

红壤区植被恢复团聚体 POC 变化归因分析

刘晓君^{1,2}, 高盼^{1,2}, 潘俊³, 白天军^{1,2}, 刘苑秋^{1,2}, 方向民^{1,2}, 曹雯^{1,2}

(1.江西农业大学林学院,鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,南昌 330045;
2.江西省森林培育重点实验室,南昌 330045;3.北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083)

摘要: 研究植被恢复条件下土壤水稳性团聚体颗粒有机碳的分布特征及影响因素,为退化红壤区生态系统重建与土壤质量改善提供理论依据。在江西省泰和县植被恢复与重建基地,选取立地条件基本一致的马尾松纯林、湿地松纯林、木荷纯林、马尾松补植木荷、湿地松补植木荷、湿地松—木荷原始混交林 6 种恢复模式,于 2019 年通过调查取样和试验分析,探索不同植被恢复模式土壤各粒级水稳性团聚体颗粒有机碳(POC_{agg})、土壤物理化学性质变化特征及相互关系。结果表明:(1)退化红壤以水稳性大团聚体(>0.25 mm)为主(百分比含量为 87%),木荷纯林、马尾松补植木荷林土壤大团聚体含量最低。表层(0—10 cm)土壤 POC_{agg} 受恢复模式影响最显著($P<0.05$),以湿地松纯林 POC_{agg} 含量为最高(14.44 g/kg);(2)土壤物理化学性质因恢复模式的不同而呈显著性差异,其中湿地松补植木荷林下土壤有机质(SOM)、木荷纯林下土壤全氮(TN)、湿地松纯林下土壤全磷(TP)含量分别为最高;(3)人工针叶纯林中团聚体组成对 POC_{agg} 影响最大,团聚体组成、SOM 和 TN 是影响 POC_{agg} 的重要因素($P<0.01$),且土层越深关联度显著增加($P<0.01$);其中微团聚体(<0.25 mm)POC_{agg} 受其直接或间接效应均较高,TN 在<0.053 mm 粒级团聚体 POC_{agg} 的影响最大。木荷纯林能明显改善土壤结构和肥力,且湿地松对林下土壤养分尤其是 POC_{agg} 固持能力较高。结合退化红壤区生态修复实践,以湿地松纯林作为先锋树种进行植被恢复,抚育过程中补植木荷可能会更好地改善土壤性质。

关键词: 植被恢复; 水稳性团聚体; 颗粒有机碳; 退化红壤

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)02-0217-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.029

Factor Analysis of Particulate Organic Carbon Changes in Soil Aggregates with Vegetation Restoration in Degraded Red Soil Regions

LIU Xiaojun^{1,2}, GAO Pan^{1,2}, PAN Jun³, BAI Tianjun^{1,2},

LIU Yuanqiu^{1,2}, FANG Xiangmin^{1,2}, CAO Wen^{1,2}

(1.College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Nanchang 330045; 2.Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, Nanchang 330045;
3.College of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: The aim of this study was to quantitative analyze the effect of influence factors on particulate organic carbon in soil water-stable aggregates (POC_{agg}) with different vegetation recovery patterns in degraded red soil area. It could provide theoretical basis for ecosystem reconstruction and soil quality improvement in degraded red soil area. The vegetation restoration and reconstruction base in Taihe County, Jiangxi Province was selected to explore the POC_{agg} variation, establish the correlation of POC_{agg} and other physicochemical properties. The research object included six vegetation restoration patterns which were *Pinus massoniana* Lamb. pure forest (PM), *Pinus elliottii* pure forest (PE), *Schima superba* Gardn. et Champ. pure forest (SS), *Pinus massoniana* replanting *Schima superba* (RMS), *Pinus elliottii* replanting *Schima superba* (RES) and virgin mixed forest of *Pinus elliottii* replanting *Schima superba* (MES). The results showed that: (1) The degraded soil was mainly of water-stable macro-aggregate (>0.25 mm, accounting for 87%). The contents of macro-aggregates in SS and RMS were the lowest. POC_{agg} in the surface soil (0—10 cm) was

