

不同土地利用方式对土壤团聚体 稳定性及碳氮含量的影响

季卫英¹, 管丹蓉², 宓立峰², 丁颖³

(1.浙江省耕地质量与肥料管理总站, 浙江 杭州 310020;

2.浙江恒美环保科技有限公司, 浙江 杭州 310000; 3.杭州师范大学 工学院, 浙江 杭州 311121)

摘要: [目的] 研究浙东典型森林公园地区土壤中的生物群落和有机质的变化, 为改善该地区的土壤结构和提高土壤有机质含量奠定基础。[方法] 在浙东典型天童国家森林公园选择林地、果园、蔬菜地和荒地这4种土地利用方式, 通过湿筛法测定中间团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)、大团聚体(>2 mm)和粉黏粒(<0.053 mm)有机碳含量和微生物量碳、氮含量, 揭示浙东典型森林公园地区土壤有机碳库的形成格局和调控。[结果] ①不同土地利用方式下各个粒级的团聚体有机碳和微生物量碳、氮的分配规律相似, 均表现为: 中间团聚体>微团聚体>大团聚体>粉黏粒; 不同土地利用方式下0—10 cm土壤平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均高于10—20 cm土层, 0—10和10—20 cm土壤MWD和GMD大致表现为: 林地>荒地>果园>蔬菜地, 其中林地和荒地差异不显著($p>0.05$), 果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$), 由此说明不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响主要在表层土壤。②不同土地利用方式下土壤各粒径有机碳含量趋势一致, 基本表现为: 大团聚体>微团聚体>中间团聚体>粉黏粒, 且0—10 cm土层土壤各粒径有机碳含量均高于10—20 cm土层, 0—10和10—20 cm土壤有机碳含量大致表现为: 林地>荒地>果园>蔬菜地, 其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$), 果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。③不同土地利用方式土壤各粒径微生物量碳和氮变化趋势一致, 基本表现为: 大团聚体>微团聚体>中间团聚体>粉黏粒, 且0—10 cm土层土壤微生物量碳和氮含量均高于10—20 cm土层, 0—10和10—20 cm土壤微生物量碳和氮含量大致表现为: 林地>荒地>果园>蔬菜地, 其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$), 果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。[结论] 林地和荒地土壤团聚体有机碳、微生物量碳和氮高于果园和蔬菜地, 由此表明林地和荒地更有利于土壤有机碳的累积, 土壤固碳潜力更大。

关键词: 土地利用方式; 土壤团聚体; 微生物量碳; 微生物量氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0377-10

中图分类号: S152.4, S152

文献参数: 季卫英, 管丹蓉, 宓立峰, 等. 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 377-386. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.038; Ji Weiyang, Guan Danrong, Mi Lifeng, et al. Effects of different land-use patterns on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 377-386.

Effects of Different Land-use Patterns on Soil Aggregate Stability and Contents of Carbon and Nitrogen

Ji Weiyang¹, Guan Danrong², Mi Lifeng², Ding ying³

(1. Cultivated Land Quality and Fertilizer Administration Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou,

Zhejiang 310020, China; 2. Zhejiang Hengmei Environmental Protection Technology Co., Ltd, Hangzhou,

Zhejiang 310000, China; 3. School of Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou, Zhejiang 311121, China)

Abstract: [Objective] The changes of soil biomes and organic matter in typical forest park areas of Eastern Zhejiang Province were studied to lay a foundation for improving soil structure and increasing soil organic matter content in this area. [Methods] Detecting aggregate (0.25—2 mm), micro aggregate (0.053—0.25 mm), big

收稿日期: 2024-06-11

修回日期: 2024-09-23

资助项目: 2024年浙江省三农九方科技协作项目“食药用品种筛选及配套高效栽培技术”(2024SNJF037)

第一作者: 季卫英(1971—), 女(汉族), 浙江省常山县人, 大学本科, 农艺师, 主要从事耕地质量建设方面的研究。Email: 164206052@qq.com.

通信作者: 丁颖(1980—), 女(汉族), 浙江省嘉兴市人, 博士, 副教授, 主要从事环境污染模拟与控制方面的研究。Email: dingying@hzu.edu.cn.

aggregate (>2 mm), and powder clay (<0.053 mm) in the content of organic carbon, microbial biomass carbon and nitrogen content, the influence of soil aggregate stability, and microbes using wet sieving method under different land utilization way of forest land, orchard, vegetable land, and waste land to provide a scientific basis for formation pattern and regulation of soil organic carbon pool. [Results] ① The results showed that the distribution trend of the components of the aggregates of different soil particle sizes was consistent under different land-use patterns. The mean weight diameter (MWDS) and geometric mean diameter (GMD) of 0—10 cm soil under different land use ways were higher than those of the 10—20 cm soil layer. The MWDS and GMD of both types of soil were roughly characterized by forest land $>$ wasteland $>$ orchard $>$ vegetable land; forest land and wasteland showed no significant difference ($p>0.05$), and neither did orchards and vegetable land ($p>0.05$); this demonstrates the influence of different ways of land use on soil aggregate stability, mainly in the surface soil. ② For soils under different land-use patterns, each grain size trend of organic carbon content is consistent, and the basic performance is big aggregate $>$ micro aggregate $>$ middle aggregate $>$ powder and clay; for the 0—10 cm soil layer, each particle's size distribution of organic carbon content was higher than that of 10—20 cm soil layer, and the organic carbon content of forest land $>$ wasteland $>$ orchard $>$ vegetable land for the 0—10 cm and 10—20 cm soil is significantly higher than that of forest land and wasteland orchards and vegetable land ($p<0.05$), whereas orchards and vegetable land show no significant difference ($p>0.05$). ③ Soils under different land-use patterns of each particle size of microbial biomass carbon and nitrogen variation trend are consistent, and the basic performance is big aggregate $>$ micro aggregate $>$ middle aggregate $>$ powder and clay; for the 0—10 cm soil layer, the soil's microbial biomass carbon and nitrogen content were higher than those of the 10—20 cm soil layer, and the microbial biomass carbon and nitrogen content of 0—10 cm and 10—20 cm soil is generally characterized by forest land $>$ wasteland $>$ orchard $>$ vegetable land, significantly higher than that of forest land and wasteland orchards and vegetable land ($p<0.05$), whereas orchards and vegetable land show no significant difference ($p>0.05$). [Conclusion] Overall, the organic carbon, microbial biomass carbon, and nitrogen of the forest land and wasteland aggregate were higher than those of the orchard and vegetable land; thus, forest land and wasteland were more conducive to the accumulation of soil organic carbon and could promote soil carbon sequestration.

