

DOI: 10.5846/stxb202005081153

韩贞贵,周运超,任娇娇,白云星.马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配.生态学报,2021,41(23):9388-9398.

Han Z G, Zhou Y C, Ren J J, Bai Y X. Distribution of organic carbon after wet sieving of soil aggregates of various particle sizes in *Masson Pine* plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(23): 9388-9398.

马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配

韩贞贵^{1,2,3}, 周运超^{1,2,3,*}, 任娇娇^{1,2,3}, 白云星^{1,2,3}

1 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025

2 贵州省高原山地林木培育重点实验室, 贵阳 550025

3 贵州大学林学院, 贵阳 550025

摘要:选取 25a、45a 和 65a 马尾松人工林为研究对象,采用湿筛法对各粒径土壤团聚体分别湿筛。探究了马尾松人工林各粒径团聚体湿筛后的团聚体有机碳分配,以探讨各粒径团聚体湿筛后分配到同一粒级团聚体有机碳含量及其对团聚体水稳性的贡献差异。结果表明:种植年限增加显著降低土壤团聚体水稳性($P<0.05$);各粒径团聚体湿筛后分配的有机碳随粒级减小含量呈先降后增趋势,以保持原粒级团聚体有机碳(12.96—32.01 g/kg)含量最高,其次是<0.25 mm 粒级(8.08—23.53 g/kg)。各粒径团聚体湿筛分配到同一粒级的有机碳以保持原粒级的含量最高($P<0.05$);土壤团聚体水稳性与各粒径团聚体湿筛后保持原粒径的有机碳呈显著或极显著正相关($P<0.05$ 或 0.01),分配到越小的粒级正相关性越不显著。此外,团聚体水稳性与各粒径团聚体湿筛分配到同一粒级的有机碳呈正相关,以保持原粒级相关性最高($P<0.01$ 或 0.05);回归方程及相关性系数表明,有机碳与保持原粒径团聚体呈显著或极显著正相关($P<0.05$ 或 0.01),与消散到其他粒级的团聚体呈负相关或极显著负相关($P>0.05$ 或 <0.01)。本研究得出有机碳含量增加促进更大粒径团聚体形成。反之,促使大粒径团聚体向较小粒径团聚体转化。同一粒级团聚体间,保持原粒级团聚体比易转化形成更大粒径团聚体有更高的有机碳含量和更强的水稳性,这对团聚体的固碳提供了新的认识。

关键词:马尾松人工林;团聚体水稳性;湿筛;有机碳分配;团聚体形成

Distribution of organic carbon after wet sieving of soil aggregates of various particle sizes in *Masson Pine* plantation

HAN Zhengui^{1,2,3}, ZHOU Yunchao^{1,2,3,*}, REN Jiaojiao^{1,2,3}, BAI Yunxing^{1,2,3}

1 Institute for Forest Resources and Environment Research Center of Guizhou Province, Guiyang 550025, China

2 Plateau Mountain Forest Cultivation Key Laboratory of Guizhou Province, Guiyang 550025, China

3 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: Compared with the traditional Elliott wet screen method, the modified wet screen method can be used to analyze the difference in organic carbon for the wet sieving of each particle size aggregate to the same size. This study selected 25a, 45a and 65a *Masson Pine* plantations as the research objects. Soil aggregates with different particle sizes were wet-screened by wet screening method. The organic carbon distribution of soil aggregates with different particle sizes in *Masson Pine* plantation was investigated after wet screening. The purpose is to explore the difference of the organic carbon distribution to the same size after wet screening of aggregates of various particle sizes and its influence on the water stability of aggregates. The results showed that the increase of planting years significantly decreased the water stability of soil aggregates ($P<$

基金项目:贵州省人才团队项目(QKHPTRC[2018]5261);贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007);贵州省人才团队项目(QKHPTRC20195614, [2018]5261);贵州省科技计划项目(QKHZC[2018]2305)

收稿日期:2020-05-08; **网络出版日期:**2021-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yc409@163.com

0.05); After wet screening, the organic carbon content of each particle size aggregates decreased firstly and then increased with the decrease of grain size, so as to maintain the highest organic carbon content of the original particle size aggregates (12.96—32.01 g/kg), followed by <0.25 mm particle size aggregates (8.08—23.53 g/kg). Wet sieve agglomerates of various particle sizes allocated to the same size of organic carbon to maintain the highest content of the original size ($P < 0.05$); There was significantly or extremely significantly positive correlation between the water stability of soil aggregates and the organic carbon of the aggregates with the original particle size after wet screening ($P < 0.05$ or 0.01). The smaller the particle size was allocated, the less significant the positive correlation was. In addition, the water stability of aggregates was positively correlated with the organic carbon allocated to the same grain size in the wet screen of aggregates with different particle sizes, and it had the strongest correlation with the organic carbon that maintained the original grain size ($P < 0.01$ or 0.05). The regression equation and correlation coefficient showed that the organic carbon had a significantly or extremely significantly positive correlation with the aggregates with original particle size ($P < 0.05$ or 0.01), and an extremely significantly negative correlation with the aggregates dispersed to other particle sizes ($P > 0.05$ or < 0.01). This study concludes that organic carbon is an important cementing material for the formation of aggregates, and the increase of organic carbon content can promote the formation of larger size aggregates. On the contrary, it promotes the conversion of large particle size aggregates to small particle size aggregates. In addition, comparison among aggregates of the same grain size, maintaining the original particle size aggregates have higher organic carbon content and stronger water stability than easily transforming into larger particle size aggregates, which provides a new understanding for the carbon sequestration of aggregates.

