

喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物碳代谢活性的影响

喻国军¹, 谢晓尧²

(1. 贵州大学 计算机科学与技术学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学 信息与计算科学重点实验室, 贵阳 550001)

摘 要:通过湿筛法得到不同造林地(桉木林、杜仲林、刺槐林、滇柏林和未造林地)不同土层(0—10, 10—20, 20—30 cm)土壤大团聚体(>2 mm)、中间团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体($53\ \mu\text{m}\sim 0.25\ \text{mm}$)以及粉+黏团聚体($<53\ \mu\text{m}$)和土壤微生物量及微生物碳代谢活性。结果表明:造林对土壤团聚体稳定性有显著的影响,造林地会导致大团聚体的破碎化,未造林地 $>0.25\ \text{mm}$ 的大团聚体含量均小于林地。在 0—30 cm 的土层深度内,在土壤的各粒径团聚体中,桉木林、杜仲林以 $>0.25\ \text{mm}$ 的大团聚体为主,占粒径总组成的 20% 以上;刺槐林、滇柏林以中间团聚体和粉+黏团聚体为主;而未利用林地则以粉+黏团聚体为主,约占粒径总组成的 40%。在 0—30 cm 土层深度的各土层上,桉木林、杜仲林团聚体 MWD 和 GMD 值均明显高于其他林地,而在 20—30 cm 土层,这种差异变小,说明人类活动对土壤团聚体稳定的影响主要集中在 0—10 cm 的土壤表层。不同林地土壤微生物对不同种类碳源的利用强度存在较大差异,碳水化合物和羧酸类碳源是土壤微生物的主要碳源,其次为氨基酸类、酚酸类和聚合物类,胺类碳源的利用率最小。相关性分析表明:造林过程中,土壤氨基酸类、碳水化合物类、羧酸类与大团聚体、中团聚体、MWD 和 GMD 呈显著正相关($p<0.05$);微生物量碳、微生物量氮、微生物代谢熵与微团聚体和粉微团聚体呈显著正相关($p<0.05$)。总体上看,喀斯特地区造林后土壤结构趋于改善,并且微生物碳代谢活性增强。

关键词:喀斯特地区;造林;土壤团聚体;土壤微生物

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0021-07

Effects of Afforestation on Soil Aggregate Stability and Microbial Carbon Metabolism Activity in Karst Area

YU Guojun¹, XIE Xiaoyao²

(1. School of Computer Science and Technology, Guizhou University, Guiyang 550001, China;

2. Key Laboratory of Information and Computing Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Soil aggregates play an important role in soil fertility, quality and sustainable utilization. (0—10, 10—20, 20—30 cm) large soil aggregate ($>2\ \text{mm}$), intermediate aggregate (0.25~2 mm), micro aggregate ($53\ \mu\text{m}\sim 0.25\ \text{mm}$) and glue powder+aggregate ($<53\ \mu\text{m}$) mass fraction in different soil layers of different planting areas (*Alnus cremastogyne*, *Eucommia ulmoides*, *Robinia pseudoacacia*, *Cipressus duclouxiana* forest and not planting area, CK) were obtained by wet sieving method, and soil microbial biomass and microbial activity of carbon metabolism were measured. The results showed that afforestation had a significant impact on the stability of soil aggregates, and the fragmentation of large aggregates was caused by afforestation, and the contents of $>0.25\ \text{mm}$ large aggregates in unforested areas were lower than those in forested areas, indicating that the soil structure tended to be improved after afforestation; in the soil depth of 0—30 cm, $>0.25\ \text{mm}$ large aggregates in the *Alnus cremastogyne* forest and *Eucommia ulmoides* forest are dominated and accounted for more than 20% of the total aggregates; intermediate aggregates and powder+sticky aggregates in *Eucommia ulmoides* and *Cipressus duclouxiana* were main components of the aggregates;

收稿日期:2020-02-15

修回日期:2020-03-02

资助项目:贵州省科技合作项目“大肠杆菌碳代谢系统氧化应激时的动力学过程和稳态机制”(JLKS201222)

第一作者:喻国军(1983—),男,贵州仁怀人,博士,讲师,主要从事生物信息学研究。E-mail:Guojun_yuu@163.com

通信作者:谢晓尧(1952—),男,贵州贵阳人,博士,教授,主要从事大数据、生物信息学研究。E-mail:ygj@gznu.edu.cn

however, the powder + cohesive aggregates in unused woodlands were of dominant, accounting for about 40% of the aggregates; in the depth of 0—30 cm, the MWD and GMD values of aggregates in *Alnus cremastogyne* and *Eucommia ulmoides* forest were significantly higher than those of other woodlands, while in the depth of 20—30 cm, the differences were smaller, indicating that the influence of human activities on the stability of soil aggregates mainly concentrated in the surface layer of 0—10 cm; the utilization intensities of different types of carbon sources by soil microorganisms in different woodlands were quite different; carbon sources of carbohydrates and carboxylic acids were the main carbon sources of soil microorganisms, followed by amino acids, phenolic acids and polymers, and amine carbon sources had the lowest utilization rate. Correlation analysis showed that amino acids, carbohydrates and carboxylic acids were significantly positively correlated with macroaggregates, mesocarbons, MWD and GMD during afforestation ($p < 0.05$). Microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and microbial metabolic entropy were positively correlated with microaggregates and powder microaggregates ($p < 0.05$). In summary, soil structure tended to be improved after afforestation in karst areas, and the activity of microbial carbon metabolism was enhanced.