Keywords: land-use patterns; soil aggregates; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

土壤团聚体是由土壤中的颗粒通过有机和无机物质的胶结作用形成的结构性基本单元,按照其颗粒大小,可划分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)^[1-3]。前者包含了众多有机质,能够为土壤种植农作物提供充足养分,后者能够形成化学性质稳定的碳生物,两者同时保证了土壤中有机碳的长期存在^[4]。正是由于土壤中这些团聚体的存在,不同大小的颗粒与含量组合对土壤的物理性质产生了重大影响,确保了土壤中有机质等各种养分储量的存在,一定程度上提升了土壤质量,确保土壤保持充分的肥力和充足的稳定性^[5-6]。土壤团聚体以基本单元的形式塑造了土壤结构,通过有机碳的形成与保留,维持了土壤结构的稳定性,反映了生态系统属性问题。因此,土壤团聚体的物理结构与空间分布是评价土壤结构的关键指标^[7]。在土壤中,由于其物理构造及空间的分布,其稳定性存在着显著的差别,对土壤中的微生物行为产生了一定的作用,进一步改变了土壤中的生物化学作用^[8]。有机碳作为土壤中的重要

物质,能够保持土壤的稳定性;团聚体则以有机碳储存室的形式存在着,是维持土壤中碳含量的重要稳定器,发挥着重要保护作用。有机碳对于缓解温室效应同样意义非凡,根据有关数据表明,土壤中每损失 133 Gt 的有机碳,空气中就会增加 500 Gt 的二氧化碳,这也意味着团聚体对于温室效应的间接价值^[9-10]。因此,土壤团聚体不仅能保持土壤稳定,通过维持土壤有机碳的形式促进温室气体的吸收。同时,在不同物理性质下的土壤团聚体的生物化学性质、固碳作用等也存在差别^[11-12]。

微生物生物量是一种不超过 $5.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 的生物,包括活体植物^[13],包括各类细菌、真菌、藻类物质等。作为土壤中的重要活性物质,微生物通过各类生物化学作用,能够保持土壤中的养分含量,确保土壤正常的物质循环和能量循环,为实现生态系统的稳定性提供支持^[14-15]。土壤微生物生物量包含微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN),其中 MBC 仅占土壤有机碳含量的 1%~4%,但对于土壤中有机质

和土壤质量的维持发挥着重要作用^[16]。MBN 通过促进土壤中氮转化环节,保证土壤中有有机氮的含量,这也使得 MBN 受到环境影响较大,肥料种类、耕作方式等外在条件都会造成 MBN 数量的改变^[17-18]。作为土壤稳定性结构的重要组成部分,微生物的数量和分布情况为预测土壤团聚体内部碳氮含量和相应化学反应提供重要依据^[17-18]。

当前,国内外学者的研究主要集中于土壤团聚体的稳定性,从耕作方法、施肥灌溉方式等方面讨论土壤管理^[19]。土地利用方式的差异,造就了土壤团聚体数量及其内部有机碳、微生物碳、氮含量的差异^[20]。目前,围绕耕地土壤 MBC 和 MBN 的作用方式、耕作方法及其对土壤的影响,国内开展了大量的研究,但是,不同土地利用方式下土壤中 MBC 和 MBN 的相关分析鲜见报道。浙东典型森林公园地区是一个典型的生态环境脆弱地区,通过调查与取样检测该地区土壤群落结构、微生物数量及土壤有机质含量,对不同土地利用方式土壤团聚体及其碳氮含量

的差异性进行了分析与初步探讨,旨在为维护该地区生态环境的稳定与改善,促进土壤固碳,夯实农业与林业的发展基础,提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

调查采样区域位于浙东典型天童国家森林公园(121°47'E,29°48'N),属亚热带季风气候,雨热同期,季节变化明显,雨量充沛,年平均气温为 16.2℃,7 月均温 28.1℃,1 月均温 4.2℃,>10℃年积温 5 166.2℃,年降水量 1 374.7 mm,降雨多集中在夏季,年均相对湿度 82%;年均蒸发量 1 320.1 mm,相对湿度 82%。

该地区土地主要利用方式为林地、果园、蔬菜地、荒地。其中林地主要是常绿阔叶林(以小叶杨和落叶松为主),林下伴生灌木(木兰、花榈木);果园主要为香果树;蔬菜地主要以油菜为主。不同土地利用方式土壤基本理化性质见表 1。

表 1 不同土地利用方式土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in different land use modes

土地类型	pH 值	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	容重/ (g · mL ⁻¹)
林地	8.19	9.13	0.91	11.39	159.47	11.25	1.51
果园	5.57	21.46	2.61	6.72	38.42	151.11	1.35
蔬菜地	6.54	24.35	2.35	68.68	495.03	148.01	1.42
荒地	6.25	13.23	0.87	16.31	35.42	13.59	1.52

1.2 研究方法

2023 年 4 月对浙东典型森林公园地区进行了调查和采样。选择林地、果园、蔬菜地和荒地 4 种土地利用方式,每种土地利用方式选取 3 块地形相近的 100 m×100 m 重复样地,样地之间的间隔 100 m 以上。每个样地内设置 5 个 10 m×10 m 的样方,在每个样方内,布置 5 个采样点,采用挖槽取样方法对 0—10,10—20 cm 的不受干扰的原状土进行分层采样,将 5 个采样点分上层和下层样品分别混匀,然后采用四分法留取 1 kg 样品于硬质塑料盒中,并将其装运到样品箱中运回实验室。

