

# 黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体组成 及其碳、氮分布特征

黄天颖<sup>1</sup>, 高唤唤<sup>1</sup>, 康宏樟<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240; 2. 国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240)

**摘要:** 作为土壤结构的基本单元, 土壤团聚体是反映土壤肥力的一项重要指标。不同土层各粒级团聚体在营养元素的保存、传递和转化等方面发挥着不同的作用。试验选取了上海城市森林生态系统定位观测研究站黄浦江上游水源涵养林观测点的四块典型阔叶混交林, 研究其不同土层土壤团聚体组成及其有机碳和全氮的分布特征, 进一步探究不同土层各粒级团聚体对土壤的养分贡献率。结果表明: (1) 土壤团聚体含量随其粒径的减小而增加,  $<53 \mu\text{m}$  粒径土壤团聚体在分布中占主导地位, 同时大团聚体含量与土层深度呈负相关; (2) 有机碳含量随团聚体粒径的减小而减少, 随土层深度的增加而降低; (3) 土壤团聚体全氮含量变化规律与有机碳趋于一致, 但大团聚体的碳氮比均显著高于微团聚体; (4) 粒径  $<250 \mu\text{m}$  的微团聚体对土壤的有机碳和全氮贡献率高达 85% 以上。研究结果在一定程度上揭示了黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体的组成及其碳、氮元素分布特征, 为衡量和改善区域土壤质量提供了理论依据。

**关键词:** 水源涵养林; 土壤团聚体; 组成; 有机碳; 全氮; 养分贡献率

中图分类号: S 152

文献标识码: A

## Composition of Soil Aggregate and Distribution Characteristics of Its Organic Carbon and Total Nitrogen in Water Conservation Forest Located in the Upper Reaches of the Huangpu River

HUANG Tian-ying<sup>1</sup>, GAO Huan-huan<sup>1</sup>, KANG Hong-zhang<sup>1,2</sup>

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Urban Forest Research Station of State Forestry Administration of China, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As the basic unit of soil structure, soil aggregate is an important indicator of soil fertility. In different soil layers, different particle fractions of aggregates play different roles in the preservation, transport and transformation of nutrients. Four typical broad-leaved mixed forests in the water conservation forest located in upper reaches of the Huangpu River were selected as experimental plots. The study focused on soil aggregate composition and distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen, and further explored the nutrient contribution rate of soil aggregates. The main conclusions are as follows. (1)  $<53 \mu\text{m}$  particles constitute the largest proportion in soil aggregates and the content of large

收稿日期: 2016-10-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600206); 国家自然科学基金(31270491); 上海交通大学“Agri-X”基金(Agri-X2015004)

作者简介: 黄天颖(1992-), 女, 硕士, 研究方向: 森林生态系统的 C、N 动态;

康宏樟(1979-)为本文通讯作者, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向: 森林生态系统的 C、N 动态, E-mail: kanghz@sjtu.edu.cn

aggregate decreases with soil depth. (2) Organic carbon content correlates positively with aggregate size but negatively with soil depth. (3) Total nitrogen content has similar distribution characteristics in soil aggregates compared to organic carbon, and the C/N ratios of large aggregates are significantly higher than those of microaggregates. (4) Over 85% of organic carbon and total nitrogen distributes in microaggregates (<250  $\mu\text{m}$ ). Our results revealed the composition of soil aggregates and the distribution characteristics of its organic carbon and total nitrogen in the study area, and provided theoretical basis for measuring and improving the local soil quality.

**Key words:** water conservation forest; soil aggregate; composition; organic carbon; total nitrogen; nutrient contribution rate

土壤团聚体是土壤结构的基本组成单元,影响着土壤的理化性质和生物特性,其数量在一定程度上反映了土壤供储养分的能力,其组成比例亦可作为衡量土壤肥力水平的综合指标。土壤有机碳和氮素是森林生态系统碳氮循环的重要媒介,是土壤养分的重要组分和植物的“营养源”,通常作为评价土壤质量的重要指标<sup>[1]</sup>。土壤团聚体与土壤有机碳关系密切,团聚体的形成影响着有机碳的分解,反之,土壤有机碳对团聚体的数量和分布也具重要影响,其含量与土壤结构的形成与稳定息息相关<sup>[2-4]</sup>。氮素是植物生长需求量最大的营养元素,土壤碳氮比(C/N)是土壤质量的敏感指标,直接影响土壤中的碳氮循环<sup>[5-6]</sup>。因此,开展土壤团聚体组成及其碳、氮元素分布特征的研究有助于土壤养分管理,对森林生态系统碳氮循环和生产力稳定亦具重大意义。