Keywords: karst regions; afforestation; soil aggregates; soil microorganism

对于全球生态环境而言,大气、陆地及海洋是其主要生态系统,此外还包括湿地、土壤、水域等多种生态子系统,其影响要素不仅具有多样性,还体现着明显的复杂性^[1-2]。立足于陆地生态而言,其不仅包含森林、草地等子系统,还包括土壤、微生物等多种生态子系统;由于土壤直接关乎作物生长发育^[3],同时也是人类生产生活的关键载体,因此其重要地位不言而喻,不仅在生态系统中尤为重要,而且在生产生活中起着突出的影响作用。作为土壤的关键构成部分,其团聚体不仅直接决定着土壤结构的稳定性^[4],在降低水土流失方面效果突出,另一方面能够有效固定有机碳成分,进而促进土壤肥力的保持及提升,能够明显改善土壤质量^[5-6],经过大量实证分析可知,该指标能够作为衡量土壤质量的一个关键指标。就目前而言,对于团聚体分类的标准并未能完全统一,但是主要借助于湿筛法^[7-8],且其大小的分界点常常为 250 μm ,超过该界点则称为大团聚体,否则称为微团聚体。团聚体的大小对土壤孔隙度的制约效果不同,对土壤结构的影响效果具有较大差别,对于土壤养分的调节效应也不尽相同^[9-10],此外,对于土壤的生化反应也产生不同程度的制约效果。近些年来不少学者开展了土壤团聚体的相关研究,主要集中在土壤稳定性及有机碳等方面,研究范围多集中在农作物方面,尤其是耕作及施肥等因素的制约方面,但是对于森林土壤的研究相对较少^[11-13]。森林资源不仅能够创造一定的经济来源,更为重要的是具有重要的生态意义,成为陆地生态的重要一环,在为植被生长发育提供场所的同时也促进了微生物等动物生长,成为多种能量交换的场所之一;在微生物的参与下,加之酶的作用,腐殖质等有机质能够高效地被分解转化成养分,促进了能

量循环,关乎土壤理化特性,也成为衡量土壤状况的关键指标之一,在分子生物学等技术不断发展的情况下,微生物的研究也由单纯的数量分布向多样性研究转变,不仅能够对其物种及功能等方面加以探索,而且在遗传多样性方面的研究在不断深化,尤其是在研究过程中脂肪酸分析法 PLFA 以及碳素分析法的广泛利用,此外核酸分析的方法也运用较为广泛,这些技术的发展显著促进了微生物研究,从多个角度、多个层面开展相应分析研究^[14],也利于开展土壤研究。

贵州喀斯特地区受制于地理位置分布和高原河流等影响,喀斯特地貌分布尤为突出,近些年来该地区呈现明显的植被退化现象,土壤肥力和活性大幅下降,土壤稳定性下降,整体呈现显著的生态退化。为了进一步改善生态环境,人工造林及生态育林等日益受到重视,并取得了较好效果^[15-16]。腐殖质等有机质的高效降解及转化离不开微生物的参与,此外酶也起着不可忽视的作用,从而成为养分循环的关键参与者之一,在土壤肥力和活性方面施加关键影响,促进植被对养分的吸收利用,在评价土壤状况方面效果突出。不少学者对于该地区的植被演替与土壤之间的关系进行了探究,对于喀斯特地貌而言,人工育林在土壤养分保持方面效果突出,能够有效改善土壤理化特性,通过土壤结构的改善来促进其质量的提升^[17]。基于此,本文连续 4 a 研究喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物碳代谢活性的影响,以期有利于评估我国重大工程的生态效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取贵州晴隆县(东经 105.18°,北纬 25.44°),境

内 50% 以上的面积属于喀斯特地貌,高原峡谷均有广泛分布,山高、谷深的特点尤为突出,山峦起伏且坡度较大,形成了海拔差(1 400 m)。受地理位置制约,其亚热带季风气候尤为突出,呈现明显的雨热同期分布特点,其气候也具有突出的垂直分布差异,海拔较低的区域明显干热,而对于高海拔区域而言较为寒冷。该区域年均降雨不足 1 700 mm,年均温度约为 15℃,年均日照 1 600 h,雨热同期;受喀斯特地貌影响,土层分布较为稀薄,土壤结构不够稳定,制约着植被生长发育,直接影响了作物种植,因此该区域分布大量的草地、乔木等;此外,由于山峦起伏,受风化及岩溶等制约,常常发生自然灾害^[16-17]。