样品带回实验室后,沿土块天然裂缝掰开为 1 cm 左右的小土块,四分法取出部分样品,风干后过 2 mm 筛,用于测定基本理化性质。土壤团聚体粒径分级采用湿筛法^[21],称取相当于 50 g 风干土的新鲜土壤样品于 200 ml 烧杯中,沿杯壁缓慢加入 10 ml 的超纯水,4℃的条件下浸润过夜。高压洗瓶吹洗烧杯中土壤样品至水盆中的 2 mm 筛上,加水漫过筛子顶部。

50 次/min 的频率上下 3 cm 幅度垂直移动筛子 2 min,冲洗并收集筛面上样品,即为大团聚体(>2 mm);将过筛土壤样品依次使用 0.25 和 0.053 mm 的筛子进行筛分,分别获得中间团聚体(0.25~2 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm),3 500 转/min 下离心通过 0.053 mm 筛的悬浊液,获得粉黏粒(<0.053 mm)。将获得的不同粒级团聚体四分法分成两份,一份置于 0.02 mm 纱网上阴干至不粘手,用于微生物量碳、氮测定,一份置于 40℃烘箱干燥 48 h 并进行称量,基于含水率计算不同粒级团聚体的质量分数。烘干样品过 0.15 mm 筛后混匀用于测定土壤有机碳和全氮含量。土壤有机碳和全氮测定采用元素分析仪测定;土壤微生物生物量碳和氮测定采用氯仿熏蒸^[22],0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提,TOC 仪测定土壤微生物量碳,凯氏定氮法测定土壤微生物量氮。每个样品室内做 3 次重复。

1.3 数据处理

利用平均重量直径(MWD)和几何平均粒径(GMD)

对土块的稳定性进行了评估。其计算公式为^[15]：

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \overline{X}_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp(\sum W_i \ln \overline{X}_i) \quad (2)$$

式中： i 为粒径分组数， $i=1, 2, \dots, n$ ； \overline{X}_i 为该组分的平均直径(mm)； W_i 为该组分质量分数(%)。

使用 Excel 2021 和 SPSS 23.0 软件进行数据处理和分析，所得结果均为 3 个重复的平均值和标准差，处理间方差分析采用单因素 Tukey HSD 检验方法， $p < 0.05$ 为差异性显著。

2 结果与分析

2.1 土地利用方式对土壤团聚体粒径分布的影响

由图 1 可知，研究区不同土地利用方式下土壤各粒级团聚体质量分数分布趋势基本一致，均表现为中间团聚体(0.25~2 mm) > 微团聚体(0.053~0.25 mm) > 大团聚体(>2 mm) > 粉黏粒(<0.053 mm)。对于 0—10 cm 土层，中间团聚体(0.25~2 mm)变化范围在 43.2%~46.8%之间；微团聚体(0.053~0.25 mm)变化范围在 27.6%~35.9%之间；大团聚体(>2 mm)变化范围在 12.7%~15.2%之间；粉黏粒(<0.053 mm)

变化范围在 4.6%~9.4%之间；与荒地相比，林地、果园、蔬菜地土壤中 大团聚体含量分别增加了 19.69%，3.94%和 0.79%；中间团聚体含量分别增加了 11.81%，5.56%和 8.10%，粉黏粒团聚体含量分别降低了 5.32%，8.51%和 51.06%。对于 10—20 cm 土层，中间团聚体(0.25~2 mm)变化范围在 44.3%~45.9%之间；微团聚体(0.053~0.25 mm)变化范围在 25.3%~31.2%之间；大团聚体(>2 mm)变化范围在 11.9%~14.7%之间；粉黏粒(<0.053 mm)变化范围在 10.8%~13.3%之间；与荒地相比，林地、果园、蔬菜地土壤中 大团聚体含量分别增加了 23.53%，5.88%和 4.20%。随土层深度增加，不同土地利用方式下土壤大团聚体均有所降低，林地和荒地中间团聚体(0.25~2 mm)随土层深度增加而增加，蔬菜地和果园中间团聚体随土层深度增加而降低。不同土地利用方式下土壤微团聚体均呈下降趋势。土壤粉黏粒均呈增加趋势。一般认为，0.25~2 mm 的黏土团块对保持土层的稳定有重要影响，它的分布水平愈高，则表明其稳定性较好^[23]。与荒地比较，林地土壤中 0.25~2 mm 的团块增大了很多，说明林地的土壤结构更加合理。

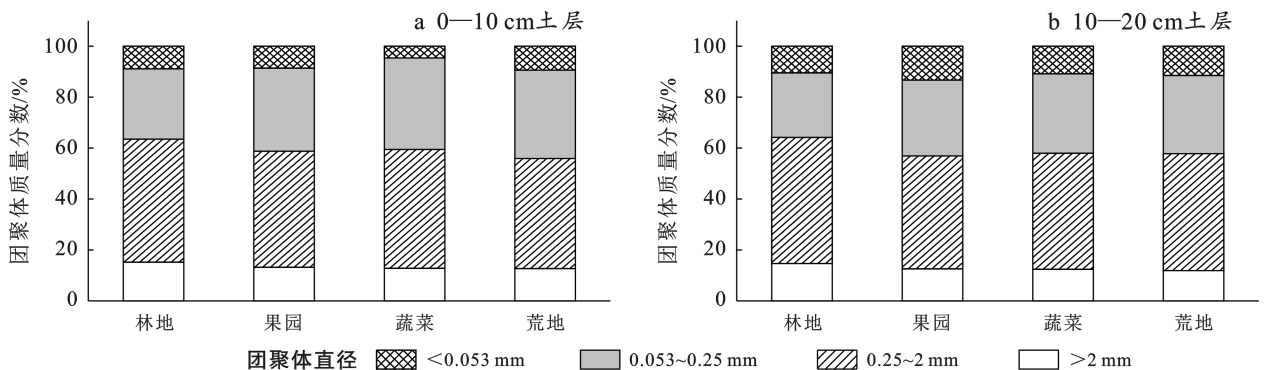


图 1 土地利用方式对土壤团聚体分布的影响

Fig.1 Effects of land-use patterns on soil aggregate distribution

2.2 土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

不同土地利用方式下土壤 MWD 和 GMD 如图 2 所示。由图 2 可知：不同土地利用方式下 0—10 cm 土壤 MWD 和 GMD 均高于 10—20 cm 土层。0—10 和 10—20 cm 土壤 MWD 大致表现为：林地 > 荒地 > 果园 > 蔬菜地，其中林地和荒地差异不显著 ($p > 0.05$)，果园和蔬菜地差异不显著 ($p > 0.05$)；0—10 和 10—20 cm 土壤 GMD 大致表现为：林地 > 荒地 > 果园 > 蔬菜地，其中林地和荒地差异不显著 ($p > 0.05$)，果园和蔬菜地差异不显著 ($p > 0.05$)。结果表明，不同的土地利用方式对胶结物的稳定作用不同。总体上，随