Key Words: Masson Pine plantation; water stability of aggregates; wet sieve; organic carbon distribution; aggregates formation

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其形成作用被认为是土壤有机碳固定的最重要机制^[1-3]。有机碳作为团聚体形成的重要胶结物质^[4],其含量的提高有利于形成良好的土壤结构和增强土壤抗蚀性^[5]。全球范围内 70%—73% 的有机碳存于森林土壤中,90% 集中于表层土壤团聚体中^[6]。因此,土壤团聚体的形成与提高土壤有机碳的固持,对有效缓解温室效应具有重要意义^[7-8]。

近年来,国内外学者参照 Elliott^[9] 湿筛法对土壤团聚体水稳性及有机碳的研究报道已经很多^[10-13]。已有的研究证实,土壤团聚体形成与土壤有机碳含量间存在正相关关系^[14-15]。但不同粒径团聚体有机碳含量存在明显差异。有研究表明,团聚体有机碳含量随粒径的增大而降低^[16],但也有研究发现有机碳含量随团聚体粒径的增大而增加,<0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量相对较低^[17-18]。由于某一粒径团聚体湿筛后分配到不同粒级的团聚体有机碳并不清楚,以及各粒径团聚体湿筛消散到同一粒级的团聚体有机碳含量是否有差异仍值得商榷。采用 Elliott 湿筛法是造成上述矛盾的一个可能原因。因为,不同粒径团聚体的稳定性和有机碳质、量不同^[19],在湿筛过程中发生的崩解、差异膨胀和物理-化学分散的作用不同,导致不同粒径团聚体湿筛消散到同一粒级分配的团聚体有机碳有差异。此外,有研究表明土壤团聚体粒径越小比表面积越大,吸附的有机物碳也越多,所以较小粒径团聚体中的有机碳含量也越高^[20],但忽略了较小粒径团聚体比表面积大在湿筛过程中受水力作用也越大的影响。因此,考虑到不同粒径团聚体受有机胶结物质的团聚作用力和抵抗水分分散作用力不同,以及两者综合作用对团聚体的影响也还不清楚,导致自然状态下不同粒径团聚体受水力侵蚀对有机碳的分配不同,即使不同粒径团聚体湿筛分配到同一粒级的有机碳也可能有差异。而就某一粒径团聚体湿筛后的有机碳分配及其对土壤团聚体水稳性的影响也鲜见报道。

马尾松 (*Masson Pine*) 人工林在维持森林生态系统稳定方面具有重要地位^[21]。我国亚热带地区自实施生态修复以来,整治后的森林植被有明显增加,但土壤功能并没有得到同步恢复,马尾松人工林水土流失依然严重^[22]。水土流失是陆地碳循环的重要动力过程之一,也是造成土壤有机碳循环和流失的主要原因^[23],对马

尾松林下土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究已成为广大学者关注的焦点问题^[24-26]。然而这些研究主要是将干筛的各粒径团聚体按质量百分比配成一定量土样一起进行湿筛,从湿筛后分散到不同粒径上的水稳性团聚体总量进行有机碳研究,人们对马尾松人工林各粒径团聚体在水力侵蚀下的有机碳分配认识依然有限。基于此,本研究以不同种植年限的马尾松人工林为研究对象,采用湿筛法对各粒径土壤团聚体分别进行了湿筛,探究了土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配。以试图明晰以下科学问题:1)土壤团聚体水稳性如何响应种植年限变化?2)各粒径团聚体的有机碳分配以及如何响应种植年限变化?3)土壤团聚体水稳性与各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配关系及意义如何?以期为森林防治水土流失和提高土壤固碳提供资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市林业科学研究院实验林场(26°31'N—26°34'N,106°43'E—106°46'E),属于中国西南亚热带季风气候区。年最高温 35.1℃,年最低温-7.3℃,年均温 15.3℃。年平均降水量为 1129.5 mm,土壤具有明显的黄化特征,这是中国亚热带黄壤的典型特征,土壤呈酸性,主要植被为马尾松。

表 1 采样地植被及土壤剖面状况
Table 1 Vegetation and soil profile of the sampling site

种植年限 Plantation age/a	林分密度 Density/ (株/hm ²)	平均数高 Mean tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	根系 Root system	土壤剖面 Soil profile/cm	土壤紧实 度/颜色 Soil density/color	植被 Vegetation
25	938	14.2	18.3	细根多	0—2 (0 层 0 horizon)	松/黑色	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>), 杉木 (<i>Cunninghamia lanceolata</i>), 金佛山荚蒾 (<i>Viburnum chinshanense</i>), 蛇葡萄 (<i>Ampelopsis sinica</i>), 野蔷薇 (<i>Capparis bodinieri</i>), 火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>), 粉枝莓 (<i>Rubus biflorus</i>), 油茶 (<i>Camellia oleifera</i>), 地瓜 (<i>Ficus tikoua</i>)
					2—5	松/黄色	
					5—20	较紧/黄色	
45	603	20.5	32.8	细根较少	0—5 (0 层 0 horizon)	松/深棕	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>), 刺槐 (<i>Black Locust</i>), 榉木 (<i>Aralia chinensis</i>), 白栎 (<i>Quercus fabri</i>), 构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>), 桦木 (<i>Betula</i>), 粉枝莓 (<i>Rubus biflorus</i>), 菝葜 (<i>Smilax china</i>), 桑葚 (<i>Fructus</i>), 铁仔 (<i>Myrsine africana</i>), 盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>), 铁芒萁 (<i>Dicranopteris linearis</i>)
					5—13	松/褐色	
					13—20	较紧/黄色	
65	548	22.2	36.3	细根较少	0—3 (0 层 0 horizon)	较紧/黄褐色	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>), 油茶 (<i>Camellia oleifera</i>), 铁仔 (<i>Myrsine africana</i>), 金佛山荚蒾 (<i>Viburnum chinshanense</i>), 铁芒萁 (<i>Dicranopteris linearis</i>), 鸢尾 (<i>Iris tectorum</i>), 地瓜 (<i>Ficus tikoua</i>), 六月雪 (<i>Serissa japonica</i>)
					3—8	紧/黄褐色	
					8—20	紧/黄色偏白	