1.2 试验设计

在造林地选取桉木林、杜仲林,还包括刺槐林、滇柏林和未造林地(CK,对照组)共 5 种林分,连续 4 a 长期定位观测(2015—2018 年 4 月)。为了保证取样的一致性,所取样的土壤坡度均小于 5°,各林分处理分别设 5 个 20 m×20 m 的样方,间距>15 m,每个样方进行标记,长期采样观测,共计 25 个样方。每个样方重复采集 5 个样品,每个样品重复取 3 次,然后混合成一个样品,采样深度为 0—10,10—20,20—30 cm 的扰动土和原状土样。4 a 共采集 1 500 个土壤样品。所取土壤样品分为两部分,一部分自然风干后测量土壤微生物,另一部分原状土为在风干过程中沿自然裂隙掰成直径为 1 cm 左右大小的团聚体。团聚体的大小对土壤孔隙度的制约效果不同,对土壤结构的影响效果具有较大差别,对于粒径分组采取湿筛法进行,然后选取风干土样 100 g,通过 5 ml 的纯水进行浸润,接下来进行过筛处理,整套筛子包含 3 种不同的筛目,不仅有 53 μm 筛,还有 0.25,2 mm 筛,同时对土样进行湿筛处理,要求振幅达到 3 cm,频率为 50 次/min,从而获取了 4 种粒径的土壤团聚体,进行烘干处理后称重,并计算相应的质量分数。

1.3 土壤微生物测定方法

微生物量碳、氮、磷采用氯仿熏蒸—浸提法测定^[8-9];土壤呼吸采用静态碱液吸收法^[11]。

微生物对于凋落物分解效果突出,加之酶的参与进一步提升了分解效果,二者是息息相关的,离开了微生物,凋落物等腐殖质的降解将无从谈起,这在土壤养分转化过程中尤为关键,直接制约着土壤肥力及活性,因此,在土壤质量分析过程中微生物常作为关键指标加以分析。本研究对于微生物多样性分析立足于 Shannon 和 Simpson 等指数^[11]。对于 Simpson 指数计算而言,首先对相应的数据进行放大 1 000 倍

的处理,这样将不会出现负数的现象;对于微生物的碳源利用水平进行衡量过程中主要借助于 AWCD 值衡量法^[8-9],即:

$$AWCD = \sum [(C_i - R) / 31] \quad (1)$$

$$H = - \sum P_i (\ln P_i) \quad (2)$$

$$P_i = (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i) \quad (3)$$

$$D_s = 1 - \sum P_i \quad (4)$$

式中:AWCD 为颜色平均变化率; C_i 为第 i 个非对照孔吸光度; n 为碳源种类数($n=31$); R 为对照孔吸光度; H 为 Shannon-wiener 多样性指数; P_i 为第 i 个非对照孔吸光度与所有非对照孔吸光度总和的比值; D_s 为 Simpson 优势度指数。

1.4 数据分析

本试验对于团聚体稳定性的评价主要通过以下两方面进行:一方面借助于平均质量直径 MWD,另一方面借助于几何平均直径 GMD,其计算公式如下^[12-13]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i \quad (5)$$

$$GMD = \exp[\sum W_i \cdot \ln X_i] \quad (6)$$

式中: X_i 为第 i 级的团聚体平均直径(mm); W_i 为第 i 级团聚体重量百分含量。

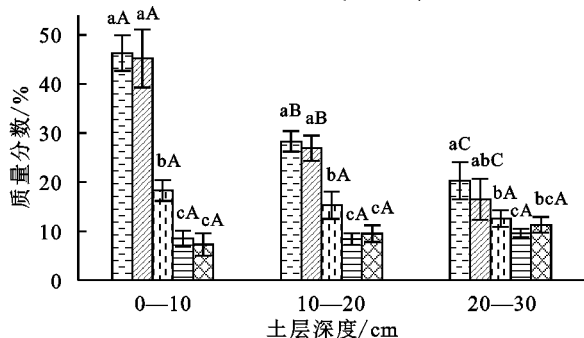
2 结果与分析

2.1 不同林地对土壤团聚体组成的影响

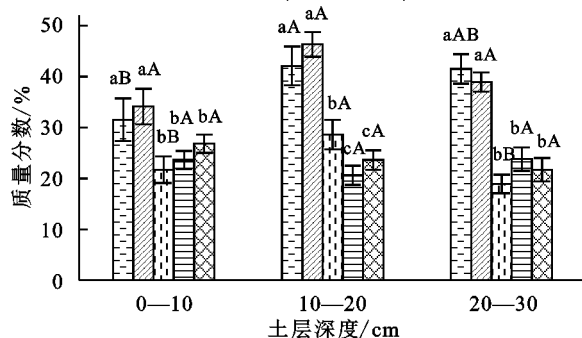
通过对图 1 的分析不难发现,受到不同林地的制约,不同试验分组获取的大团聚体含量还是存在着明显的差异,其中含量最高的是桉木林地,其次是杜仲林,而滇柏林地含量最低,但是整体而言其超过 2 mm 的团聚体均明显高于对照组;从土壤剖面的角度来讲,在土层深度不断上升的情况下,大团聚体的含量呈现明显的下降态势。对于中间团聚体而言,不同林地并未带来较大的差异影响,从土壤剖面的角度来讲,在土层深度不断上升的情况下,其含量并没有较大差异,对于微团聚体来说亦是如此。对于黏团聚体而言,由于其粒径一般低于 53 μm,不同的林地类型对其产生的影响较为突出,从不同土层的土壤剖面来讲,该类型团聚体含量最高的是滇柏林地,其次是刺槐林,而桉木林含量最低,但是整体而言该类型团聚体均明显高于对照组。