国内外学者对于土壤碳、氮元素与土壤团聚体形成和稳定性之间的关系作了大量的研究,均认为土壤碳、氮元素是土壤水稳性团聚体形成的重要机制和物质基础,且有机碳水平的提高能促进土壤结构的形成并增强其稳定性<sup>[7-8]</sup>。同时,研究表明,不同粒级团聚体的有机碳含量存在明显差异,一部分认为团聚体有机碳含量随粒级的增加而降低<sup>[9-10]</sup>,另一部分研究则提出了与之相悖的观点,指出大部分土壤有机碳储存在大粒径团聚体中,<0.25 mm粒级团聚体有机碳含量相对较低<sup>[11-12]</sup>。另外,大量学者的研究也表明,不同土层的土壤团聚体组成及养分含量存在明显差异<sup>[9,11,13]</sup>。

上海地处长三角都市圈中心,是著名国际化大都市,人口密度高,环境压力大,对发展城市森林改善环境具有强烈的需求。上海城市森林发展过程是我国城市化与城市森林耦合发展的典型代表。上世纪90年代初,上海森林覆盖率仅有5%。随着浦东开发,开展了大量重大林业工程项目的建设,迅速提

高了森林覆盖率(2014年已达到14%)。但是,相对于其他城市而言,森林的覆盖率还是相当低。因此,加强上海城市森林生态系统结构和功能特征研究,提升生态效益已成为巨大的社会需求。本文选取上海黄浦江上游水源涵养林不同土层的土壤作为研究对象,通过分析土壤各粒级团聚体含量和有机碳、全氮在各粒级团聚体中的含量,来探讨黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体的组成及其碳、氮元素分布特征,揭示其分布规律,为进一步探究城市森林生态系统的碳氮循环过程及如何提升其生态服务功能奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区设在上海城市森林生态系统定位观测研究站黄浦江上游水源涵养林观测点,该站点位于上海市松江区,属亚热带季风性气候,四季分明,日照充分,雨量充沛。年平均气温约为16 $^{\circ}\text{C}$ ,最高气温39.9 $^{\circ}\text{C}$ ,最低气温-10.1 $^{\circ}\text{C}$ 。多年平均降水量1103 mm,全年60%以上的雨量集中在5月至9月的汛期。上海地形的单一导致了植被类型的简单化,自然植被残存较少,地带性植被为常绿、落叶阔叶混交林。土壤除少量为山丘风化形成的残积型黄棕壤外,其他地方皆由沼泽潜育土、草甸土和盐渍甸土所构成。

试验样地选择的是于2000年造林的黄浦江上游水源涵养林(图1),在其中选择4片30 m $\times$ 30 m的地势平坦、林相整齐、长势良好、有代表性的阔叶混交林,作为4个重复。主要乔灌木树种有香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)、无患子(*Sapindus mukorossi* Gaertn.)、黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata* Franchet)、枫香

(*Liquidambar formosana* Hance)、三角枫 (*Acer buergerianum* Miq.)、蚊母 (*Distylium racemosum* Sieb. et Zucc.)、海桐 (*Pittosporum tobira*) 等。样地林分基本特征和土壤基本理化性质如表 1、2 所示,4 块样地的优势树种均为香樟,林分郁闭度和密度均较高,样地土壤均为酸性,且含水量较高。

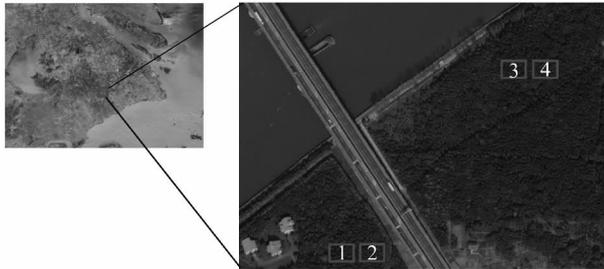


图 1 试验样地区位

Fig. 1 Location of the sample plot

表 1 样地林分基本特征

Tab. 1 The basic characteristics of stands

样地编号 Sample	平均胸径 /cm DBH	平均树高 /m Height	郁闭度/% Canopy density	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> ) Density
1	13.7	13.6	84.6	1256
2	14.3	13.2	88.4	1367
3	13.3	12.5	85.7	1300
4	14.1	13.2	87.8	1333