1.2 样地选择与样品采集

在林场选择地形、海拔、坡度和坡向等条件基本一致,长势较为均匀、无病虫害的 25a、45a 和 65a 的马尾松人工林为研究对象。在各种植年限分别设置 3 个 20 m×20 m 标准样地,在设立的样地内选择能反映林分基本特征,具有代表性的地段,避开树干基部。分别在样地按“S”型选取 5 个点采集原装土样组成一个样品。采样前除去表面的枯枝落叶,采样深度为 0—20 cm。将采集的原装土样放入铝制盒中,以保持原状土壤结构,带回实验室。按照土壤自然破碎面将土样掰成直径约 1 cm 的土块,除去土壤中动植物残体以及碎石等,待自然风干。

1.3 测定方法

干筛和湿筛:用四分法取出一部分(1000.0 g)的土样,通过干筛套筛组(5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm),筛分时间为 15 min。然后将每个筛上的团聚体按粒径类别称重,计算各粒径干筛团聚体所占团聚

体重量百分比。并按干筛的各粒径团聚体所占比例配成 100.0 g 土样用于湿筛,用于计算土壤团聚体水稳性。

各粒径团聚体湿筛:对 Elliott^[9]湿筛法进行了改进,将干筛步骤得到的各粒径团聚体分别单独进行湿筛,具体步骤如下:称取每一干筛粒径团聚体 100.0 g,置于湿筛套筛组(5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm)最上层,调整桶内水面的高度使套筛移动到最高位置时最上一层筛中的团聚体刚好淹没于水面以下,浸泡 5 min,以 330 次/min 的频率振荡 20 min,筛分完成后收集每一层筛上的水稳性团聚体,于 65 ℃ 下烘至恒重,称重。

有机碳测定:将各粒径团聚体湿筛后得到的团聚体烘干、磨细过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾外加热法测定^[27]。

1.4 分析方法和数据处理

通过平均重量直径(MWD, Mean weight diameter)、几何平均直径(GMD, Geometric mean diameter)和团聚体破坏率(PAD, Aggregate destruction rate)指标来评价土壤团聚体水稳性,各指标计算方式如下:

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

$$\text{GMD} = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i\right)$$

$$\text{PAD} = \frac{W_D - W_W}{W_D} \times 100\%$$

式中, i 为各粒级; \bar{X}_i 为第 i 粒级土壤水稳性团聚体的平均直径,mm; W_i 为第 i 粒级土壤水稳性团聚体质量分数,%; W_D 为 >0.25 mm 粒级机械稳定性团聚体含量,%; W_W 为 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量,%。

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 对数据进行整理和统计分析,应用单因素(One-Way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析($P < 0.05$)。

2 结果分析

2.1 土壤团聚体水稳性

图 1 可知,随着种植年限的增加,水稳性团聚体 MWD 和 GMD 呈显著降低趋势,而 PAD 呈显著增加趋势($P < 0.05$)。与 25a 相比,MWD 在 45a 和 65a 分别降低了 28.74% 和 47.49%;GMD 分别降低了 52.77% 和 65.41%;而 PAD 变化与 MWD 和 GMD 呈相反趋势,45a 和 65a 分别增加了 144.70% 和 200.29%。

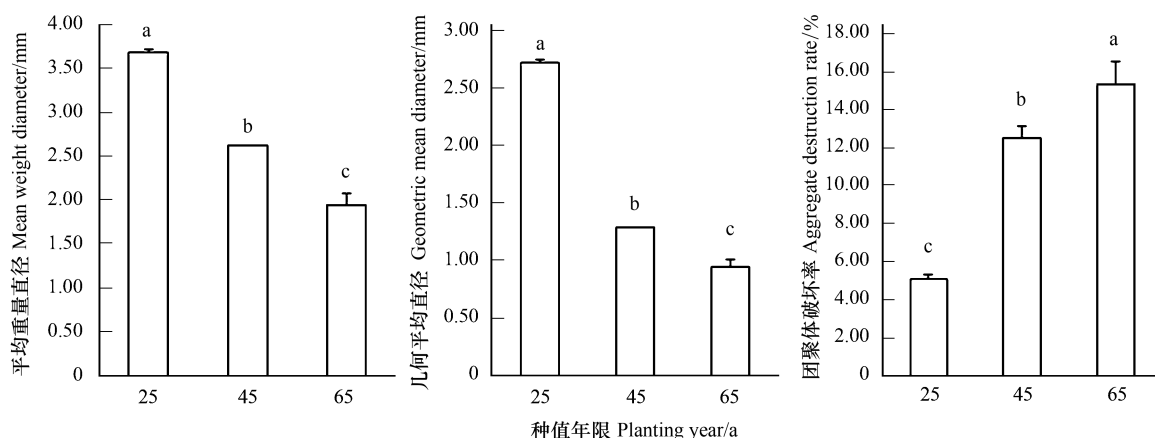


图 1 不同种植年限土壤团聚体水稳性变化特征

Fig.1 Variation characteristics of water stability of soil aggregates in different planting years

MWD:平均重量直径 Mean weight diameter;GMD:几何平均直径 Geometric mean diameter;PAD:团聚体破坏率 Aggregate destruction rate;不同小写字母 a、b、c 表示 MWD、GMD 和 PAD 分别在不同种植年限上的差异显著($P < 0.05$)

2.2 各粒径团聚体分别湿筛后的分布

如表 2 显示, >5 mm、5—2 mm、2—1 mm、1—0.5 mm 和 0.5—0.25 mm 粒径团聚体分别湿筛后, 均以保持原粒级的团聚体含量最高, 差异显著 ($P<0.05$), 消散的团聚体随粒级的减小含量呈“V”型分布。在种植年限上, 各粒径团聚体消散后保持原粒径团聚体含量总体表现为: $25a \approx 45a > 65a$, 而消散到其他粒级的团聚体含量表现为: $25a \approx 45a < 65a$ 。