通过对图 2 的分析不难发现,对于土壤团聚体而言,其受到林地类型的影响较为明显,尤其是对于桉木林、杜仲林地来讲,其分布的大团聚体居多,占比超过了 20%。对于刺槐林、滇柏林而言,其主要的团聚体不仅包括中间团聚体,还包括黏团聚体;而对于对照组来说,其黏团聚体居多,且占比接近于 40%。

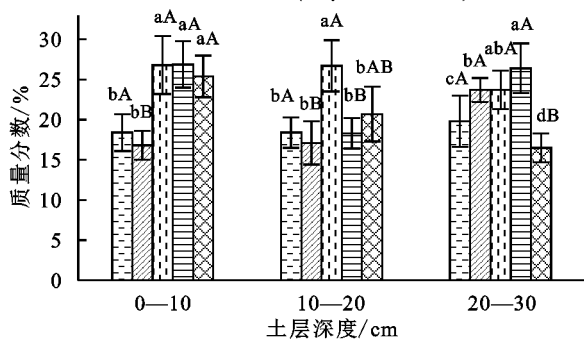
大团聚体(>2 mm)



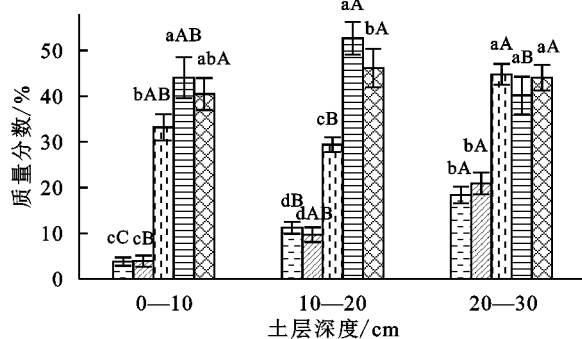
中团聚体(0.25~2 mm)



微团聚体(53 μm~0.25 mm)



粉+黏团聚体(<53 μm)



注:不同小写字母表示同一深度不同林地,在 0.05 水平差异显著,不同大写字母表示不同深度同一林地在 0.05 水平差异显著,下同。

图 1 不同林地土壤各粒径团聚体质量分数

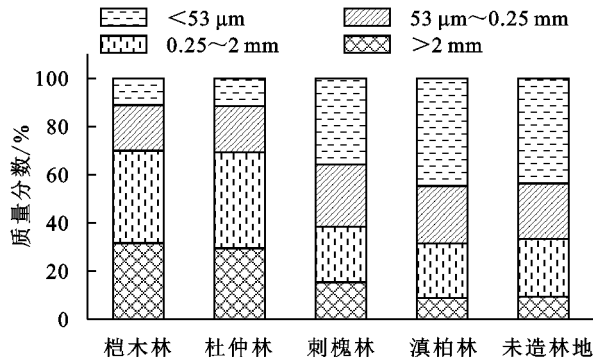


图 2 不同林地 0—30 cm 土层各粒径团聚体质量分数平均值

2.2 不同林地对土壤团聚体稳定性的影响

作为土壤的关键构成部分,其团聚体不仅直接决定着土壤结构的稳定性^[4],在降低水土流失方面效果突出,另一方面能够有效固定有机碳成分,进而促进土壤肥力的保持及提升,能够明显改善土壤质量^[5-6],经过大量实证分析可知,该指标能够作为衡量土壤质量的一个关键指标。本试验对于团聚体稳定性的评价主要通过以下两方面进行:一方面借助于平均质量直径 MWD,另一方面借助于几何平均直径 GMD,通过实证得知,其值越大说明其粒径越大,这也表明其稳定性较高。从图 3 分析不难发现,对于不同林地而言,在土层深度不断增加的情况下,团聚体的稳定性呈现明显的下降水平,而对于对照组来讲恰好相反。从土壤剖面的角度来讲,对于桉木林、杜仲林两种林地而言,其 MWD 值大幅超过其他林地,对于 GMD

来说亦是如此;对于 20—30 cm 土层而言,其值差异明显降低,从另一个角度来讲表层土壤更易受到人类活动影响,这能够从团聚体稳定性方面可以看出。从地表至 30 cm 土层,二者的变化态势基本一致。通过对比分析得知,对于未造林而言,其团聚体的稳定性相对较差,且低于其他 4 种林地,其更容易在雨水的冲刷下被冲散,相反,开展育林之后其稳定性得到了明显提升,能够有效增强土壤稳定性。

2.3 不同林地对土壤微生物对碳源利用强度的影响

在微生物的参与下,加之酶的作用,腐殖质等有机质能够高效地被分解转化成养分,促进了能量循环,关乎土壤理化特性,也成为衡量土壤状况的关键指标之一。不同的微生物群落分布,其碳源利用水平存在较大差异,在衡量过程中主要借助于 AWCD 分析法加以探究,通过对表 1 的分析不难发现,微生物碳源利用水平受到不同林地的显著制约,其碳源利用率虽然有所差异,但是均高于对照组未造林地,且这种差异通过了显著性差异,其中利用率最高的是桉木林地,其次是杜仲林地,且二者的差异并不太大,未能达到显著水平。人工育林的分组下,其主要的碳源不仅包括碳水化合物,还包括羧酸类碳源,而最低的是胺类碳源。