### 1.2 土壤样品采集

采用五点取样法,每一样地内按“S”形设置 5 个采样点,去除地表杂物,用取土钻分别取 0~10、10~20、20~30 cm 土层,将样地内同一土层样品充分混合后密封保存,带至实验室进行分析。采集到的土壤样品经风干处理后,通过研磨,使所有颗粒通过孔径 2 mm 筛。

表 2 样地表层土壤基本理化性质

Tab. 2 The basic physical and chemical properties of soil

样地编号 Sample	pH	含水量/% Water content	碳含量/% Carbon concentration	氮含量/% Nitrogen concentration	土壤质地 Soil texture		
					砂粒/% Sand	粉粒/% Silt	粘粒/% Clay
1	5.65	28.93	2.39	0.23	11.93	70.89	17.18
2	5.41	27.56	2.22	0.21	10.94	67.44	21.62
3	5.34	25.33	2.29	0.24	7.44	64.99	27.56
4	5.25	27.17	2.41	0.24	7.85	62.06	30.09

### 1.3 土壤团聚体分类及元素含量测定

采用湿筛法,对已过 2 mm 筛的风干土样进行团聚体分类。具体步骤如下:

- (1) 均匀取 30 g 土样于白色塑料杯,加蒸馏水 500 mL 搅拌均匀,捞出上层漂浮物至烧杯 1 中;
- (2) 以 2 min 50 次的震荡频率过 250 μm 筛,用白色塑料盆接过筛的土壤溶液,将未过筛的 > 250 μm 的土壤团聚体润洗至烧杯 2 中;
- (3) 将白色塑料盆中的土壤溶液再过 53 μm 筛,将未过筛的 53~250 μm 的土壤团聚体润洗至烧杯 3 中;
- (4) 将白色塑料盆中剩余的 < 53 μm 的土壤团聚体倒至大量筒中,静置 48 h;
- (5) 倒出上清液,将剩余土样倒至烧杯 4 中;
- (6) 将烧杯 1、2、3、4 置于 65 °C 烘箱中 72 h,以烘干土样至恒重,而后称重,记录数据;
- (7) 把所有样品转移至小样品瓶中待测。

元素含量测定利用元素分析同位素质谱联用仪

(Vario EL III/Isoprime),用锡舟包样,0~10 cm 土层包样量为 60 mg,10~20、20~30 cm 土层包样量为 100 mg。

### 1.4 数据分析

各粒级团聚体质量所占的百分含量用式(1)进行计算:

$$\text{各粒级团聚体质量百分含量} = \frac{\text{各粒级团聚体质量}}{\text{土壤团聚体总质量}} \times 100\% \quad (1)$$

各粒级团聚体中养分对土壤养分总储量的贡献率用式(2)进行计算:

$$\text{团聚体的养分贡献率} = \frac{\text{该粒级团聚体中养分含量} \times \text{该粒级团聚体含量}}{\text{土壤养分总含量}} \times 100\% \quad (2)$$

所有测定结果用 Microsoft Excel 2010 进行整理和初步分析,用 SPSS17.0 进行方差分析,多重比较分析采用 LSD 检验(最小显著性差异法)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体的组成

整体上,团聚体含量均随其粒径的减小而升高,在各土层中变化趋势一致(图2)。其中, $<53\ \mu\text{m}$  粒径土壤团聚体在各土层的团聚体分布中均占主导地位,其百分含量最高值达77.42%,与其余粒级团聚体含量存在显著差异。 $53\sim 250\ \mu\text{m}$  粒径团聚体含量也处于较大优势地位,最高值为30.75%,与其余粒径差异显著。