收稿日期: 2020-08-27

资助项目: 江西省教育厅科技计划项目(GJJ170252)

第一作者: 刘晓君(1988—), 女, 山东泰安人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与养分流失、森林生态学研究。E-mail: lxj-2016@jxau.edu.cn

通信作者: 刘晓君(1988—), 女, 山东泰安人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与养分流失、森林生态学研究。E-mail: lxj-2016@jxau.edu.cn

most significantly affected by the recovery patterns ($P < 0.01$), which was the highest (14.44 g/kg) in topsoil of PE. (2) The soil physical and chemical properties showed significant differences due to the recovery patterns, among which the contents of organic matter (SOM), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were the highest in the topsoil of RES, SS and PE, respectively. (3) The aggregate composition in artificial coniferous pure forest had the greatest influence on POC_{agg} . The grey correlation analysis showed that aggregate composition, SOM and TN were the important factors influencing POC_{agg} ($P < 0.01$), and the correlation increased significantly in deeper soil layer ($P < 0.01$). Path analysis showed that the direct and indirect effects of each factor on POC in micro-aggregates (< 0.25 mm) were significant. TN in < 0.053 mm aggregates had the greatest effects on POC_{agg} . SS could significantly improve soil structure and fertility, and PE had higher retention capacity for soil nutrients, especially POC_{agg} . Combined with the practice of ecological restoration in degraded red soil area, it should improve soil properties better by planting PE as a pioneer and then replanting SS in the tending process.

Keywords: vegetation restoration; water-stable aggregates; particulate organic carbon; degraded red soil

南方红壤丘陵区地处热带与亚热带气候区,雨量充沛且多表现为季节性的集中分布,径流过程明显,加之长期人为不合理利用土地资源,导致土壤侵蚀严重,生态系统退化^[1]。而在这个退化过程中,土壤结构发生变化,最关键的特征就是土壤团聚体的破坏和失调^[2]。作为土壤结构的基本单元,团聚体在改善土壤结构、提高肥力水平、降低水土流失、调控植被生长方面都发挥了重要作用^[3]。红壤丘陵区发生土地质量退化,与不同粒级团聚体相结合的土壤有机碳(SOC)含量及稳定性也随之不同,从而影响了土壤生态系统的地球化学循环过程。

“七五”以来,基于植草、造林等技术的植被恢复与重建在退化红壤区被广泛推行,不仅可以有效减缓水土流失,防治土地退化,而且起到了良好的生态保护功能。针对红壤丘陵区退化土地治理^[4-5]、水土—养分流失动态演变及防治^[6-7]等方面的研究逐步开展。如何根据当地立地环境条件,快速有效地优化植被恢复模式,改善土壤生态系统恶性发展的现状是退化土地治理的关键。因此植被恢复过程中,学者们针对土壤质量和结构的改变,尤其是土壤团聚体状况^[8-9]、有机碳组分及周转^[10-11]等方面均做了一定的研究。然而退化红壤区不同植被恢复模式对土壤团聚体中养分元素的动态机制研究相对较少。尤其是在团聚体中的活性有机碳组分,虽然占 SOC 总量的比例相对非活性 SOC 少,但它作为土壤生态系统中重要的能量来源之一,对维持土壤碳贮量及肥力水平具有举足轻重的作用^[12]。土壤颗粒态 SOC(particulate organic carbon, POC),即 $> 53 \mu\text{m}$ 的土壤 SOC,其特点是腐殖化程度较低,是动、植物残体向腐殖质转化的过渡产物。因而 POC 对植被恢复模式及管理措施等有较为敏感的反应^[13],使其成为揭示植被恢复对土壤碳库贮存^[14]和土壤结构^[15]的重要指标。Damien 等^[16]认