2.4 不同林地对土壤微生物群落多样性的影响

微生物群落多样性指数可用来指示土壤微生物群落利用碳源的程度,根据培养第 100 小时的 AWCD 值计

算土壤微生物群落的物种丰富度指数(H)、均匀度指数(E)、优势度指数(D_s)和碳源利用丰富度指数(S)。由图 4 可知,不同林地土壤微生物群落物种丰富度指数(H)、均匀度指数(E)和碳源利用丰富度指数(S)呈一致的变

化趋势,均表现为造林地显著高于未造林地($p<0.05$),而桉木林和杜仲林最高,二者之间差异不显著($p>0.05$);均匀度指数(E)呈相反的变化趋势,造林地显著低于未造林地($p<0.05$)。

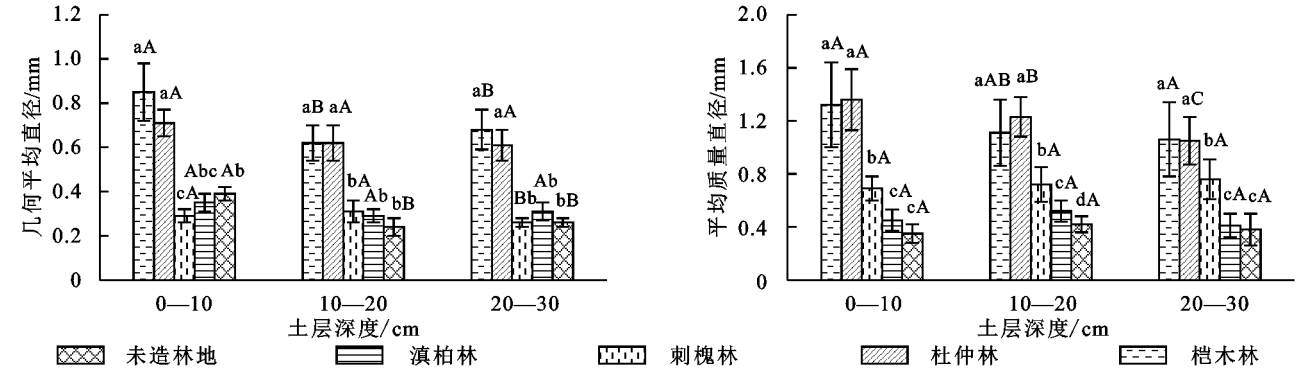


图 3 不同林地土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径

表 1 不同林地土壤微生物对碳源利用强度

林地类型	氨基酸类	碳水化合物类	羧酸类	聚合物类	胺类	酚酸类	氨基酸类
桉木林	0.87±0.05a	1.35±0.21a	1.54±0.31a	0.88±0.03a	0.26±0.02a	0.97±0.05a	0.87±0.05a
杜仲林	0.85±0.04a	1.32±0.24a	1.52±0.27a	0.85±0.05a	0.25±0.04a	0.96±0.03a	0.85±0.04a
刺槐林	0.75±0.02b	1.27±0.25b	1.37±0.31b	0.71±0.04b	0.21±0.02b	0.87±0.04b	0.81±0.08b
滇柏林	0.72±0.07b	1.22±0.22c	1.32±0.36b	0.69±0.06b	0.17±0.05b	0.83±0.09c	0.77±0.06c
未造林地	0.68±0.08c	1.15±0.16d	1.25±0.35c	0.62±0.03c	0.14±0.02c	0.76±0.08d	0.71±0.04d