表 2 各粒径团聚体湿筛后的水稳性团聚体分布

Table 2 Distribution of water-stable aggregates of various particle sizes

种植年限 Plantation age/a	粒径 Grain size/mm	水稳性团聚体含量 Water-stable aggregate content/%					
		>5	5—2	2—1	1—0.5	0.5—0.25	<0.25
25	>5	83.72±1.56aA	5.10±0.64aB	2.74±0.48bCD	3.13±0.09bBCD	1.49±0.19bD	3.82±0.16cBC
	5—2		78.39±1.61aA	9.84±1.12bB	3.22±0.29bD	2.34±0.10bD	6.21±0.32bC
	2—1			76.60±2.25bA	9.28±1.53bB	4.85±0.59bB	9.28±0.34abB
	1—0.5				81.32±2.29aA	4.23±1.10bC	14.46±2.77aB
	0.5—0.25					90.84±0.27aA	9.16±0.27bB
45	>5	86.74±0.62aA	1.30±0.44bC	0.08±0.02cD	0.11±0.02bD	0.16±0.01bD	11.62±0.25bB
	5—2		78.23±1.04aA	10.13±1.05bB	2.44±0.19bD	1.87±0.29bD	7.33±0.27bC
	2—1			85.25±1.18aA	4.93±1.12bBC	2.54±0.25cC	7.29±0.22bB
	1—0.5				80.27±1.51aA	3.51±0.59bC	16.22±1.07aB
	0.5—0.25					73.31±5.39bA	26.70±5.39aB
65	>5	41.94±5.26bA	6.27±0.32aC	8.11±0.69aC	16.98±2.21aB	10.79±1.03aBC	15.90±1.56aB
	5—2		41.88±3.26bA	20.71±0.96aB	14.47±0.94aC	8.45±0.66aD	14.50±0.98aC
	2—1			41.66±3.52cA	30.59±1.94aB	17.48±0.39aC	10.27±1.42aD
	1—0.5				80.99±2.00aA	12.15±0.33aB	6.87±1.72bC
	0.5—0.25					78.86±1.00bA	21.14±1.00aB

同一列不同小写字母表示不同种植年限相同粒级上的差异显著 ($P<0.05$); 同一行不同大写字母表示相同种植年限不同粒级上的差异显著 ($P<0.05$)

2.3 各粒径团聚体分别湿筛后的有机碳分配

图 2 表明, 3 种植年限中各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配随粒级减小含量呈先降低后增加趋势。25a 和 65a 各粒径团聚体分散后, 均以保持原粒级水稳性团聚体有机碳含量显著高于分配到其他粒级的水稳性团聚体有机碳含量 ($P<0.05$); 在 45a >5 mm 和 5—2 mm 粒径团聚体湿筛后分配到微团聚体中的有机碳含量最高, 而其他粒径团聚体湿筛后的有机碳分配与 25a 和 65a 呈一致变化趋势。在种植年限上, 各粒径团聚体湿筛后分配到不同粒级的有机碳含量总体趋势表现为: $25a \approx 45a > 65a$ 。

表 3 比较了各粒径团聚体消散后分配到同一粒级的有机碳含量。3 种植年限中, 各粒径团聚湿筛后分配到同一粒级的有机碳含量以保持原粒级的有机碳显著高于其他粒径团聚体湿筛分散到这一粒级的有机碳含量, 而较大的各粒径团聚体间消散分配到同一粒级的有机碳含量无一致变化规律。

2.4 分别湿筛后的水稳性团聚体与之有机碳的关系

各粒径团聚体湿筛消散后, 保持原粒级水稳性团聚体含量与之有机碳含量呈正相关关系, 其中 >5 mm、5—2 mm 和 2—1 mm 达到了极显著水平 ($P<0.01$), 分散到其他粒级的水稳性团聚体含量与之有机碳含量呈负相关 (表 4)。>5 mm 粒径团聚体分散后, 除了 5—2 mm 和 <0.25 mm 粒级, 其他粒级水稳性团聚体含量与之有机碳含量呈极显著负相关 ($P<0.01$); 5—2 mm 粒径团聚体分散后, 除 2—1 mm 粒级, 其他粒级水稳性团聚体含量与之有机碳含量呈极显著负相关性 ($P<0.01$); 2—1 mm 粒级团聚体分散后, 除 <0.25 mm 粒级, 其他粒级