为,相比于土壤 SOC,POC 对不同耕作方式和管理措施有更敏感的变化。因此,本文以南方退化红壤的典型植被恢复与重建基地为研究区,开展不同恢复模式的团聚体颗粒有机碳(POC_{agg})相关研究,研究土壤团聚体及其 POC_{agg} 的空间分布特征,探讨 POC_{agg} 与土壤环境因子的响应关系,试图以土壤 POC_{agg} 为视角,理解与揭示南方退化红壤区植被恢复条件下土壤生态化学过程,为构建与优化植被恢复技术体系和红壤丘陵区的水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泰和县植被恢复基地($26^{\circ}54' - 26^{\circ}55' \text{N}$, $114^{\circ}48' - 114^{\circ}49'$)位于江西省中南部,总面积 133.3 hm^2 ,隶属于泰和县石山乡的狗丝茅岭。所属县境受典型亚热带湿润季风气候影响,水热资源丰富,年平均气温 18.6°C ,无霜期 281 d,年平均降水量 $1\,726 \text{ mm}$,且主要为集中暴雨,多发生在 4—6 月。研究区土壤母质为第四纪红土,由此发育而来的红壤山地丘陵区,由于长期过度放牧、砍伐等不合理的人为活动,导致该区植被稀少,水土流失严重。

1990 年,为实现江西省政府“消灭荒山,绿化江西”的目标,解决困难地带造林技术的难题,江西农业大学林学院牵头开展江西省科委重点项目“江西省低丘陵荒山绿化生态经济模式研究”,在赣县、泰和、乐安、修水、弋阳、余江、景德镇、进贤、萍乡等 9 个县(市)开展了不同退化荒山类型、不同恢复措施和模式的森林恢复与重建试验,建立 640 hm^2 试验林,其中泰和县植被恢复面积 133.3 hm^2 。研究区初植树种有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、湿地松(*Pinuselliottii*)、枫香(*Liquidambar formosana* Hanc.)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、黑荆(*Acacia*

mearnsii De Wilde.)、油桐 (*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw)、火炬松 (*Pinus taeda* L.) 及其混交林等,并于 2006 年在马尾松纯林及湿地松纯林补植木荷。

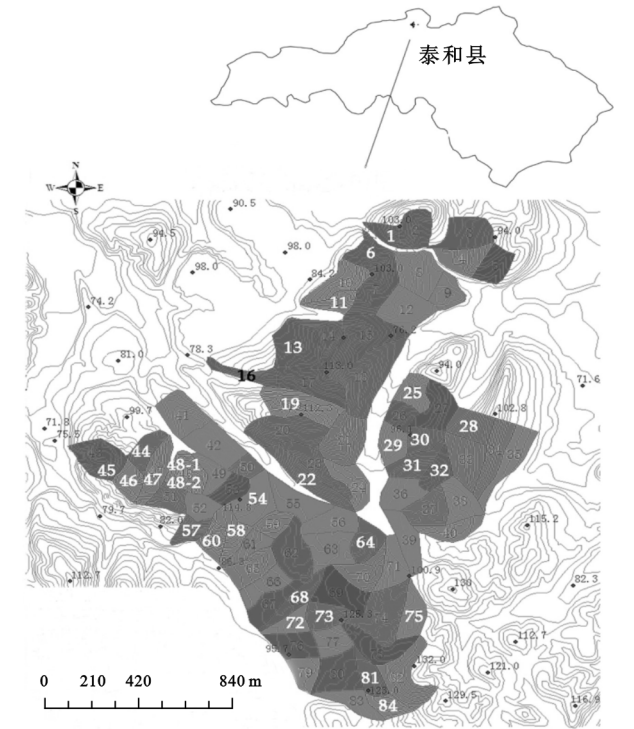
1.2 典型样地选取

于 2019 年 7 月进行野外调查及土壤样品采集,采样前 1 个星期天气晴朗,气温 29~38 ℃。选取马尾松纯林(PM)、湿地松纯林(PE)、木荷纯林(SS)、马尾松补植木荷林(原马尾松纯林,后补种木荷,RMS)、湿地松补植木荷林(原湿地松纯林,后补种木荷,RES)、湿地松与木荷原始混交林 6 种人工林恢复模式(MES),小斑号见图 1,样地信息见表 1。每种植被恢复模式选取 5 个样地作为重复,在各个样地内设置 20 m×20 m 样方,土壤样品分 0—10,10—20,20—40 cm 3 个土层,在样方内按照“S”形设置 5 个采样点,按照“随机”“等量”和“多点混合”的原则采集共 90 个土样(6 种恢复模式×5 个重复×3 个土层),尽量避免挤压,装入铝盒中带回实验室进行分析。