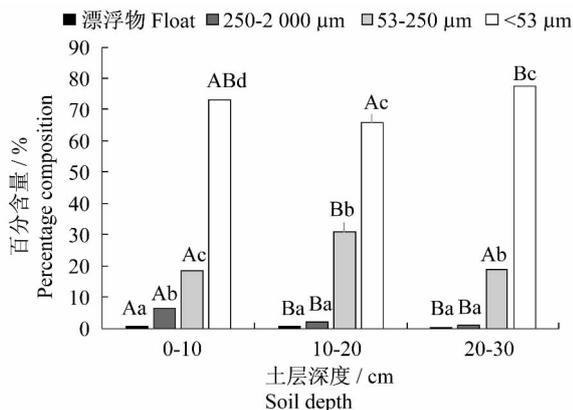


图2 土壤团聚体的组成

不同小写字母表示同一土层不同粒级土壤团聚体差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示不同土层同一粒级团聚体差异显著( $P<0.05$ ),下同

Fig. 2 Composition of soil aggregate

Different lower-case letters indicate significant differences in soil aggregates of different particle sizes at the same soil layer ( $P<0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences in soil aggregates of the same particle sizes at different soil layers ( $P<0.05$ ). The same as below

不同土层间,各粒级团聚体含量各异。其中,0~10 cm土层的土壤漂浮物和250~2000  $\mu\text{m}$  土壤团聚体含量均显著高于10~20和20~30 cm,而10~20和20~30 cm间差异不显著。10~20 cm土层53~250  $\mu\text{m}$  土壤团聚体含量显著高于0~10和20~30 cm土层,而 $<53\ \mu\text{m}$  团聚体含量较其余2个土层相对较低。

团聚体的数量和分布方式决定着土壤的结构稳定性和水力性质,影响着土壤生物活动,在一定程度上反映了土壤的营养供储、通透性、持水性等能力。各粒级团聚体在土壤营养成分的保存和释放等方面发挥着不同的作用,小粒级团聚体的作用主要是保持土壤肥力,而大粒级主要调节营养的供应<sup>[14]</sup>。而且,团聚体组成受到不同土地利用方式的影响。在本研

究中,黄浦江上游水源涵养林的土壤中 $<53\ \mu\text{m}$  团聚体含量占据极为显著的优势,而其余粒径团聚体含量偏低,究其原因,可能为这片人工水源涵养林是十几年前由农田退耕还林转变而来。大量学者对不同土地利用方式下土壤团聚体的组成进行了研究,研究表明天然林地和草地有利于大粒径土壤团聚体的形成,而农田和果园形成的团聚体粒径较小,人为耕作使土壤中的大团聚体含量显著减少。刘梦云等<sup>[15]</sup>对5种土地的土壤团粒结构进行分析,得出土壤中大团聚体含量总体上呈现“天然草地>灌木林地>果园>农地>人工草地”的规律,天然草地250~2000  $\mu\text{m}$  团聚体约占16.1%,而农地仅占10.2%。王国强等<sup>[16]</sup>学者的研究表明,天然林地有利于形成大粒径土壤团聚体, $>0.25\ \text{mm}$  的水稳性土壤团聚体总量远远高于农业用地,在38.7%~80.5%之间变化,而柑橘园、茶园、坡耕地土壤中小粒径团聚体所占比例较高。Yamashita等<sup>[17]</sup>发现耕作和种植作物使 $>1000\ \mu\text{m}$  团聚体含量减少,顺序为草地>森林>耕地,而53~250和250~1000  $\mu\text{m}$  的顺序反之。农田土壤经反复耕作而形成大量的小粒径团聚体,微团聚体比例增加,土壤内部更为紧实致密,孔隙度减小。因此,推测黄浦江上游水源涵养林小粒径团聚体占主导地位的原因在于其是由农田转变而来。

### 2.2 土壤团聚体的碳、氮元素分布

#### 2.2.1 土壤团聚体的有机碳含量

由图3可知,在0~10、10~20、20~30 cm土层中,有机碳含量均随着团聚体粒径的减小而减少,且各土层变化趋势一致,说明该研究区中大团聚体中有机碳的含量高于小团聚体。其中,各粒级团聚体的有机碳含量的差异性在0~10、10~20 cm土层中体现得尤为显著,均说明团聚体粒径大小和其有机碳含量密切相关。