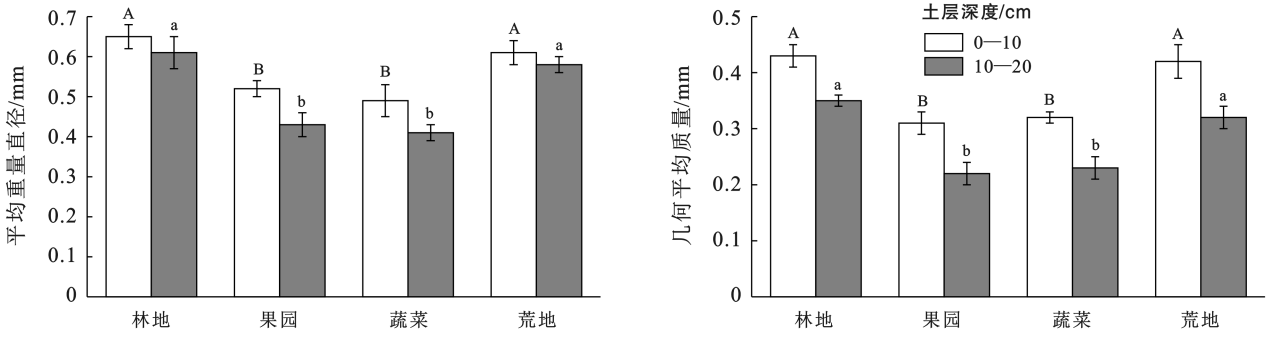
着土壤厚度的增大，各类型的土壤稳定性均呈下降趋势，对比果园和蔬菜地，森林、荒地可以增加聚合物的稳定性，从而改善土壤的构造，从而增加抵抗外部环境破坏的能力。

2.3 土地利用方式对团聚体有机碳的影响

在不同的土地使用模式下，各颗粒大小的团聚物的有机质含量见图 3。由图 3 可知，不同土地利用方式下土壤各粒径有机碳含量趋势一致，基本表现为：大团聚体(>2 mm) > 微团聚体(0.053~0.25 mm) > 中间团聚体(0.25~2 mm) > 粉黏粒(<0.053 mm)，且 0—10 cm 土层土壤各粒径有机碳含量均高于 10—

20 cm 土层。对于大团聚体(>2 mm),0—10 cm 和 10—20 cm 土壤有机碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于中间团聚体(0.25~2 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤有机碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于微

团聚体(0.053~0.25 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤有机碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于粉黏粒(<0.053 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤有机碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。



注:不同大写字母表示 0—10 cm 土层不同土地利用方式差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示 10—20 cm 土层不同土地利用方式差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