1.3 样品采集与分析

土壤容重采用环刀取 100 cm³ 原状土于 105 ℃ 烘干测定,并计算孔隙度。土壤 pH 采用 pH 酸度计 (PHS-3E)测定($m_{\text{土}}:m_{\text{水}}=1:2.5$),将硬塑料盒中的土壤样品中砾石、侵入体及粗有机体检出,并在风干过程中沿自然断裂面掰成 10 mm 大小的土块。去除杂物后的风干土样过 2 mm 土壤筛。用干筛法分离出>2,0.25~2,0.053~0.25,<0.053 mm 范围的土壤颗粒,按照各粒径所占比例进行配比,称取 60.0 g 风干土进行湿筛。将配比好的样品放置于包含 4 个粒级的套筛上(自上而下粒径依次减小),用水湿润后,放入水中振荡 15 min,振荡频率为 30 次/min,

结束后洗入铝盒烘干后称重、记录并计算各粒级水稳性团聚体含量,研磨后过 0.149 mm 尼龙筛备用。>2,0.25~2,0.053~0.25,<0.053 mm 各粒级团聚体的颗粒有机碳(POC_{agg})含量通过 5 g/L 六偏磷酸钠溶液进行分离提取^[19],有机质(SOM)含量采用重铬酸钾氧化—外加热法测定,全氮(TN)、全磷(TP)含量采用全自动间断化学分析仪(Smartchem200)测定。



注:图中数字为采样点;马尾松纯林 PM 为 25,30,44,64,81;湿地松纯林 PE 为 11,19,48-1,48-2,84;木荷纯林 SS 为 28,29,54,72,75;马尾松补植木荷林 RMS 为 22,57,58,60,73;湿地松补植木荷林 RES 为 1,6,13,31,32;湿地松林荷混交林 MES 为 16,45,45,47,68。

图 1 研究区示意

表 1 不同植被恢复模式样地基本状况

植被恢复模式	胸径/ cm	树高/ m	断面积/ cm ²	林分密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	林下植被 盖度/%
马尾松纯林	11.40±0.75	7.39±0.26	17.16±2.56	1650±77	0.50±0.16	51±13
湿地松纯林	17.32±2.05	8.98±0.74	18.45±2.83	825±159	0.56±0.04	38±5
木荷纯林	0.12±0	9.18±0.24	19.97±1.17	1870±107	0.87±0.01	39±7
马尾松补植木荷林	14.08±0.36	8.39±0.33	20.70±3.24	1312±169	0.73±0.08	71±7
湿地松补植木荷林	13.64±0.47	8.33±0.63	15.33±1.55	1068±146	0.59±0.07	68±6
湿地松木荷混交林	14.18±0.45	7.91±0.51	26.02±1.67	1315±175	0.72±0.13	45±8

注:表中数据为平均值±标准差。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2010 将试验数据整理后,以 SPSS 22 软件为统计平台,进行单因素方差分析(one-way ANOVA)不同数据间的差异特征,采用 Pearson 相关性分析、灰关联分析、通径分析等定量研究植被恢复条件下土壤 POC 的影响因素。使用 Origin 8.5 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同恢复模式土壤水稳性团聚体及颗粒有机碳

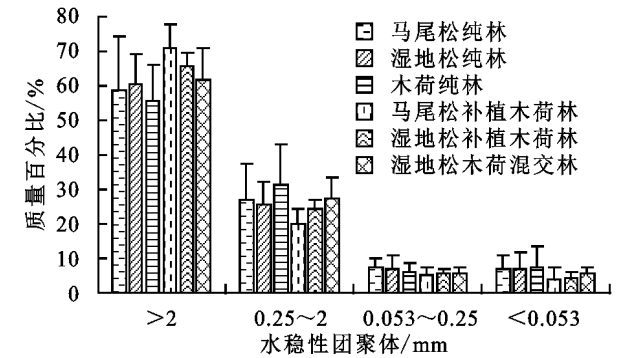
由图 2 可以看出,该区表层土壤水稳性团聚体多分布在>2 mm 粒径中,>2,2~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 粒径范围水稳性团聚体平均含量分别为 59.54%,27.88%,6.76%,5.82%。随着粒径的减小,