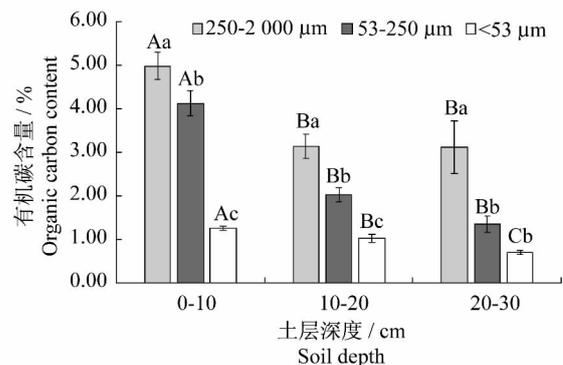


图3 土壤团聚体的有机碳含量

Fig. 3 Organic carbon content of soil aggregate

同时,随着土层的加深,土壤有机碳含量逐渐降低,且各粒径团聚体的变化趋势一致。由此说明,表层土壤团聚体的有机碳含量高于深层土壤。在250~2 000  $\mu\text{m}$  团聚体中,各土层的有机碳含量分别为4.99%、3.14%、3.11%,0~10 cm 土层有机碳含量显著高于其余两个土层;在53~250  $\mu\text{m}$  的团聚体中,各土层的有机碳含量分别为4.13%、2.02%、1.34%,各土层差异也较为明显;在<53  $\mu\text{m}$  团聚体中,有机碳含量分别为1.25%、1.02%、0.69%,差异性显著。总体而言,团聚体有机碳含量与土层深度密切相关,且随深度加深而减少,其原因在于植物的枯枝落叶主要聚集在表层土壤中进行养分转化和积累。

综上所述,可知不同土层不同粒径土壤团聚体中有机碳含量差异显著,且存在一定规律。大量学者的研究也证实了这一结论。Puget<sup>[18]</sup>的研究表明表层土壤的大团聚体中富集更多的碳、氮;Jastrow等<sup>[19]</sup>利用<sup>13</sup>C示踪证实大团聚体有机碳含量高于微团聚体;Six等<sup>[20]</sup>的研究认为大团聚体是通过有机物胶结作用由较小粒级团聚体形成,因此有机碳含量随团聚体粒径的增大而增加。而Christensen<sup>[21]</sup>则发现有机碳和全氮主要分布在小粒径微团聚体中,有机质含量随粘粒和粉砂含量的增加而增加;李恋卿<sup>[22]</sup>的研究发现<0.002 mm 和>2 mm 的团聚体中有机碳的含量都较高,有机碳在团聚体中呈V型分布。关于有机碳含量高低与团聚体粒径大小的相关性呈正还是负这一问题,各研究得出的结论不尽相同。这可能与土壤自身性质有关,不同类型土壤形成团聚体所利用的胶结物质种类和数量差别较大。

### 2.2.2 土壤团聚体的全氮含量

土壤团聚体的全氮含量随土层深度和团聚体粒级的变化规律与有机碳含量较为一致(图4)。在同一土层中,团聚体氮含量均随着粒径的减小而降低。在0~10 cm 表层土壤中,各粒级团聚体的全氮含量分别为0.41%、0.39%、0.15%,250~2000和53~250  $\mu\text{m}$  团聚体的全氮含量相近,而与<53  $\mu\text{m}$  团聚体差异较大。在10~20 cm 的土层中,各粒级团聚体的全氮含量分别为0.28%、0.23%、0.13%,差异较显著。20~30 cm 土层中各粒级团聚体的全氮含量差异也较为显著。

同时,同一粒径团聚体的全氮含量在不同土层中存在明显差异,且随土层的加深而降低,说明表层土壤团聚体的全氮含量高于较深土层。

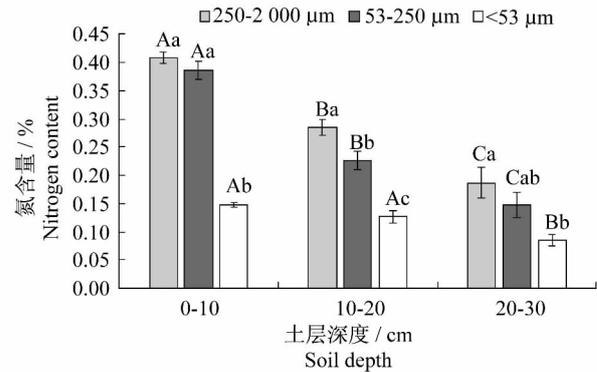


图4 土壤团聚体的全氮含量

Fig. 4 Total nitrogen content of soil aggregate

综上,分析其原因,可能与土壤团聚体的有机碳含量相关,因为在凋落物的分解和土壤有机质的形成过程中,微生物分解有机物所需的碳、氮含量是成一定比例的。因此,作为微生物的产物,土壤团聚体氮含量变化趋势基本与有机碳含量的变化趋势一致。