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

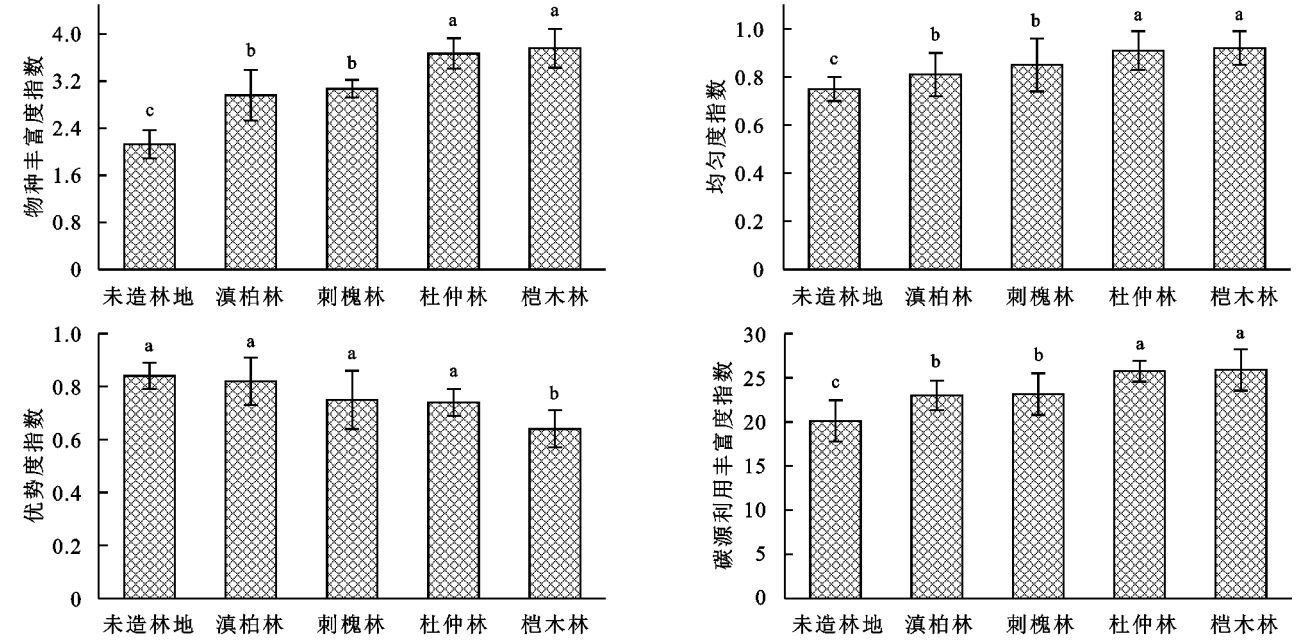


图 4 不同林地土壤微生物群落多样性

2.5 不同林地对土壤呼吸及微生物代谢熵的影响

图 5 为不同林地土壤微生物量和代谢熵,由图可知,不同林地土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷和微生物代谢熵影响显著,其中不同林地土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷和微生物代谢熵呈一致的变化趋势,均表现为造林地显著高于未造林地

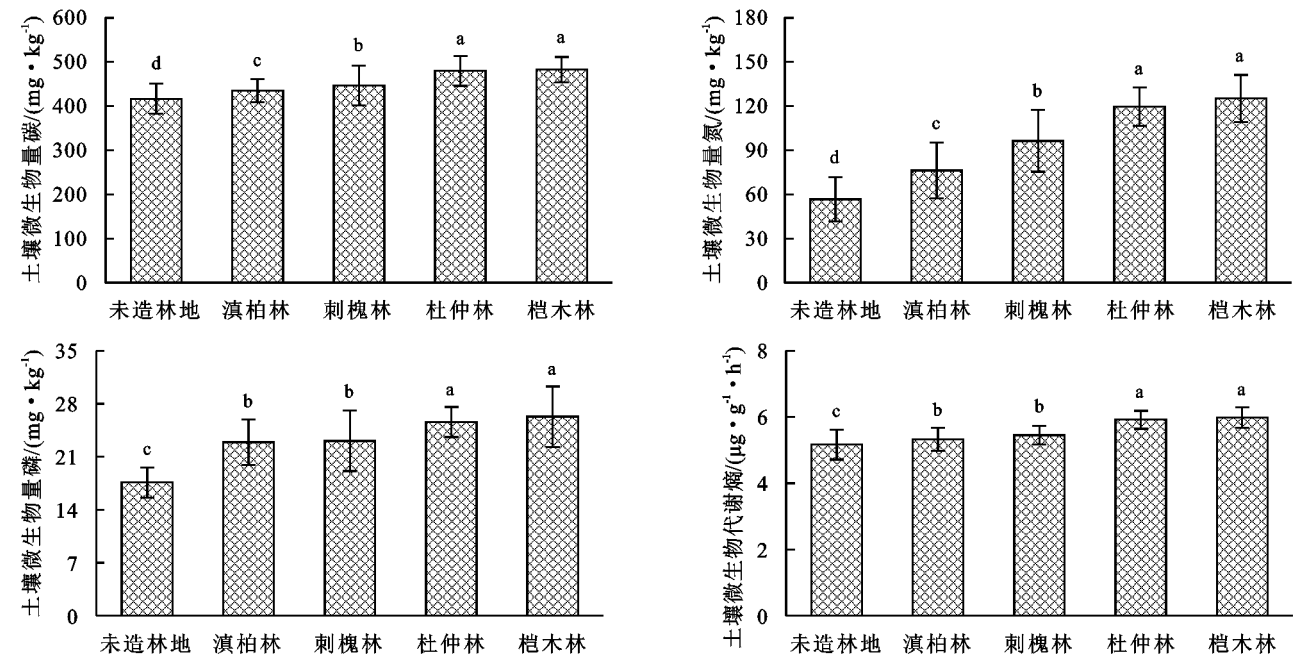
($p<0.05$),而桉木林和杜仲林最高,二者之间差异不显著($p>0.05$)。