其百分比含量逐渐减小,且不同粒径水稳性团聚体的百分比含量呈显著差异($P<0.05$)。在同一粒径范围内,恢复模式对水稳性团聚体没有显著影响($P>0.05$),各恢复模式下土层对团聚体影响差异不显著($P>0.05$)。

在表层,土壤 POC 表现为湿地松纯林>湿地松木荷混交林>木荷纯林>马尾松补植木荷林>湿地松补植林>马尾松纯林(表 2)。其中湿地松纯林表土层中 POC 含量(均值为 14.440 g/kg)显著高于其他恢复模式($P<0.05$),而同样作为纯林的马尾松样地,其 POC 含量最低(均值仅为 4.131 g/kg),仅为湿地松纯林 POC 含量的 28.6%。不论是原始混交林或者补植林,其对土壤 POC 影响差异不显著,但原始混交林中 POC 含量仍高于补植林。

随着土层深度的增加,POC 含量显著降低($P<0.05$),表土层(0—10 cm)POC 含量显著高于深层土

壤(20—40 cm)。10—20 cm 土壤与 20—40 cm 土壤 POC 含量无显著差异,且深层土壤(10—20,20—40 cm 土层)POC 受恢复模式影响差异不显著。



注:大写字母表示不同恢复模式对同一粒径范围水稳性团聚体的影响差异($P<0.05$);小写字母表示相同恢复模式中各粒径团聚体间的差异($P<0.05$)。

图 2 不同恢复模式表层土壤水稳性团聚体

表 2 不同恢复模式土壤 POC 含量

土层 深度/cm	马尾松纯林 PM/ (g · kg ⁻¹)	湿地松纯林 PE/ (g · kg ⁻¹)	木荷纯林 SS/ (g · kg ⁻¹)	马尾松补植木 荷林 RMS/ (g · kg ⁻¹)	湿地松补植木 荷林 RES/ (g · kg ⁻¹)	湿地松木荷混 交林 MES/ (g · kg ⁻¹)
0—10	4.131Ab	14.440Aa	7.671Aa	7.497Aab	4.738Aab	9.166Aa
10—20	1.471Ba	1.260Ba	1.749Ba	1.649Aa	1.717Ba	1.281Ba
20—40	1.158Ba	1.129Ba	1.530Ba	1.340Ba	1.488Ba	0.873Ba

注:表中大写字母表示土层间差异显著($P<0.05$);小写字母表示不同恢复模式间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同恢复模式土壤的理化性质

恢复模式对退化红壤的理化性质有显著影响(表 3),且不同恢复模式对各土壤因子影响作用不同($P<0.05$),其中阔叶纯林(木荷)及与湿地松补植木荷林、混交林对土壤性质(TP 除外)的改善(尤其是土壤表层)相对较明显。木荷纯林显著降低土壤容重,因而其孔隙度值也相应地表现为最高,同时显著提高土壤 TN 含量。因此土壤表层 TN 含量依次为木荷纯林、湿地松木荷混交林>湿地松纯林>湿地松补植木荷林>马尾松补植木荷林>马尾松纯林。湿地松—木荷林分下土壤酸性状况改善较明显,且 SOM 含量最高。表层 SOM 含量依次为湿地松补植木荷林>湿地松木荷混交林>木荷纯林、湿地松纯林>马尾松补植木荷林>马尾松纯林。外来树种湿地松纯林下土壤 TP 含量显著高于其他恢复模式,而本地树种马尾松纯林模式及马尾松补木荷模式下对土壤各理化性质均未表现出明显的改良作用。