### 2.2.3 土壤团聚体的碳氮比

土壤碳氮比能有效衡量土壤碳、氮的营养平衡状况,其演变趋势对土壤碳氮循环具有重要意义。如图5所示,在各土层中,粒径为250~2 000  $\mu\text{m}$  的大团聚体的碳氮比均高于粒径<250  $\mu\text{m}$  的微团聚体,且差异显著。分析其原因,可能为新鲜的有机物质和半分解有机物大部分存在于大团聚体中。

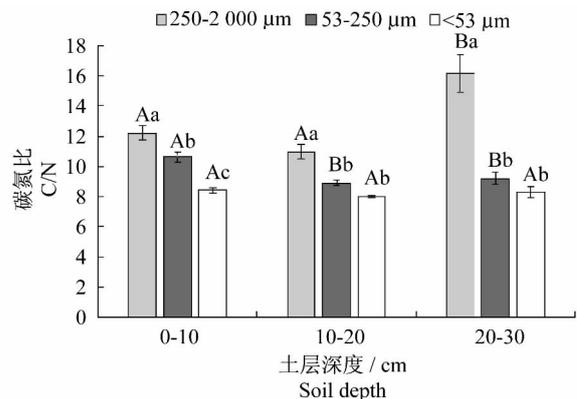


图5 土壤团聚体的碳氮比

Fig. 5 Carbon-nitrogen ratio of soil aggregate

许多学者的研究也得出了相同的结论,刘中良等<sup>[5]</sup>通过比较不同粒级土壤团聚体的C/N发现,经过不同施肥处理的样地均表现出随粒级增大C/N升高的趋势,章明奎<sup>[7]</sup>等学者的研究结果也证实了这一点。

### 2.3 土壤团聚体的养分贡献率

将各粒级土壤团聚体的含量和团聚体中的养分

含量相结合,进行综合考虑,能更为直观详尽地反映各粒级团聚体对土壤的养分贡献率。经计算,各土层各粒级团聚体中养分对该土层土壤养分的贡献率如图 6、7 所示。

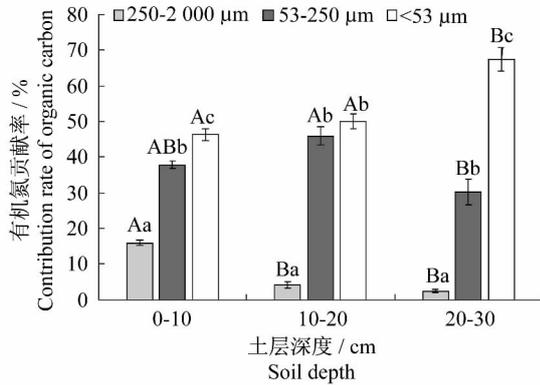


图 6 土壤团聚体的有机碳贡献率

Fig. 6 Contribution rate of organic carbon in soil aggregates

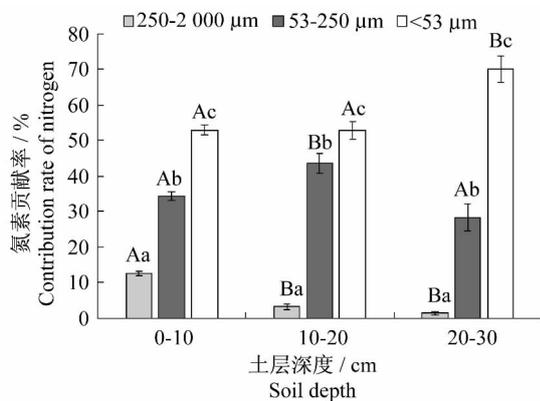


图 7 土壤团聚体的氮素贡献率

Fig. 7 Contribution rate of total nitrogen in soil aggregates

由图 6 可知,在各土层中,53~250  $\mu\text{m}$  和 <53  $\mu\text{m}$  粒级团聚体对土壤的有机碳贡献率均较大,其最高值分别达 45.89% 和 67.38%,而 250~2000  $\mu\text{m}$  粒级团聚体的有机碳贡献率显著小于其他粒级,这与团聚体的组成分布特征相似。虽然 <53  $\mu\text{m}$  粒级团聚体的有机碳含量较低,但其贡献率却远大于其他粒级,这是由于研究区内该粒级土壤团聚体含量占据绝对优势。