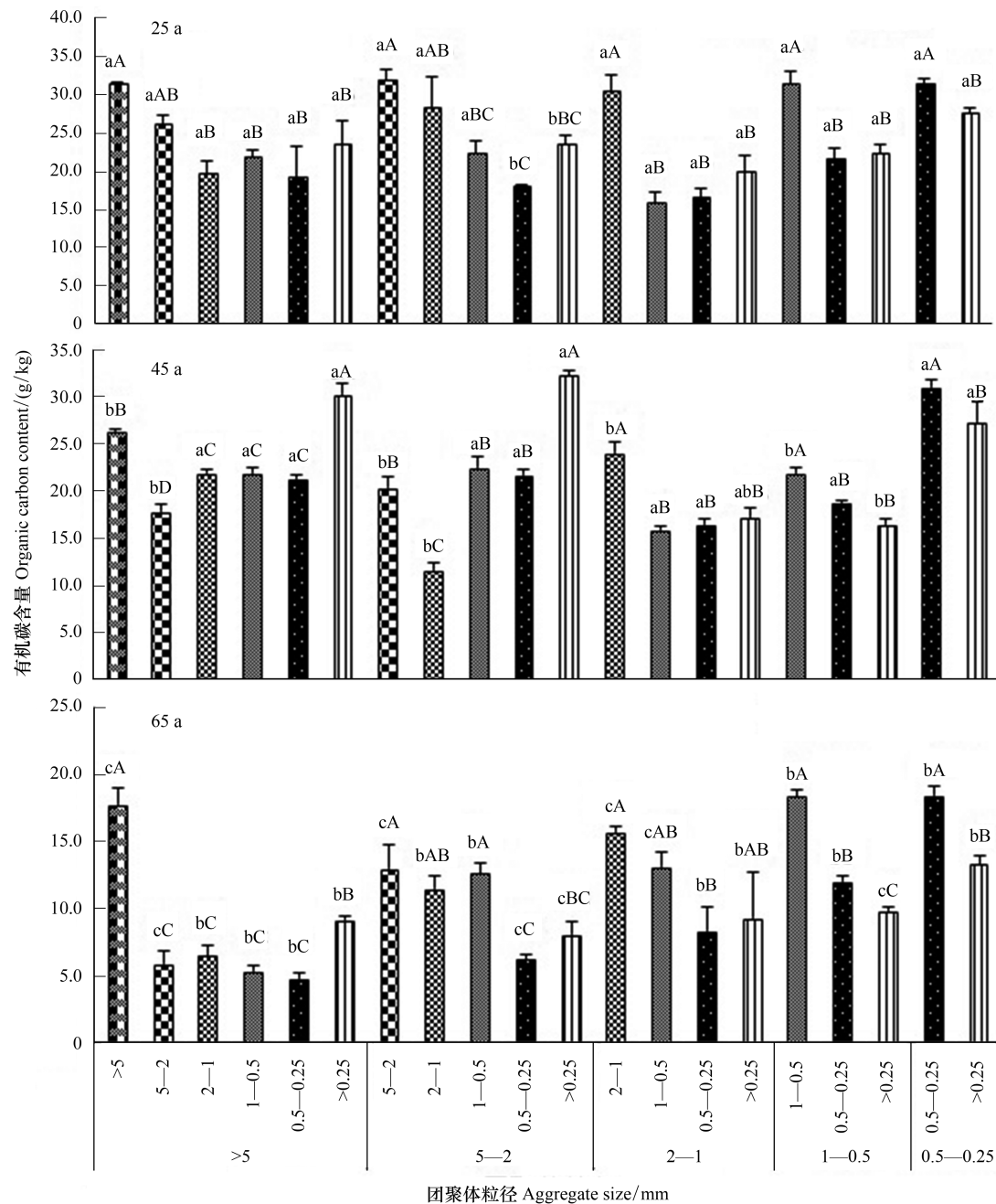


图2 不同种植年限各粒径团聚体的有机碳分配

Fig.2 The organic carbon distribution of aggregates of different particle sizes in different construction years

同列不同小写字母表示不同种植年限上的显著差异 ($P<0.05$); 同行不同大写字母表示不同粒级上的显著差异 ($P<0.05$)

水稳性团聚含量与之有机碳含量呈极显著负相关性 ($P<0.01$)。1—0.5 mm 粒级团体分散后, 0.5—0.25 mm 粒级团聚体含量与之有机碳含量呈极显著负相关性 ($P<0.01$)。

2.5 团聚体湿筛后分配的有机碳与稳定指标的关系

各粒径团聚体消散后, 以保持原粒级团聚体有机碳与 MWD 和 GMD 呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 0.01), 随消散到越小的粒级, 团聚体有机碳与 MWD 和 GMD 正相关性也低; PAD 与保持原粒级团聚体有机碳呈显著或极显著负相关 ($P<0.05$ 或 0.01), 随消散到越小的粒级, 负相关性越不显著 (表 5)。各粒径团聚体消散到同一粒级的团聚体有机碳, 以保持原粒级的团聚体有机碳与 MWD、GMD 和 PAD 正相关性更强。

表 3 各粒径团聚体分配到同一粒级的有机碳含量差异

Table 3 The organic carbon content of aggregates of different particle sizes assigned to the same grain size varied							
种植年限 Plantation age/a	粒径 Grain size/mm	有机碳含量 Organic carbon content/(g/kg)					
		>5	5—2	2—1	1—0.5	0.5—0.25	<0.25
25	>5	31.58±0.19	26.09±1.36B	19.67±1.83B	21.87±0.92B	19.31±4.10B	23.52±3.23AB
	5—2		32.01±1.46A	28.39±4.05AB	22.32±1.75B	18.08±0.26B	23.52±1.17AB
	2—1			30.55±2.12A	15.88±1.33C	16.61±1.27B	19.94±2.24B
	1—0.5				31.44±1.80A	21.65±1.49B	22.32±1.19AB
	0.5—0.25					31.55±0.64A	27.66±0.67A
45	>5	26.46±0.07	17.94±0.71A	21.96±0.32A	21.91±0.58A	21.29±0.51B	30.20±1.16AB
	5—2		20.43±1.10A	11.70±0.82B	22.47±1.16A	21.71±0.53B	32.30±0.46A
	2—1			24.12±1.03A	15.90±0.50B	16.46±0.73D	17.31±0.87C
	1—0.5				21.96±0.56A	18.77±0.17C	16.52±0.50C
	0.5—0.25					31.10±0.75A	27.28±2.22B
65	>5	17.78±1.20	5.98±0.96B	6.52±0.81C	5.35±0.44C	4.82±0.45D	9.20±0.26A
	5—2		12.96±1.81A	11.45±0.94B	12.64±0.80B	6.22±0.38CD	8.08±1.03A
	2—1			15.74±0.35A	13.08±1.21B	8.32±1.77C	9.34±3.43A
	1—0.5				18.37±0.53A	12.07±0.34B	9.86±0.32A
	0.5—0.25					18.46±0.62A	13.33±0.58A

