地利用方式不同粒径团聚体有机碳贡献率

Fig.5 The organic carbon contribution rates of soil aggregates with different particle sizes at four land use patterns

不同小写字母表示同种土地利用方式下不同团聚体粒径间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 土壤有机碳含量与结构稳定性的关系

两个土层土壤的 SOC 和 MWD 的相关性如图 6 所示。在 0—10 cm 土层内, MWD 和 SOC 间呈显著正相关性 ($r = 0.79, P < 0.01$)。回归分析结果表明,当土壤 SOC 每增加 1 g/kg,该土层的 MWD 就会增加 0.476 mm。而在 10—20 cm 土层内, MWD 和 SOC 间无明显的统计线性相关关系 ($r = 0.21, P = 0.46$),这说明该土层 SOC 增加对 MWD 的影响较小。两个土层土壤的 SOC 与 AR 的相关性如图 6 所示。在 0—10 cm 土层内, AR 和土壤 SOC 呈显著性相关 ($r = 0.77, P < 0.01$)。而在 10—20 cm 土层内,两者呈现弱线性相关 ($r = 0.51, P = 0.05$)。计算表明, SOC 的增加更容易引起大团聚体的形成,这一结果在 0—10 cm 土层更为明显。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤团聚体粒径分布的影响

不同土地利用方式会改变土壤的微生态环境,从而影响土壤理化性质,进而影响土壤的团聚体分布^[19]。合适的团聚体比例不仅会影响土壤肥力,而且是土壤有机碳稳定的重要保障^[20]。研究发现,在该地区弃耕人工造林或者自然恢复后,土壤 0—10 cm 土层的大团聚体数量对比农田土壤将会出现不同幅度上升,可能是土壤的粘粒+粉粒 (<0.053 mm) 团聚体黏合成了粒径更大的团聚体 (0.053—0.25 mm 和 0.25—2 mm),这一过程

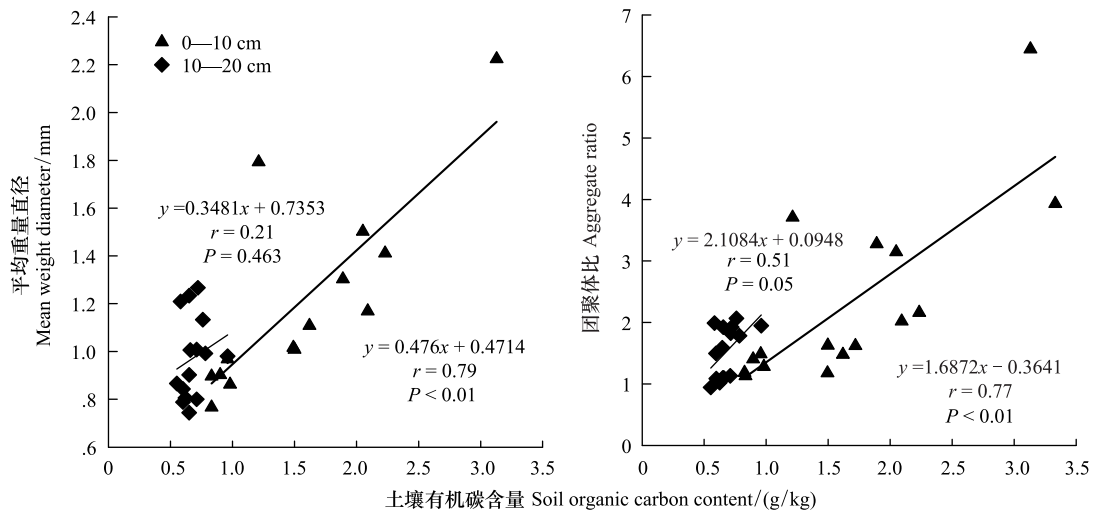


图 6 土壤有机碳含量与平均重量直径(MWD)和团聚体比例(AR)间的关系

Fig.6 The relationship between organic carbon content and mean weight diameter (MWD) and the relationship between organic carbon content and aggregate ratio (AR) of soils

提高了土壤团聚体的水稳性,改善了土壤的结构^[4]。而农田土壤由于常年翻耕,人为扰动程度较大,且耕作加速了土壤团聚体的破碎,所以大团聚体含量相对较低^[8]。这与 An 等(2010)在黄土高原的研究结果类似,由于耕作对根系的破坏,植物纤维对土壤结构的稳定作用将会变弱,即相比于农田,森林土壤的团聚体稳定性更高^[21]。