2.3 土壤因子对土壤 POCagg 的影响

2.3.1 不同恢复模式 POCagg 与土壤因子相关性分析 对研究区不同恢复模式的土壤表层 POCagg 及其土壤因子相关分析可知,人工针叶纯林的恢复模式下,水稳性团聚体对土壤 POCagg 的影响最显著(表 4)。马尾松纯林恢复模式下,大团聚体(>2 mm)与土壤 POCagg 达

到显著负相关(-0.504),而微团聚体则对土壤 POCagg 的形成表现出促进作用,尤其是 2~0.25 mm 团聚体与土壤 POCagg 的正相关关系达到极显著水平($P<0.01$)。与之不同的是,湿地松纯林恢复模式下>2 mm 水稳性团聚体对土壤 POCagg 的影响并不显著,而 2~0.053 mm 团聚体与土壤 POCagg 呈显著负相关($P<0.05$),小颗粒水稳性团聚体(<0.053)则能够明显促进土壤 POCagg 的形成($P<0.01$)。在其他恢复模式中,仅马尾松补木荷下有 2~0.25 mm 颗粒范围的团聚体与土壤 POCagg 呈极显著负相关关系。马尾松补植木荷恢复模式下,土壤结构对 POCagg 的影响相对较大,均呈显著相关($P<0.05$)。由于恢复模式的不同,马尾松纯林和木荷纯林林下土壤 pH 对 POCagg 呈现相反的影响作用,且均达到显著水平($P<0.05$)。与前文结果类似,在土壤养分因子中,SOM 和 TN 对土壤 POCagg 的影响最显著,其中又以湿地松纯林恢复模式下相关系数最大,分别为 0.918 和 0.851($P<0.01$)。

2.3.2 土壤因子对土壤 POCagg 的灰关联分析 由于土壤 POCagg 与土壤各因子之间的关系介于已知与未知之间,即可将其定义为灰色关系。以土壤 POCagg 作为母因素,土壤团聚体等其他物理化学性质作为子因素,组成子序列:土壤 POCagg = {土壤各粒级团聚体组成,容重,孔隙度,pH,SOM,TN,TP}。灰关联

分析结果表明,土壤团聚体组成、SOM 和 TN 对土壤 POC_{agg}的影响最大($P<0.01$),依次为 SOM>TN>团聚体组成(图 3)。随着粒径的减小,3 个土壤因子与 POC_{agg}的关联度逐渐增加,而随着土层厚度的增加,土壤因子与 POC_{agg}的关联度也呈现增加趋势,表土层与 10—

20,20—40 cm 土层灰关联度差异显著($P<0.01$)。在这个过程中尤以<0.053 mm 团聚体与 POC_{agg}的灰关联度随土层的增加趋势最明显,深层土壤(20—40 cm)的 0.053~0.25 mm 团聚体组成对土壤 POC_{agg}的形成具有最强的促进作用,成为优势因素。

表 3 不同恢复模式土壤物理化学性质

恢复 模式	土层 深度/cm	容重/ (g · cm ⁻³)	孔隙度/%	PH	SOM/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)
马尾松纯林 PM	0—10	1.339ab	49.459abc	5.066abc	37.599cdef	0.978cde	0.198cd
	10—20	1.470ab	44.528bc	5.104abc	19.612f	0.571e	0.182d
	20—40	1.434ab	45.874bc	5.078abc	30.014def	0.815cde	0.231abcd
湿地松纯林 PE	0—10	1.454ab	45.110bc	4.920c	56.317abc	1.692ab	0.349a
	10—20	1.436ab	45.808bc	5.228ab	20.624f	0.729de	0.320abc
	20—40	1.413ab	46.679abc	5.038bc	37.132cdef	1.072cd	0.344ab
木荷纯林 SS	0—10	1.200c	54.720a	5.124abc	56.429abc	1.862a	0.232abcd
	10—20	1.470ab	44.546bc	5.158abc	30.655cdef	1.020cde	0.189d
理化性质	20—40	1.449ab	45.319bc	5.098abc	46.699bcde	0.975cde	0.182d
马尾松补植木荷林 RMS	0—10	1.287b	51.417ab	5.016bc	50.890abcd	1.303bc	0.247abcd
	10—20	1.396ab	47.332abc	5.082abc	31.211cdef	0.664de	0.230abcd
	20—40	1.465ab	44.713bc	5.036bc	42.519bcdef	0.668de	0.225bcd
湿地松补植木荷林 RES	0—10	1.465ab	44.728bc	5.306a	76.113a	1.547ab	0.263abcd
	10—20	1.538a	41.948bc	5.270ab	24.392ef	0.680de	0.265abcd
	20—40	1.534a	42.129c	5.220ab	31.673cdef	0.884cde	0.285abcd
湿地松木荷混交林 MES	0—10	1.267b	52.180ab	4.958bc	64.996ab	1.860a	0.206cd
	10—20	1.520a	42.641c	5.182ab	21.061ef	0.702de	0.220cd
	20—40	1.357ab	48.776abc	5.044bc	27.623def	0.862cde	0.186d