对于 250~2000  $\mu\text{m}$  粒径的大团聚体,其对各土层有机碳的贡献率分别为 15.95%、4.15%、2.46%,随土层的深度的增加而降低。分析其原因,在于大团聚体百分含量及其有机碳含量都与土层深度呈负相关。

如图 7,土壤团聚体的氮素贡献率和有机碳贡献率的变化趋势一致,与团聚体的组成分布特征相

似,亦是由于小粒级团聚体含量所占的绝对优势所致。

### 3 结论

本文通过对上海黄浦江上游水源涵养林中四块典型阔叶混交林土壤进行研究,发现不同土层土壤团聚体的组成及其有机碳、全氮含量和养分贡献率均存在一定的规律和分布特征。主要研究结果如下:

(1)黄浦江上游水源涵养林各土层土壤团聚体的含量均随其粒径的减小而升高,<53  $\mu\text{m}$  土壤团聚体在分布中占主导地位,说明研究区土壤以小粒径团聚体为主。同时,不同土层各粒级团聚体含量各异,大团聚体含量随土层加深而减小。

(2)土壤大团聚体中有机碳含量高于较小团聚体,表层土壤团聚体有机碳含量显著高于深层土壤,说明土壤团聚体有机碳含量与团聚体粒径和土层深度均密切相关。

(3)土壤团聚体全氮含量的变化规律与有机碳含量趋于一致,原因可能在于土壤碳、氮变化通常相辅相成,团聚体氮元素含量随有机碳含量的变化而变化。同时,大团聚体的碳氮比均显著高于微团聚体,其原因可能为有机质大部分存在于大团聚体中。

(4)黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体对有机碳和全氮的贡献率约有 85%~95% 来自粒径 <250  $\mu\text{m}$  的微团聚体,原因在于该研究区内该粒级土壤团聚体含量占据绝对优势。

团聚体的形成和稳定对于土壤结构具有重要作用,其不仅影响土壤的物理特性(如孔隙度、水分、温度等),而且影响有机质的微生物分解速率以及植物养分的利用率等<sup>[23]</sup>。上海黄浦江上游水源涵养林土壤中大团聚体含量偏低,土壤透水性较差,不利于植物生长,需采取一定措施改善土质,例如增加凋落物覆盖量、改变植物配置模式等。另外,在此研究结果的基础上,后续可继续探究土壤团聚体形成和稳定性对不同植被类型和造林时间等因素的响应机制。

#### 参考文献:

- [1] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.

- [2] 张志丹,杨学明,李春丽,等. 土壤有机碳固定研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(21):8-12.
- [3] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [4] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(1):159-165.
- [5] 刘中良,宇万太,周桦,等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤,2011,43(5):720-728.
- [6] 任书杰,曹明奎,陶波,等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展,2006,25(4):58-67.
- [7] 章明奎,郑顺安,王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(8):1703-1711.
- [8] 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.
- [9] 张耀方. 子午岭林区不同胶结物质类型的土壤团聚体结构特征[D]. 杨陵:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [10] Deneff K, Zotarelli L, Boddey R M, *et al.* Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(5):1165-1172.
- [11] 卢凌霄,宋同清,彭晚霞,等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报,2012,23(5):1167-1174.
- [12] 肖复明,范少辉,汪思龙,等. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):131-134.
- [13] 武小钢,郭晋平,杨秀云,等. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[J]. 生态学报,2011,31(11):3009-3019.
- [14] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报,2001,38(1):49-53.
- [15] 刘梦云,常庆瑞,安韶山,等. 土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(11):247-250.
- [16] 王国强,毛艳玲. 土地利用方式对土壤团聚体组成及质量的影响[J]. 林业科技开发,2008,22(6):60-63.
- [17] Yamashita T, Flessa H, John B, *et al.* Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: Effect of land use [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(11):3222-3234.
- [18] Puget P, Angers D A, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(1):55-63.
- [19] Jastrow J D, Miller R M, Boutton T W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3):801-807.
- [20] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):681-689.
- [21] Christensen B T. Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregates and particle size separates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):125-135.
- [22] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报,2000,31(5):193-195.
- [23] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 1. Theory and methodology [J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1):11-21.