土地利用方式变化同时也影响土壤的 MWD 和 AR 值。本研究发现在 0—10 cm 土层,弃耕后无论是人工造林还是自然恢复林,对比农田其 MWD 和 AR 值均增大,其中自然恢复林与农田结果差异显著。这主要是由于耕作所引起的农田土壤扰动会导致土壤有机碳损耗和稳定性团聚体减少^[22]。而在影响团聚体稳定性和改善土壤结构的各种因素中,土壤有机质含量水平以及微生物种群数量尤为重要^[23]。森林土壤由于凋落物含量高且在地表聚集,一方面减少了雨水对土壤的冲刷,另一方面这些有机残余物在分解过程中可以激活微生物群落并导致真菌和细菌数量的提高,而它们产生的根系分泌物和酶可以增加土壤团聚体的稳定性^[24]。在不同深度土壤上的计算结果表明,除农田土壤外,其他 3 种土地利用方式 0—10 cm 土层 MWD 和 AR 值均高于 10—20 cm 土层,表明水稳性团聚体含量随着土层的加深而降低,这主要与表层土壤凋落物及草本植物的根系及其分泌物有关,近表层的高有机质含量可为大团聚体形成提供物质基础,进而增加了水稳性团聚体含量,并最终改善土壤质量^[25]。而农田由于常年采用小麦—玉米轮作的耕作方式,每年会对土壤进行翻耕,团粒结构易被人为破坏,从而产生较低 MWD 值。本研究也发现,实验样地中自然恢复样地地表草本及灌木植被生物量远大于刺槐林,其每年产生的枯枝落叶等凋落物也多于刺槐林;此外,自然恢复样地内以构树为主要优势种群,构树为落叶乔木,具有根系浅、侧根分布广、生长快等特点,其早期生长速度及生物产量甚至超过杨树,庞大的水平根系有利于防止水土流失、改善土壤质量,这也是该土地利用类型土壤结构更加稳定的一个重要原因^[26-27]。

3.2 不同土地利用方式对土壤团聚体有机碳含量及贡献率的影响

土地利用方式的更替对土壤有机碳含量影响显著,原因可能在于植被覆盖类型不同,凋落物类型也不同,从而影响了土壤养分含量^[28]。本研究几种土地利用方式 >2 mm 粒径团聚体有机碳贡献率均较低,实验过程中我们发现该区域 >2 mm 粒径土壤团聚体中普遍存在着大量的低含碳量半风化碎石,该结果应该主要是由于半风化碎石的影响。而在 3 种林地土壤中,除 >2 mm 粒径团聚体外,土壤有机碳的贡献率均随团聚体粒径增大而增大。一般地,水稳性团聚体稳定性依赖于多糖、根、真菌菌丝等有机胶结成分以及一些物理化学过程

的相互作用,依据 Tisdall 和 Oades 模型,最小的团聚体由有机矿质碎片组成,它们与真菌细菌碎片结合在一起形成微团聚体(<0.25 mm);然后,植物根系和菌丝将这些微团聚体缠绕形成大团聚体(>0.25 mm),本研究的结果也符合这一模型(图 5)^[29]。研究发现,在自然恢复林 0—10 cm 土层中,0.25—2 mm 与 0.053—0.25 mm 的团聚体有机碳贡献率分别是 <0.053 mm 团聚体有机碳贡献率的 3.28 倍和 1.38 倍,远大于农田土壤的相应数值。图 5 结果表明,农田土壤有机碳大部分存在于 <0.25 mm 的微团聚体中,这是因为耕作会破碎大团聚体并使有机质暴露出来,使得有机质更容易被土壤微生物所矿化分解,而小团聚体内有机碳一般较难被分解,所以与林地相反,农田土壤有机碳更多地集中在微团聚体中(图 5)^[30]。这也和 Six 等的研究结果一致,即耕作方式和强度会显著影响土壤有机质的累积,高耕作强度会加快土壤有机质的转化,同时减少团聚作用的形成^[15]。因此,在该地区也可以多采用一些保护性耕作措施,如少耕、免耕技术,配合秸秆还田,有机肥施用等来提高当地农田有机碳含量,增加土壤结构的稳定性^[31]。

3.3 不同粒径团聚体有机碳含量与土壤结构稳定性的关系

本研究发现在 0—10 cm 土层,土壤团聚体结构稳定性和土壤有机碳含量呈显著正相关关系,这也和大部分研究者的研究结论一致^[32]。即耕作等人为活动可显著影响土壤团聚体的大小分布和孔隙结构,进而对土壤微生物栖息地产生影响,从而使受保护的有机质变的易于被微生物代谢和转化,最终影响种群活动及土壤有机质含量^[22]。一般地,土壤团聚体发育程度和土壤的固碳能力有很强的相关性,团聚体的形成是有机胶体粘合作用的结果,反过来团聚体的形成又可以阻止有机碳的快速损失,团聚体内部的厌氧条件也可以降低有机碳的分解速度^[33]。但也有些学者认为团聚体和团聚体有机碳之间的紧密关系并不适用于所有的土壤类型或者土地利用方式,只有在减少机械破坏的情况下,二者才有相关性。在自然或者改良的农田生态系统中,由于大团聚体内部的保护性环境,大团聚体包被的小团聚体周转速度较慢,以保护其内部包被的颗粒有机碳同时提高矿物结合碳分解产物的稳定性,从而提高团聚体的稳定性^[34]。在本研究中,弃耕后的土壤大团聚体增加和水稳定性增强都和土壤有机质的积累有关,尤其是在 0—10 cm 土层,二者有很好的线性相关性;没有人扰动,土壤形成的大团聚体不会被破坏,团聚体也可显著降低微生物与其内部包被有机质接触的可能性,从而引起有机质含量的增加^[35]。此外,弃耕后林下植被丰富,减少了地表的裸露,减轻了雨水等对地面的击打,这也会增加土壤团聚结构的稳定性^[36]。