2.6 土壤微生物学特性与土壤团聚体的相关分析

相关性分析表明(表 2),氨基酸类、碳水化合物类、羧酸类与大团聚体、中团聚体、MWD 和 GMD 呈显著正相关($p<0.05$);物种丰富度指数(H)、优势度

指数(Ds)、碳源利用丰富度指数(S)与大团聚体、中团聚体呈显著正相关($p<0.05$);微生物量碳、微生物

量碳、微生物代谢熵与微团聚体和粉微团聚体呈显著正相关($p<0.05$)。



注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

图 5 不同林地土壤呼吸及微生物代谢熵
表 2 土壤微生物学特性与土壤团聚体的相关分析

项目	团聚体				MWD	GMD
	大团聚体	中团聚体	微团聚体	粉微团聚体		
氨基酸类	0.566 *	0.567 *	−0.243	−0.167	0.612 *	0.609 *
碳水化合物类	0.589 *	0.535 *	−0.166	0.313	0.605 *	0.702 **
羧酸类	0.654 *	0.515 *	0.421	0.338	0.625 *	0.612 *
聚合物类	0.344	0.216	0.420	0.398	0.401	0.190
胺类	0.210	0.178	−0.254	−0.367	−0.308	−0.217
酚酸类	0.321	0.190	0.211	0.209	0.324	0.198
氨基酸类	0.208	0.156	0.377	0.566 *	0.210	0.315
物种丰富度指数(H)	0.578 *	0.623 *	0.122	0.321	0.166	0.212
均匀度指数(E)	−0.134	−0.209	0.154	0.324	0.218	−0.322
优势度指数(Ds)	−0.546 *	−0.607 *	0.409	0.321	0.267	−0.197
碳源利用丰富度指数(S)	0.798 **	0.734 **	0.109	0.342	−0.156	−0.235
微生物量碳	0.609 *	0.715 **	0.598 *	0.777 **	−0.165	0.299
微生物量氮	0.234	0.198	0.577 *	0.679 *	0.163	0.323
微生物量磷	0.109	0.056	0.322	0.167	0.342	0.178
微生物代谢熵	−0.214	−0.155	0.798 **	0.754 **	0.657 *	0.578 *

注:* 表示 $p<0.05$, ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

微生物能够将腐殖质等有机质高效分解,从而为养分转化奠定基础,而微生物活性影响到期有机质分解效率,在此过程中常借助于平均颜色变化率 AWCD 进行衡量,这也是对碳源利用水平的衡量,借助于该指标不仅能够分析微生物数量,还能够分析其结构特点^[18-19]。对于该指标而言,当其值越大的情况下,不仅说明细菌

具有较大的分布密度,更能说明其活性更强,相反则表明其活性相对较差。通过本研究对比得知,对于 4 种林地而言,其碳源利用效率虽然有所差异,但是均高于对照组未造林地,且这种差异通过了显著性差异,其中利用率最高的是桉木林地,其次是杜仲林地,且二者的差异并不太大,未能达到显著水平。人工育林的分组下,其主要的碳源不仅包括碳水化合物,还包括羧酸类碳源,而最低的是胺类碳源。

对于微生物而言,其碳代谢的影响因素具有多样性,且对于环境的变化具有较强的敏感性,对于其生态环境特征具有明显的表征作用,其中尤为关键的指标不仅包括生物量碳,还包括微生物呼吸^[20-21]。就生物量碳而言,其在有机质中具有明显的高活性,成为土壤活性碳的主要构成,对于该碳物质而言,其不仅具有较快的周转速度,而且环境敏感性较强,能够有效反映土壤碳库变化^[22]。微生物群落分布不仅关系着能量的维系,而且制约着其对有机质的利用水平,这能够通过代谢熵进行有效反映,此外,该指标能够将微生物量碳及活性进行有机结合,从而对微生物活性加以充分体现^[23-24];对于该指标而言,其值越小说明其在呼吸过程中对于碳的消耗量相对较少,而其细胞构造相关的碳会相应增多,其在维系土壤质量方面效果较为突出^[25]。通过实地分析得知,无论是微生物量碳、量氮,还是其磷及代谢熵,其虽然受到不同林地的制约,但是其整体而言均超过对照组,且其差异达到了显著差异,整体而言,其最高的是桉木林地,其次是杜仲林地,且二者的差异并不太大,未能达到显著水平。对于人工育林而言,林木生长过程中会产生一定量的枯枝落叶等凋落物,在微生物的分解下其有机质含量逐渐增多,这对于微生物量碳的增加起着关键作用,同时能够促进微生物呼吸和代谢活动,促进其活性的提升,而在此过程中需要一定的能量维系其代谢活动,对养分利用率得以明显提升。

通过对比分析得知,对于不同林地而言,在土层深度不断增加的情况下,团聚体的稳定性呈现明显的下降水平。从土壤剖面的角度来讲,对于桉木林、杜仲林两种林地而言,其大团聚体明显超过其他林地;从土壤剖面的角度来讲,在土层深度不断上升的情况下,大团聚体的含量呈现明显的下降态势。对于中间团聚体而言,不同林地并未带来较大的差异影响,从土壤剖面的角度来讲,在土层深度不断上升的情况下,其含量并没有较大差异,对于微团聚体来说亦是如此^[26]。对于黏团聚体而言,由于其粒径一般低于 $53\ \mu\text{m}$,不同的林地类型对其产生的影响较为突出,从不同土层的土壤剖面来讲,该类型团聚体含量最高的是滇柏林地,其次是刺槐林,而桉木林含量最低,但是整体而言该类型团聚体均明显高于对照组。为了探究团聚体稳定性与微生物方面存在何种联系,本研究通过开展相关分析发现二者之间的相关性达到了显著水平;对于土壤的碳水化合物及氨基酸来讲,其不仅与大中团聚体息息相关,且与 MWD, GMD 密切相关,这种相关性均为正向,且通过了显著性检验。而微生物量碳及代谢熵不仅仅与微团聚体息息相关,

且与粉微团聚体密切相关,这种相关性均为正向,且通过了显著性检验。

参考文献:

- [1] 荣勤雷,李若楠,黄绍文,等.不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1084-1096.
- [2] 井艳丽,刘世荣,殷有,等.引入固氮树种对辽东落叶松人工林土壤团聚体氨基糖的影响[J].应用生态学报,2018,29(6):1753-1758.
- [3] 白文娟,徐华勤,章家恩.不同培肥措施对土壤团聚体中微生物特性的影响[J].生态环境学报,2018,27(1):24-30.
- [4] 杨磊,王卫超,张风华.开垦对土壤团聚体含量及微生物群落代谢多样性的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):215-222.
- [5] 何玉亭,王昌全,沈杰,等.两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J].中国农业科学,2016,49(12):2333-2342.
- [6] 刘晶,张跃伟,张巧明,等.土地利用方式对豫西黄土丘陵区土壤团聚体微生物生物量及群落组成的影响[J].草业科学,2018,35(4):771-780.
- [7] 李增强,李丹丹,赵炳梓,等.秸秆施用和作物种植对土壤团聚体和微生物群落组成的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1557-1565.
- [8] 李秋嘉,薛志婧,周正朝.宁南山区植被恢复对土壤团聚体养分特征及微生物特性的影响[J].应用生态学报,2019,30(1):137-145.
- [9] 杨华,陈莎莎,冯哲叶,等.土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2080-2085.
- [10] 魏艳,王忠强,张心昱,等.铵态氮和硝态氮添加对亚热带森林土壤团聚体酶活性及微生物群落的影响[J].资源与生态学报,2017,8(3):258-267.
- [11] 邓照亮,陈莎莎,孙敏,等.不同类型短期逆境胁迫对蕉园土壤团聚体组成及酶活性的影响[J].土壤,2018,50(3):485-490.
- [12] 李杨,仲波,陈冬明,等.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[J].应用与环境生物学报,2019,25(5):6-12.
- [13] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳,氮的影响[J].中国土壤与肥料,2018(5):19-23.
- [14] 卢闯,张宏媛,刘娜,等.免耕覆膜增加中度盐碱土团聚体有机碳和微生物多样性[J].农业工程学报,2019,35(21):116-124.
- [15] 郑兴波,张雪,韩士杰.长白山阔叶红松林不同演替阶段土壤团聚体粒径组成及有机碳含量变化[J].应用生态学报,2019,30(5):1553-1562.

- [8] 李娟,葛磊,曹婷婷,等.有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):121-127.
- [9] 舒晓晓,门杰,马阳,等.减氮配施有机物质对土壤氮素淋失的调控作用[J].水土保持学报,2019,33(1):186-191.
- [10] Zhang H, Xu M, Zhang F. Long-term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China[J]. the Journal of Agricultural Science, 2009,147(1):31-42.
- [11] 黄东风,王果,李卫华,等.不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):5-10.
- [12] 王晓龙,李辉信,胡锋,等.红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N, P 流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(5):31-34,55.
- [13] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of *Caragana Korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss [J]. International Journal of Sediment Research, 2010,25(3):245-257.
- [14] 闻轶.稻田氮素流失特征及土壤微生物多样性的研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [15] 姚金玲,张克强,郭海刚,等.不同施肥方式下洱海流域水稻一大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J].农业环境科学学报,2017,36(11):2287-2296.
- [16] 王全九,杨婷,刘艳丽,等.土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J].农业机械学报,2016,47(6):67-82.
- [17] 李盟军,艾绍英,宁建凤,等.不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征[J].农业资源与环境学报,2019,36(1):33-42.
- [18] 华元刚,潘长兵,贝美容,等.橡胶园砖红壤中磷和钾素径流流失特征研究[J].热带作物学报,2012,33(9):1540-1547.
- [19] 刘方,黄昌勇,何腾兵,等.不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J].水土保持学报,2001,15(2):37-40.
- [20] 李顺江,山楠,杜连凤,等.不同施肥模式对土壤氮磷含量及作物吸收特征的影响[J].中国蔬菜,2013(22):59-63.
- [21] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].北京:中国农业大学出版社,1994.
- [22] 董春华,高菊生,曾希柏,等.长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):336-345.
- [23] 颜明娟,林琼,吴一群,等.不同施氮措施对茶叶品质及茶园土壤环境的影响[J].生态环境学报,2014,23(3):452-456.
- [24] 李娟.不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D].杭州:浙江大学,2016.

~~~~~

(上接第 27 页)

- [16] 刘栋,崔政军,高玉红,等.不同轮作序列对旱地胡麻土壤有机碳稳定性的影响[J].草业学报,2018,27(12):45-57.
- [17] 孙娇,赵发珠,韩新辉,等.不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2016,36(21):6879-6888.
- [18] 周学雅,陈志杰,耿世聪,等.氮沉降对长白山森林土壤团聚体内碳、氮含量的影响[J].应用生态学报,2019,30(5):1543-1552.
- [19] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等.废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J].环境科学学报,2016,36(8):3000-3008.
- [20] 蔡晓布,彭岳林.西藏退化高寒草原土壤团聚体有机碳的变化特征[J].环境科学研究,2018,31(2):310-319.
- [21] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.
- [22] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):1156-1167.
- [23] 曹伟,李露,赵鹏志,等.坡地黑土碳氮分布及其与团聚体稳定性的关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):56-63.
- [24] 安婉丽,高灯州,潘婷,等.水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J].环境科学学报,2016,36(5):1833-1840.
- [25] 陆太伟,蔡岸冬,徐明岗,等.施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2183-2193.
- [26] 安艳,姬强,赵世翔,等.生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J].环境科学,2016,37(1):293-300.