同列不同大写字母表示不同粒径团聚体的有机碳分配到同一粒级上的显著差异 ($P<0.05$)

表 4 水稳性团聚体与有机碳的相关性

Table 4 Correlation between water-stable aggregates and organic carbon				
团聚体粒径 Aggregate size/mm		<i>N</i>	回归方程 Regress equation	相关系数 <i>r</i> Correlation coefficient <i>r</i>
>5	>5	12	$Y = -0.357X^2 + 20.590X - 209.480$	0.901 **
	5—2	12	$Y = 0.039X^2 - 1.312X + 12.454$	-0.275
	2—1	12	$Y = 0.009X^2 - 0.692X + 12.159$	-0.916 **
	1—0.5	12	$Y = 0.038X^2 - 1.972X + 26.360$	-0.938 **
	0.5—0.25	12	$Y = 0.046X^2 - 1.832X + 18.508$	-0.901 **
	<0.25	12	$Y = 0.086X^2 - 3.637X + 41.891$	-0.489
5—2	5—2	12	$Y = -0.149X^2 + 8.438X - 37.157$	0.766 **
	2—1	12	$Y = 0.006X^2 - 0.587X + 21.441$	-0.516
	1—0.5	12	$Y = 0.087X^2 - 4.204X + 53.226$	-0.922 **
	0.5—0.25	12	$Y = 0.024X^2 - 1.086X + 14.231$	-0.950 **
	<0.25	12	$Y = 0.0267X^2 - 1.370X + 23.739$	-0.854 **
2—1	2—1	12	$Y = -0.303X^2 + 16.673X - 144.560$	0.777 **
	1—0.5	12	$Y = 0.285X^2 - 12.670X + 139.600$	-0.700 *
	0.5—0.25	12	$Y = -0.0197X^2 - 0.919X + 25.054$	-0.890 **
	<0.25	12	$Y = 0.003X^2 - 0.163X + 10.550$	-0.201
1—0.5	1—0.5	12	$Y = 0.069X^2 - 3.398X + 120.66$	0.208
	0.5—0.25	12	$Y = 0.078X^2 - 3.543X + 43.517$	-0.916 **
	<0.25	12	$Y = -0.119X^2 + 4.452X - 25.163$	0.562
0.5—0.25	0.5—0.25	12	$Y = -0.131X^2 + 6.747X - 0.943$	0.147
	<0.25	12	$Y = -0.009X^2 + 0.102X + 21.590$	-0.197

Y:水稳性团聚体含量/%;X:有机碳含量/(g/kg);*表示在0.01水平上极显著相关;*表示在0.05水平上显著相关

表 5 团聚体有机碳与稳定指标的相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of aggregate organic carbon and stability index

稳定指标 Stable indicators	有机碳含量 Organic carbon content/(g/kg)									
	>5						2—1			
	>5	5—2	2—1	1—0.5	0.5—0.25	<0.25	2—1	1—0.5	0.5—0.25	<0.25
MWD	0.962 **	0.911 **	0.663	0.769 *	0.635	0.53	0.900 **	0.402	0.638	0.619
GMD	0.881 **	0.867 **	0.513	0.635	0.49	0.358	0.853 **	0.357	0.554	0.59
PAD	-0.904 **	-0.833 **	-0.54	-0.664	-0.528	-0.405	-0.847 **	-0.325	-0.541	-0.535
	5—2					1—0.5			0.5—0.25	
	5—2	2—1	1—0.5	0.5—0.25	<0.25	1—0.5	0.5—0.25	<0.25	0.5—0.25	<0.25
MWD	0.971 **	0.798 **	0.705 *	0.636	0.508	0.939 **	0.863 **	0.929 **	0.809 **	0.778 *
GMD	0.947 **	0.876 **	0.585	0.461	0.324	0.963 **	0.793 *	0.896 **	0.671 *	0.645
PAD	-0.956 **	-0.820 **	-0.623	-0.501	-0.378	-0.922 **	-0.776 *	-0.876 **	-0.696 *	-0.679 *

3 讨论

3.1 种植年限对土壤团聚体水稳性的影响

稳定的团聚体对提高土壤抗侵蚀能力和改善土壤质量等方面具有重要意义^[28-29]。MWD、GMD 值越大和 PAD 值越小表征土壤团聚体稳定性越强。反之,土壤团聚体稳定性越弱。在本研究中,3 个评价指标均表明团聚体水稳性随马尾松人工林种植年限增加呈显著降低趋势。土壤有机碳是团聚体形成和稳定的主要物质基础之一,土壤颗粒在持久性胶结物质(芳香类有机质)的作用下形成微团聚体(<0.25 mm),微团聚体再通过暂时和瞬时性胶结物质(多糖、菌丝根系)的作用下逐级形成大团聚体(>0.25 mm)^[19]。随着种植年限增加各粒径团聚体有机碳含量呈降低趋势(图 2),MWD、GMD 和 PAD 与有机碳含量的相关性也表明,有机碳对团聚体水稳性有显著的积极影响(表 5)。此外,根系也是影响团聚体稳定性的可能因素。一方面,根系分泌物能够刺激微生物生长,增加土壤中大粒级团聚体的含量,进而提高团聚体的稳定性,其效应与根系分泌物的浓度和成分显著相关^[30]。另一方面,表层根系对土壤的穿插和缠结促进了土壤团聚结构的形成^[31]。大量研究表明,在表层(0—20 cm)土壤团聚体水稳性与一些根系特征(根长密度和比根长)有很好的正相关性^[32-33]。本研究区的细根含量随马尾松种植年限增加逐渐降低(表 1),45a 和 65a 乔木根系系统纵向分布较深,在表层细根较少。因此,较少的根系直接导致作用于团聚体形成和稳定的根系分泌物和成分减少以及物理作用变弱,不利于团聚体形成和稳定。