4 结论

1. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性有显著影响,弃耕后自然恢复林与刺槐人工林的大团聚体(>0.25 mm)含量都高于农田,且自然恢复林的大团聚体增加更为显著。与农田土壤相比,自然恢复林和刺槐人工林的 <0.053 mm 团聚体含量均显著下降,这些现象在 0—10 cm 土层比 10—20 cm 土层更加明显。该研究区域的自然和人工植被恢复均可显著促进大团聚体的形成,并改善土壤结构。

2. 弃耕还林后,在 0—10 cm 土层内,3 种林地土壤的各粒径团聚体有机碳含量均大于农田,弃耕还林可以增加土壤团聚体有机碳含量。除 >2 mm 粒径团聚体外,3 种林地土壤的有机碳贡献率均随团聚体粒径的增加而增加,而农田土壤的有机碳大部分存在于 <0.25 mm 粒径微团聚体中。

3. 表层土壤的团聚体稳定性与其各个粒级团聚体有机碳含量之间呈显著正相关关系,团聚体的水稳性主要依靠土壤有机质的胶结作用。弃耕营造刺槐林或者自然恢复均可以增加研究区域的土壤团聚体有机碳含量并提高其土壤结构稳定性,是该区域较为合理的土地利用方式。

参考文献 (References):

- [1] Pachauri R K, Meyer L. Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] Olorunfemi I E, Fasinmirin J T. Land use management effects on soil hydrophobicity and hydraulic properties in Ekiti State, forest vegetative zone of Nigeria. CATENA, 2017, 155: 170-182.
- [3] 黄蓉. 不同更新方式对亚热带森林土壤团聚体有机碳稳定性的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.

- [4] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [5] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展. *水土保持研究*, 2002, 9(1): 81-85.
- [6] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *CATENA*, 2002, 47(2): 133-149.
- [7] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- [8] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 22-29.
- [9] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, Zhang Q Z. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 581-589.
- [10] Du Z L, Ren T S, Hu C S, Zhang Q Z. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 26-31.
- [11] 周纯亮, 吴明. 中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征. *土壤*, 2011, 43(3): 406-410.
- [12] 丁杨, 张建军, 茹豪, 王丹丹, 李玉婷, 李志龙. 晋西黄土区不同林地土壤团聚体分形维数特征与土壤养分相关关系. *北京林业大学学报*, 2014, 36(4): 42-46.
- [13] 王峻, 薛永, 潘剑君, 郑宪清, 秦秦, 孙丽娟, 宋科. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 121-127.
- [14] 于法展, 张茜, 张忠启, 李玲, 雷良媛, 张少坤, 陈俊. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 15-19.
- [15] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [16] Lim B, Hélène C. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays. *Chemical Geology*, 1996, 131(1/4): 143-154.
- [17] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate Stability and Size Distribution//Klute A ed. *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America Agronomy Monograph. Madison; Wisconsin, 1986: 425-442.
- [18] 朱丽琴, 黄荣珍, 贾龙, 黄国敏, 王赫, 刘勇. 植被恢复对退化红壤水稳性团聚体有机碳的影响. *森林与环境学报*, 2018, 38(1): 76-83.
- [19] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429.
- [20] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 代静玉, 周运超, 张平究. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609-618.
- [21] An S S, Mentler A, Mayer H, Blum W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2010, 81(3): 226-233.
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [23] Diaz E, Roldán A, Lax A, Albaladejo J. Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat. *Geoderma*, 1994, 63(3/4): 277-288.
- [24] Wei C F, Gao M, Shao J A, Xie D T, Pan G X. Soil aggregate and its response to land management practices. *China Particology*, 2006, 4(5): 211-219.
- [25] 刘威, 张国英, 张静, 刘璐, 黄丽, 鲁剑巍, 李小坤. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 117-122.
- [26] 张贤, 杨仪梅. 构树在造林绿化中的应用. *国土绿化*, 2013, (3): 43-43.
- [27] 李维均. 优良乡土树种——构树. *农家顾问*, 2006, (12): 34-34.
- [28] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, Xue Z S. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(6): 1043-1051.
- [29] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water - stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [30] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [31] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展. *农业机械学报*, 2008, 39(9): 43-48.
- [32] Chaney K, Swift R S. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science*, 1984, 35(2): 223-230.
- [33] 顾伟, 李志安, 邹碧, 谭万能, 丁永祯. 华南热带人工林土壤有机碳含量及其稳定性特征. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(5): 369-376.
- [34] Denef K, Zotarelli L, Boddey R M, Six J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 1165-1172.
- [35] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, Malo D D. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 253-263.
- [36] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征. *林业科学*, 2011, 47(4): 95-100.