Fig.2 Effects of land-use patterns on stability of soil aggregates

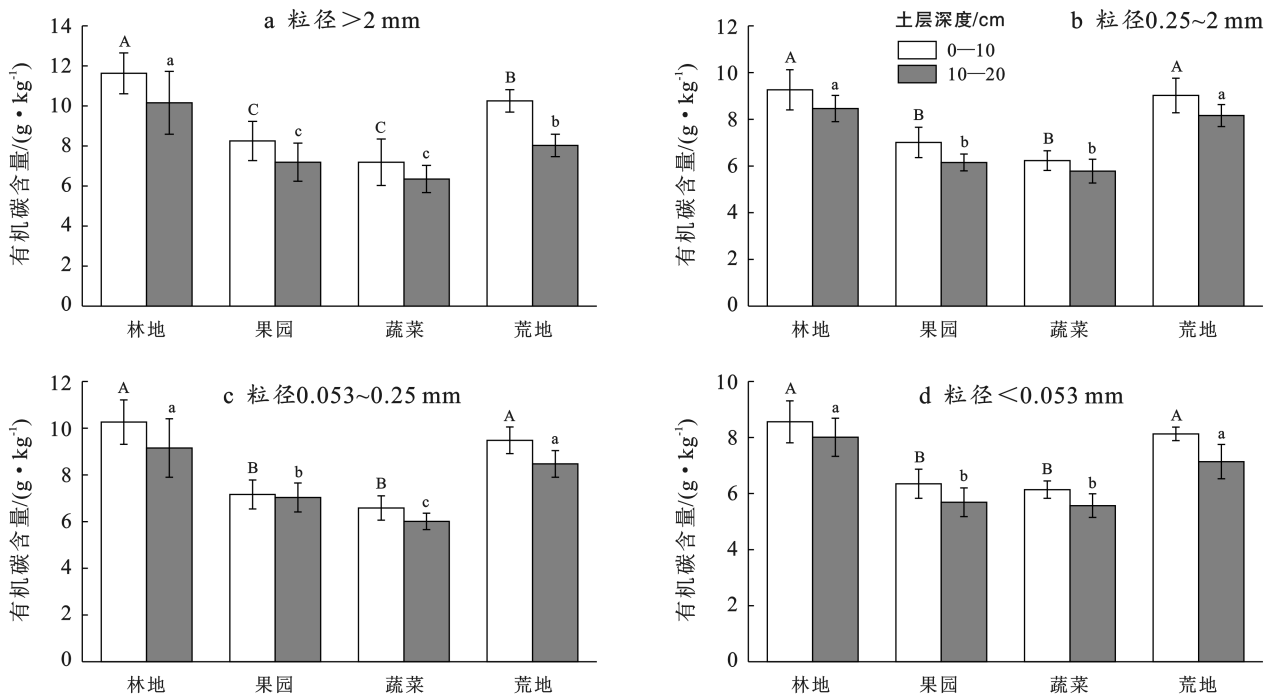


图 3 土地利用方式对土壤团聚体有机碳的影响

Fig.3 Effects of land-use patterns on soil aggregate organic carbon

2.4 土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳的影响

从图 4 可知,在不同的土壤使用模式下,各个颗粒直径的团聚物中生物量碳的分布情况。不同土地利用方式下土壤各粒径微生物量碳含量趋势一致,基

本表现为:大团聚体(>2 mm) $>$ 微团聚体(0.053~0.25 mm) $>$ 中间团聚体(0.25~2 mm) $>$ 粉黏粒(<0.053 mm)。由图还可知,随着土壤厚度的增大,不同颗粒直径的团聚物质中的生物量碳浓度呈下降

的态势,而不同土地利用方式之间仍存在一定的差异。对于大团聚体(>2 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于中间团聚体(0.25~2 mm),0—10 cm 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量碳含量大致表现为:林地

$>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒(<0.053 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量碳含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。

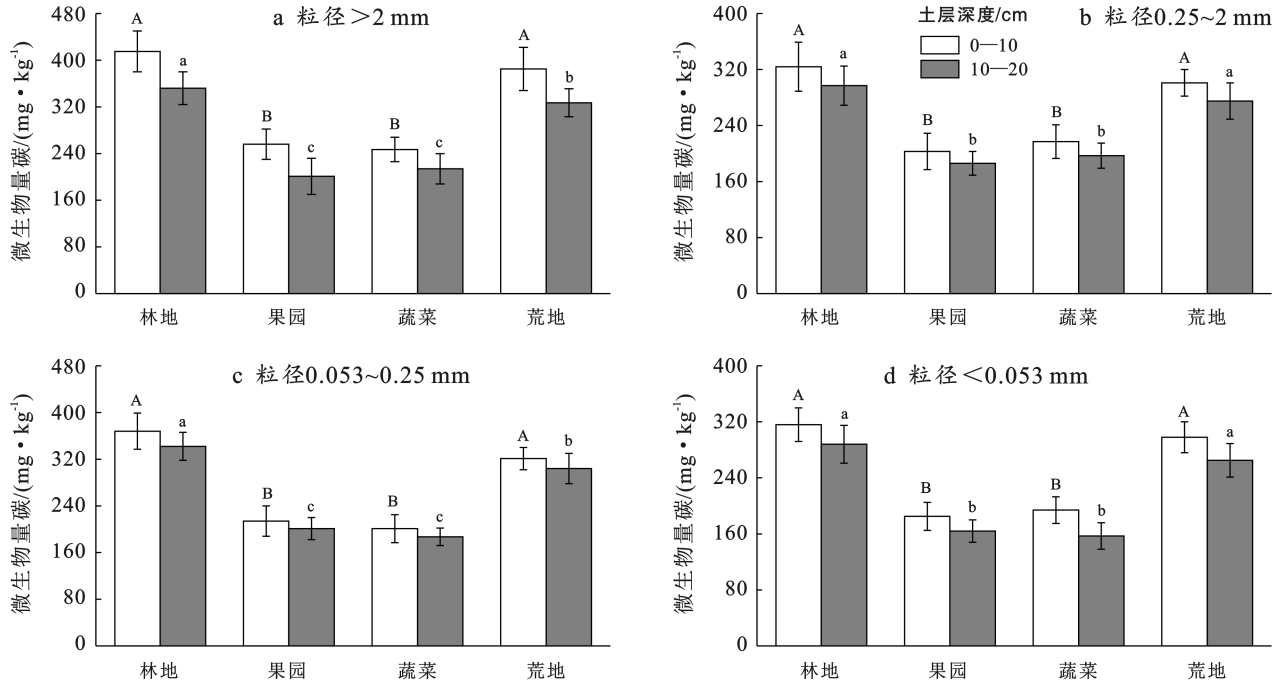


图 4 土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳的影响

Fig.4 Effects of land-use patterns on soil aggregate microbial biomass carbon

2.5 土地利用方式对土壤团聚体微生物量氮的影响

从图 5 可知,在不同的土地利用模式下,各个颗粒尺寸的微生物量氮含量在剖面上的分布是相同的,主要表现为:大团聚体(>2 mm) $>$ 微团聚体(0.053~0.25 mm) $>$ 中间团聚体(0.25~2 mm) $>$ 粉黏粒(0.053 mm)。从图 5 中可以看出,随着土壤深度的增大,各颗粒直径团聚体的生物量氮含量呈下降趋势。而不同土地利用方式之间仍存在一定的差异。对于大团聚体(>2 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量氮含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于中间团聚体(0.25~2 mm),0—10 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量氮含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);对于微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒(<0.053 mm),

0—10 和 10—20 cm 土壤团聚体微生物量氮含量大致表现为:林地 $>$ 荒地 $>$ 果园 $>$ 蔬菜地,其中林地和荒地显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。

2.6 土地利用方式对土壤团聚体 SMBC/SOC 的影响

由图 6 可知,不同土地利用方式下各粒径团聚体 SMBC/SOC 的剖面分布变化,不同土地利用方式下土壤各粒径 SMBC/SOC 趋势一致。随着土壤厚度的增大,各颗粒直径 SMBC/SOC 逐渐减小,而不同土地利用方式之间仍存在一定的差异。对于大团聚体(>2 mm),荒地显著高于林地、果园和蔬菜地($p<0.05$);蔬菜地土壤中间团聚体(0.25~2 mm)的 SMBC/SOC 显著高于林地、果园和荒地;不同土地利用方式下微团聚体(0.053~0.25 mm)的 SMBC/SOC 差异并不显著($p>0.05$);林地和荒地粉黏粒(<0.053 mm)的 SMBC/SOC 显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$)。