3.2 各粒径团聚体的有机碳分配特征

研究结果表明,3 种植年限各粒径团聚体的有机碳分配,随湿筛后的粒级减小含量呈先降低后增加趋势,即在保持原粒级的有机碳含量最高,其次是在<0.25 mm 粒级。这可能与分散后的团聚体粒径大小有关,团聚体“层次性概念”模型^[16]表明:大团聚体是由微团聚体逐级形成的过程,较大粒径团聚体含有更多胶结微团聚体的有机胶结物,以及在大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝极大地增加了其有机碳浓度,随着团聚体粒径的减小这些有机胶结物质也降低。同时,在微团聚体向大团聚体是逐级形成过程中,有机胶结物稳定性也越来越弱,当径流冲刷力大于土壤团聚体内聚力和渗透力时,将迁移细颗粒物质(黏粒和粉粒),导致大量溶解性有机碳、少量颗粒有机碳发生迁移,有机碳含量降低^[34]。因此,在湿筛过程中,由于各粒径团聚体分散成越小粒径大团聚体时,也意味着损失了更多的这部分有机碳。而微团聚体含量较高的原因,是由于微团聚体有机碳顽固且密度大,有机和无机胶体能紧密结合并固持碳,固持的碳不易为微生物分解释放,同时受外界因素影响基本不易发生损失^[35]。此外。我们比较了各粒径团聚湿筛后分配到同一粒级的有机碳含量差异,保持原粒级的有机碳显著高于其他粒径团聚体湿筛分散到这一粒级的有机碳含量。对上述解释原因总结成两点也可以很好的解释这一现象:即在较大粒径团聚体分散成越小粒径大水稳性团聚体时流失更多有机碳的缘故;同一粒级团聚体在逐级形成不同粒径团聚体时的有机碳质、量可能不同。

在种植年限上,各粒径团聚体湿筛后的有机碳含量在不同粒级团聚体中总体趋势表现为:25a \approx 45a>65a。大多学者对马尾松人工林生产力与林龄变化的研究结果趋于一致,即幼龄林至中龄林末期与近熟林初期林分的净初级生产力是一个上升的过程,之后林分的净初级生产力逐渐降低^[36]。姜俊等^[37]也研究发现,林龄从10a到40a物种多样性指数呈增长趋势,40a达到最大值,40a以后物种多样性指数呈降低趋势。由表2显示,65a林地生物量和物种多样性最低,这可能直接影响了土壤有机碳的输入量,从而使65a各粒径土壤团聚体分配的有机碳含量在不同粒径水稳性团聚体中均显著低于25a和45a。25a至45a物种多样性增加,是林分发育阶段,但有研究表明土壤有机碳储存水平并非无限度增加,而是存在一个碳饱和水平^[38-39]。本研究中25a和45a各粒径团聚体分配的有机碳含量在不同粒径水稳性团聚体中均很高,且差异不显著,可能是由于达到了该土壤碳饱和水平所致。此外,在我们之前研究中(同一研究区)发现,马尾松人工林种植25a后,土壤微生物群落结构稳定性和功能代谢活性明显降低^[40],同时随种植年限增加凋落物中含有较多难降解的纤维素和木质素等^[40],这些物质中C/N比相对较高,较高的C/N比会导致土壤中氮的缺乏,从而抑制土壤微生物活性^[41],最终使有机质等养分归还土壤减少。这一点也可以对土壤团聚体水稳性进行很好的解释。

3.3 土壤团聚体水稳性与各粒径团聚体湿筛后的团聚体有机碳的关系

回归分析表明,有机碳与保持原粒径团聚体呈显著正或极显著正相关,与消散到其他粒级的团聚体呈极显著负相关。表明有机碳含量升高可以为团聚体的形成提供更多胶结物质,将微团聚体和粉粒及黏粒胶结形成大团聚体,减少粒径较小的团聚体、粉粒和黏粒的含量,从而增加了大团聚体的含量^[17]。反之,有机碳含量的降低,促使更多较大粒径团聚体向较小粒径团聚、微团聚体等的转化。团聚体稳定指标与有机碳相关性表明,随各粒径团聚体湿筛后分配到越小的粒级正相关性越不显著,保持原粒级的正相关达到了显著或极显著水平($P<0.05$ 或 0.01)。这表明有机质在促进团聚体形成和维持团聚体稳定性方面有差异,有机碳在较大粒径团聚体中比在较小粒径团聚体中维持团聚体稳定的作用更大。Peng等^[42]、Xue等^[43]等对热带亚热带红壤研究发现,与DCB和草酸浸提后的土壤相比, H_2O_2 氧化后的保留下来的土壤大团聚体(0.25—2.0 mm)较少,砂粒级微团聚体(0.053—0.25 mm)和粉粒级微团聚体较多。此外,一些研究发现,铁铝氧化物的含量随团聚体粒级降低而增加,且主要集中在微团聚体中^[44-45]。这些研究结果表明,有机质是影响较大粒径团聚体稳定的主要因素,而随团聚体粒径减小,氧化物以及有机质(芳香腐殖质)与多价金属阳离子络合形成的有机无机聚合物对团聚体稳定性起着重要作用^[19]。此外,本研究发现各粒径团聚分散为同一粒级的有机碳对土壤团聚体水稳性的作用也不相同。这是由于同一粒级的团聚体在逐级形成不同粒径团聚体时的有机碳质、量不同,对土壤团聚体水稳性的作用也有差异,还有待从有机碳组分等更微观层次深入探究。

4 结论

(1)随种植年限增加,土壤团聚体水稳性显著降低,各粒径团聚体湿筛分配到不同粒级的有机碳含量在24a与45a间无显著差异,均显著高于65a。

(2)各粒径团聚体湿筛分配的有机碳随粒级的减小含量呈先降低后增加趋势。各粒径团聚体分配到同一粒级的有机碳,以保持原粒级的有机碳含量以及对土壤团聚体水稳性贡献显著高于较大粒径团聚体分配到这一粒级的团聚体。

(3)土壤有机碳含量增加促进更大粒径团聚体形成;有机碳含量降低导致大粒径团聚体向较小粒径团聚体转化。土壤中保持原粒级团聚体比易转化形成更大粒级团聚体有更高的有机碳含量和更强的水稳性。

参考文献(References):

- [1] 杨金艳,王传宽.东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量.生态学报,2005,25(11):2875-2882.
- [2] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel H J. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. Geoderma, 2018, 314: 122-137.
- [3] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 809-816.