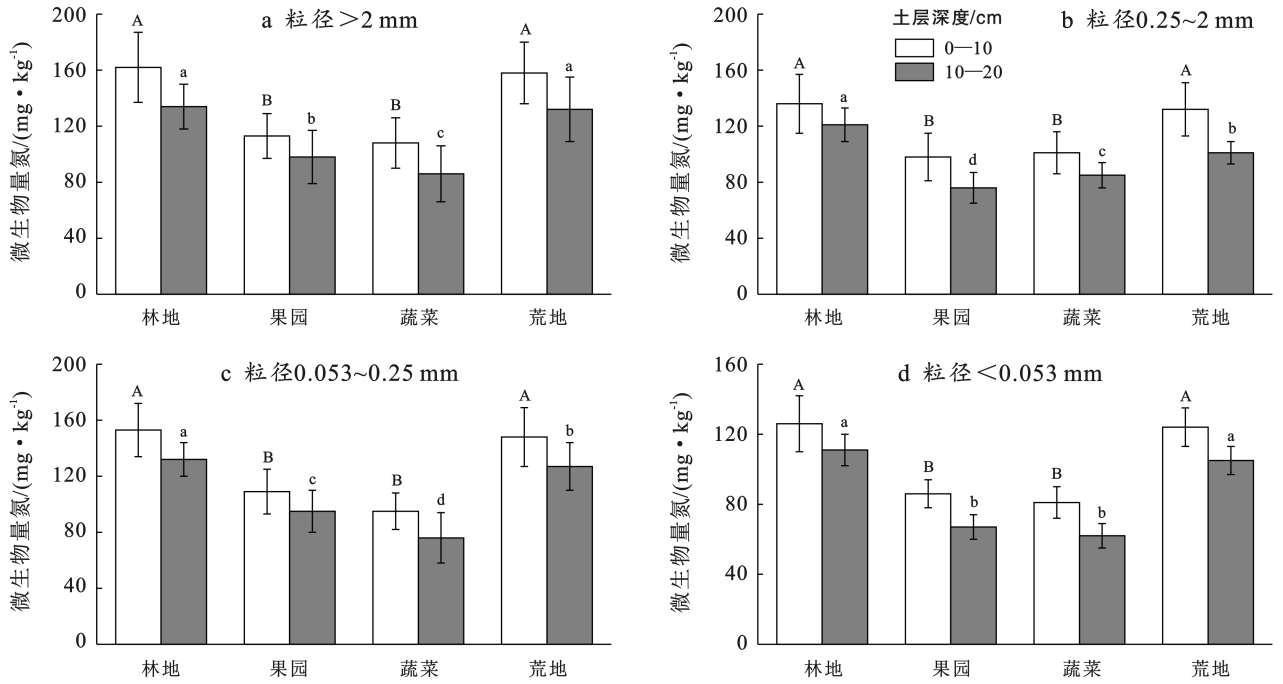


图5 土地利用方式对土壤团聚体微生物量氮的影响

Fig.5 Effects of land-use patterns on soil aggregate microbial biomass nitrogen

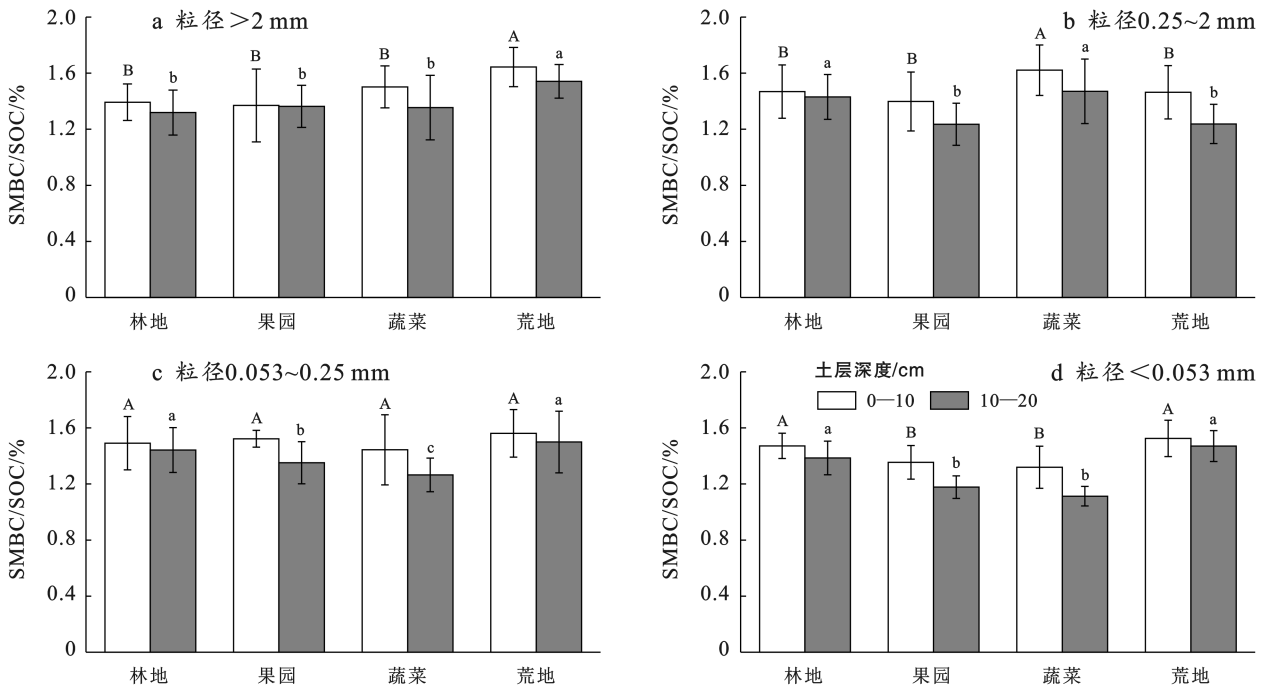


图6 土地利用方式对土壤团聚体 SMBC/SOC 的影响

Fig.6 Effects of land-use patterns on SMBC/SOC of soil aggregates

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤团聚体结构的影响

土壤团聚体是有机质的存在空间,有机质是团聚体的重要胶结物质。团聚体的几何平均粒径(GMD)和平均重量粒径(MWD)是反映土壤结构的主要稳定因素,随着 GMD 和 MWD 的增加,团块的聚集程度

和稳定程度也随之提高^[12-15]。本研究中,0—10 和 10—20 cm 土壤 GMD 和 MWD 大致表现为:林地>荒地>果园>蔬菜地,其中林地和荒地差异不显著($p>0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$);0—10 cm 和 10—20 cm 土壤 GMD 大致表现为:林地>荒地>果园>蔬菜地,其中林地和荒地差异不显著($p>0.05$),果园和蔬菜地差异不显著($p>0.05$)。

研究表明,与菜地相比,在田间,大颗粒的聚集体中,有机质的含量更高,而颗粒直径越小,则颗粒的增长越少^[24-25]。当有机物料被引入到土壤中时,会与粒度较小的微粒子进行胶合反应,从而使其聚集在一起,在其内部产生微小的聚集,并由大团块中的粗粒有机质的大量溶解或大团块的破裂而产生微小的聚集;随后,由于农作耕种等因素的干扰,从大团块中分离出微粒聚集体^[24-25]。与菜地相比,果园中的微粒聚集体更大,因为它们不会受到任何的影响,所以它们的数目会变得更小。在大团块中,在新的有机质的影响下,大团块具有较高的稳定性,而在有机碳的保护机理下,内部有机碳含量更低^[7-9]。这说明了不同的土地使用方法对土层的稳定作用不同。结果表明,在不同的用地模式下,土壤的稳定性随着土地深度的增加而减弱。果园与蔬菜地团聚体整体稳定性较低,而林地和荒地由于对团聚体稳定性的增强作用,能够提高土壤抗破坏能力。

不同土地利用方式下土壤各粒径有机碳含量趋势一致,基本表现为:大团聚体($>2\text{ mm}$) $>$ 微团聚体($0.053\sim 0.25\text{ mm}$) $>$ 中间团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$) $>$ 粉黏粒($<0.053\text{ mm}$),且 $0\text{--}10\text{ cm}$ 土层土壤各粒径有机碳含量均高于 $10\text{--}20\text{ cm}$ 土层。在团聚体的有机碳含量上,林地与荒地高于果园和蔬菜地,说明林地开垦为果园和蔬菜地后,土壤内部有机碳大量损失,抛荒可以提高土壤内部有机碳含量,有利于对土壤中的有机质的回收,与前人的研究结果一致^[7-9]。大团聚体作为微团聚体间或与外部粒子在有机质胶结作用下形成的物质,能够集聚有机碳,提高土壤内部有机碳含量^[26]。同时,大团聚体在内部有机质分解的作用下发生分离,形成众多微团聚体,从而使得微团聚体内部的有机碳含量降低^[12-14]。

3.2 土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

土地利用方式的不同会影响土壤内部有机质的分解过程,造成微生物活性的变化,进而引起数量的波动。由于凋落物、水、光、热等外在环境条件的变化对表层土壤微生物产生了影响,营养元素和细根的变化也是底层微生物数量改变的原因^[26-27]。即便在相同的土地利用方式下,微生物的碳和氮含量也会因为所处土层位置的不同而产生差异。在本研究中4种土地利用方式下,各粒径团聚体微生物量碳和氮的含量总体上均呈现为随土壤深度增加而降低的趋势,原因在于各土地利用方式下各类凋谢物停留在土壤表层,果园等地块中施加的肥料也是作用于表层,新的有机物质可以提高土壤表面的生物活力,而低层土壤中的有机物含量较低,且通透性差等原因,内部微生物

生长受到限制^[2]。

基于研究结果,不同土地利用方式会造成土地有机质的输入差异,使得土壤团聚体中的碳氮含量产生差别^[13]。受到各种林间落叶等凋落物作用,土壤有机质提升,以及丰富的水分含量,促进了土壤内部碳源的形成与保存,同时林地的隔绝性为各类微生物的生长提供了良好的生产环境,使得土壤中微生物量较高^[24-25]。林地改造为果园后,一方面由于改造后土地结构发生改变,尽管通过施加肥料的方式进行改善,但土壤环境的恶化降低了微生物的生存率;另一方面,由于作物收获等作物种植的季节变化因素,导致土壤内部大量碳流失,降低了土壤内的有机质含量^[28-29]。同时,由于蔬菜种植需要土地的不断翻耕,土壤通透性的增加导致了土壤内部有机质的分解,以及水分的流失,降低了表层土壤的硬度,这些因素都对微生物的生存带来了威胁。亚热带气候条件影响下,蔬菜基地和果园撂荒后的枯死植物,是土壤微生物有机质的重要来源,为微生物的生产提供了充足养分,土壤条件的改善也带动了微生物数量的提升^[17-19]。试验结果表明:粉黏团聚体与其它3种颗粒尺寸的团聚体有显著差异:林地耕作引起了大团聚体、中间团聚体和微团聚体内微生物量碳和氮含量下降,但却使粉黏团聚体内微生物量碳和氮含量升高^[17-19]。根据上述数据,林地转化为果园和蔬菜基地后,土壤内大团聚体和粉黏团聚体活性显著提高,提供了更多的有机质^[30];同时,有机碳的稳定性也在开垦过程中降低,使得有机碳无法有效积累。相反,荒地中间团聚体和微团聚体 SMBC/SOC 较高,结果显示,抛荒增加了聚合物碳的稳定性,有利于不同颗粒有机碳的积累,增加了其吸收的潜力^[30]。