- [4] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498.
- [5] 邸佳颖, 刘小粉, 杜章留, 肖小平, 杨光立, 任图生. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1129-1138.
- [6] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, Hwat B S, 李秀英, 李娟. 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. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [7] Rumpel C, Amiraslani F, Koutika L S, Smith P, Whitehead D, Wollenberg E. Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. Nature, 2018, 564(7734): 32-34.
- [8] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004, 23(6): 481-504.
- [9] 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.
- [10] 韩贞贵, 毛天旭, 屠丹, 张涛, 王根绪. 长江源区草地覆盖变化对土壤团聚体分布及稳定性的影响. 草地学报, 2020, 28(3): 801-807.
- [11] Okolo C C, Gebresamuel G, Zenebe A, Haile M, Eze P N. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 297: 106924.
- [12] 刘秀, 司鹏飞, 张哲, 陈保青, 董雯怡, 严昌荣, 刘恩科. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7870-7877.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Bucka F B, Kölbl A, Uteau D, Peth S, Kögel-Knabner I. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils. Geoderma, 2019, 354: 113881.
- [16] 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.
- [17] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国, 李森. 不同施肥处理对黑垆土各粒径团聚体中有机碳含量分布的影响. 土壤学报, 2010, 47(5): 931-938.
- [18] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 朱锦懋, 曾宏达, 杨智杰. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 702-709.
- [19] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [20] 黄丹丹, 刘淑霞, 张晓平, 许继平, 吴立君, 娄玉杰. 保护性耕作下土壤团聚体组成及其有机碳分布特征. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1560-1565.
- [21] 周政贤. 中国马尾松. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [22] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 尹云锋, 李德成, 杨玉盛. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65-70.
- [23] Van Oost K, Quine T A, Govers G, De Gryze S, Six J, Harden J W, Ritchie J C, McCarty G W, Heckrath G, Kosmas C, Giraldez J V, da Silva J R M, Merckx R. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. Science, 2007, 318(5850): 626-629.
- [24] 王燕, 宫澜波, 尹艳杰, 郭挺, 刘珊珊, 李渊, 马金松. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能. 水土保持学报, 2013, 27(5): 23-27.
- [25] Wang B W, Wang Y Q. Relationships between the characteristics of soil and understory in a *Pinus massoniana* forest in southern China. Catena, 2019, 176: 352-361.
- [26] Yao X, Yu K Y, Deng Y B, Zeng Q, Lai Z J, Liu J. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in Masson pine (*Pinus massoniana*) forests in subtropical China. Catena, 2019, 178: 189-198.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [29] 王文鑫, 王文龙, 郭明明, 王天超, 康宏亮, 杨波, 赵满, 陈卓鑫. 黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响. 中国农业科学, 2019, 52(16): 2845-2857.
- [30] 李杨, 仲波, 陈冬明, 张楠楠, 孙庚. 不同浓度和多样性的根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1061-1067.
- [31] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273.
- [32] Demenois J, Carriconde F, Bonaventure P, Maeght J L, Stokes A, Rey F. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. Geoderma, 2018, 312: 6-16.

- [33] Xiao L, Yao K H, Li P, Liu Y, Chang E H, Zhang Y, Zhu T T. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau.. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105671.
- [34] Berhe A A, Harte J, Harden J W, Torn M S. The Significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink. *BioScience*, 2007, 57(4): 337-346.
- [35] Dominique A, Vion I, Kicin J L. Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 1995, 159(3): 191-198.
- [36] 张林林, 刘效东, 苏艳, 夏文杰, 梁京威, 李吉跃. 马尾松人工林生物量与生产力研究进展. *生态科学*, 2018, 37(3): 213-221.
- [37] 姜俊, 谢阳生, 陆元昌, 孟京辉, 刘宪钊, 邢海涛. 不同林龄阶段马尾松人工林群落结构特征及经营策略. *西北林学院学报*, 2015, 30(6): 1-7.
- [38] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [39] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2): 25-41.
- [40] 赵辉, 周运超, 任启飞. 不同林龄马尾松人工林土壤微生物群落结构和功能多样性演变. *土壤学报*, 2020, 57(1): 227-238.
- [41] Chen Y L, Kang L H, Malajczuk N, Dell B. Selecting ectomycorrhizal fungi for inoculating plantations in south China: effect of *Scleroderma* on colonization and growth of exotic *Eucalyptus globulus*, *E. urophylla*, *Pinus elliottii*, and *P. radiata*. *Mycorrhiza*, 2006, 16(4): 251-259.
- [42] Peng X, Yan X, Zhou H, Zhang Y Z, Sun H. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 89-98.
- [43] Xue B, Huang L, Huang Y N, Zhou F L, Li F, Kubar K A, Li X K, Lu J W, Zhu J. Roles of soil organic carbon and iron oxides on aggregate formation and stability in two paddy soils. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 161-171.
- [44] 陈红, 马文明, 周青平, 杨智, 刘超文, 刘金秋, 杜中曼. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其铁铝氧化物分异的研究. *草业学报*, 2020, 29(9): 73-84.
- [45] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 饶伟, 张文豪, 郭春燕, 李腾. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系. *环境科学*, 2010, 31(11): 2748-2755.