作为衡量土壤质量的重要指标,SMBC/SOC 能够反映出微生物在应对土壤条件变化时的灵敏度。通过分析微生物碳分解转化能力,表明土壤微生物对有机碳的活性。SMBC/SOC 越大,对应更高的微生物活性,有机碳的分解能力越高,一般该值的范围在 $1\%\sim 5\%$ 之间^[17-19]。本研究基于4种土地利用方式及其对应的各团聚体 SMBC/SOC,不同粒径下的团聚体的数值大小与土壤深度呈现反比关系,差异显著。对于大团聚体($>2\text{ mm}$),荒地显著高于林地、果园和蔬菜地($p<0.05$);蔬菜地土壤中间团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$)的 SMBC/SOC 显著高于林地、果园和荒地;不同土地利用方式下微团聚体($0.053\sim 0.25\text{ mm}$)的 SMBC/SOC 差异并不显著($p>0.05$);林地和荒地粉黏粒($<0.053\text{ mm}$)的 SMBC/SOC 显著高于果园和蔬菜地($p<0.05$)。林地、荒地和果园中间团聚体

SMBC/SOC 均低于蔬菜地。这表明蔬菜地中间团聚体中土壤微生物活性比较强,有机碳的分解能力较强。这与蔬菜地农作耕作比较频繁,不断施用有机肥,提高了土壤质量等因素有关。

4 结论

(1) 不同土地利用方式下土壤各粒级的团聚体有机碳和微生物量碳、氮的分配规律相似,均表现为:中间团聚体>微团聚体>大团聚体>粉黏粒,且不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响主要在表层土壤。

(2) 不同土地利用方式下土壤各粒径有机碳含量、微生物量碳和氮变化趋势一致,基本表现为:大团聚体>微团聚体>中间团聚体>粉黏粒。

(3) 不同土地利用方式下土壤各粒径 SMBC/SOC 趋势一致,随着土壤厚度的增大,各颗粒直径 SMBC/SOC 逐渐减小,而不同土地利用方式之间仍存在一定的差异。

(4) 林地和荒地土壤团聚体有机碳、微生物量碳和氮均高于果园和蔬菜地,由此表明林地和荒地更有利于土壤有机碳的累积,林地与荒地土壤固碳潜力更大。

参考文献 (References)

- [1] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem [J]. *Geoderma*, 2016, 272:39-50.
- [2] Bottinelli N, Angers D A, Hallaire V, et al. Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170:14-17.
- [3] Lu Jia, Zheng Fenli, Li Guifang, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the mollisol region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 161:79-85.
- [4] Kay B D. Soil structure and organic carbon: A review [M]//*Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton: CRC Press, 2018:169-197.
- [5] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils [J]. *Geoderma*, 2015, 243:205-213.
- [6] Keiluweit M, Nico P S, Kleber M, et al. Are oxygen limitations under recognized regulators of organic carbon turnover in upland soils? [J]. *Biogeochemistry*, 2016, 127(2):157-171.
- [7] Qiu Liping, Wei Xiaorong, Gao Jianlun, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon along an afforestation chronosequence [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2):237-251.
- [8] Luna L, Miralles I, Andrenelli M C, et al. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region [J]. *Catena*, 2016, 143:256-264.
- [9] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532:635-644.
- [10] Hartley W, Riby P, Waterson J. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 181:770-778.
- [11] Huang Xiaolei, Jiang Hong, Li Yong, et al. The role of poorly crystalline iron oxides in the stability of soil aggregate-associated organic carbon in a rice-wheat cropping system [J]. *Geoderma*, 2016, 279:1-10.
- [12] Aye Nangseng, Sale P W G, Tang Caixian. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5):697-709.
- [13] Zhu Feng, Li Yubing, Xue Shengguo, et al. Effects of iron-aluminium oxides and organic carbon on aggregate stability of bauxite residues [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(9):9073-9081.
- [14] Xiao Shuangshuang, Zhang Wei, Ye Yingying, et al. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:41402.
- [15] SSoinne H, Hyväluoma J, Ketoja E, et al. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158:1-9.
- [16] Yilmaz E, Sönmez M. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168:118-124.
- [17] Gelaw A M, Singh B R, Lal R. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(7):690-700.
- [18] Zheng Weishuang, Morris E K, Lehmann A, et al.

- Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2016, 283:39-47.
- [19] Nath A J, Lal R. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the North Appalachian Region, USA [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1):172-176.
- [20] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, et al. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:371-380.
- [21] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Journal of the America Society of Agronomy*, 1936, 28(5):337-351.
- [22] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2):63-66.
Lin Qimei, Wu Yuguang, Liu Huanlong. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2):63-66.
- [23] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4):1035-1041.
Liu Enke, Zhao Binqiang, Mei Xurong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035-1041.
- [24] Li Shuangyi, Gu Xin, Zhuang Jie, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:199-206.
- [25] Nie Xiaodong, Li Zhongwu, Huang Jinqian, et al. Thermal stability of organic carbon in soil aggregates as affected by soil erosion and deposition [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175:82-90.
- [26] Ghosh A, Bhattacharyya R, Meena M C, et al. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an inceptisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177:134-144.
- [27] Gao Lili, Becker E, Liang Guopeng, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon [J]. *Geoderma*, 2017, 288:97-104.
- [28] Garcia-Franco N, Albaladejo J, Almagro M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153:66-75.
- [29] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Román J R, et al. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall [J]. *Catena*, 2017, 148:117-125.
- [30] Benbi D K, Brar K, Toor A S, et al. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in Northern India [J]. *Geoderma*, 2015, 237:149-158.

(上接第 307 页)

- [33] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 等. 青藏高原草地降水利用效率时空动态及对气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5):226-234.
Tong Linjing, Liu Yangyang, Wang Qian, et al. Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its relationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5):226-234.
- [34] 张雨惠, 萨楚拉, 孟凡浩, 等. 蒙古高原植被返青期对气候、积雪、土壤水变化的响应特征研究[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(6):1338-1349.
Zhang Yuhui, Sa Chula, Meng Fanhao, et al. Response characteristics of vegetation reforestation period to climate, snow cover and soil water in Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, 38(6):1338-1349.
- [35] Shen Xiangjin, Jiang Ming, Lu Xianguo, et al. Aboveground biomass and its spatial distribution pattern of herbaceous marsh vegetation in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7):1115-1125.
- [36] Tian Jie, Xiong Junnan, Zhang Yichi, et al. Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on grassland NPP in Altay Prefecture [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6):743-756.