注:表中标下划线数据表示与其他模式相比差异最显著的数据;不同小写字母表示不同恢复模式间的土壤理化性质间差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同恢复模式表层 POC_{agg}与土壤因子相关性

恢复模式	水稳性团聚体/mm				容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	PH	SOM/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)
	>2	2~0.25	0.25~0.053	<0.053						
马尾松纯林 PM	-0.504 *	0.589 **	0.467 *	0.226	0.368	-0.368	0.460 *	0.622 **	0.593 **	0.419
湿地松纯林 PE	0.218	-0.565 *	-0.580	0.884 *	-0.271	0.270	0.171	0.918 **	0.851 **	0.249
木荷纯林 SS	0.237	-0.291	-0.051	0.124	0.031	-0.032	-0.535 *	0.492 *	0.238	0.024
马尾松补植木荷林 RMS	0.304	-0.734 **	0.022	-0.129	-0.468 *	0.467 *	-0.263	0.751 **	0.751 **	0.422
湿地松补植木荷林 RES	-0.091	0.387	-0.251	-0.266	-0.044	0.044	0.010	0.732 **	0.741 **	0.217
湿地松木荷混交林 MES	-0.168	0.101	0.447	-0.023	-0.027	0.028	-0.293	0.523 *	0.886 **	0.020

注: ** 表示相关关系水平为 0.01; * 表示相关关系水平为 0.05。

2.3.3 土壤因子对土壤 POC_{agg}的 通径分析 由于所选取的土壤因子属性范围不一,借助传统的逐步回归方法不能直接比较哪种因子对土壤 POC_{agg}的影响最显著。通径分析则是传统回归分析方法的延续,通过标准化回归系数法将相关系数分解为直接通径系数、间接通径系数和总通径系数,比较其大小和显著水平分别反映某变量对因变量的直接作用、通过其他变量对因变量间接作用以及综合作用,剩余通径系数较大则表示另有其他重要因子未考虑。

由表 5 可知,大颗粒团聚体中(>0.25 mm)SOM 和 TN 对土壤 POC_{agg}表现的直接正效应相对较小,并且

TN 对土壤 POC_{agg}的影响更多地取决于其在其他土壤因子的间接效应上(剩余通径系数 0.501)。而微团聚体(<0.25 mm)中各因子对土壤 POC_{agg}的直接通径系数相对较大,其中 0.25~0.053 mm 团聚体中 SOM 对土壤 POC_{agg}的直接正效应最高,达到 0.611,且在该范围的土壤颗粒中,SOM 通过其他因子控制土壤 POC_{agg}含量的效应也最大(0.945),而 TN 也更多的通过控制 SOM 对土壤 POC_{agg}造成了间接的正效应。在<0.053 mm 颗粒团聚体中,TN 对土壤 POC_{agg}的直接正效应最大(0.923),其通过控制其他土壤因子对土壤 POC_{agg}的影响也达到最大(1.018),另外在<0.053 mm 颗粒范围的土壤中,

SOM通过控制 TN 对土壤 POC_{agg} 造成的影响也不可忽略(0.807)。同时,随着粒径范围的减小,团聚体对土壤

POC_{agg} 的影响逐渐从直接负效应转变为直接正效应,且系数逐渐增大,这与本文前 2 节研究结果一致。

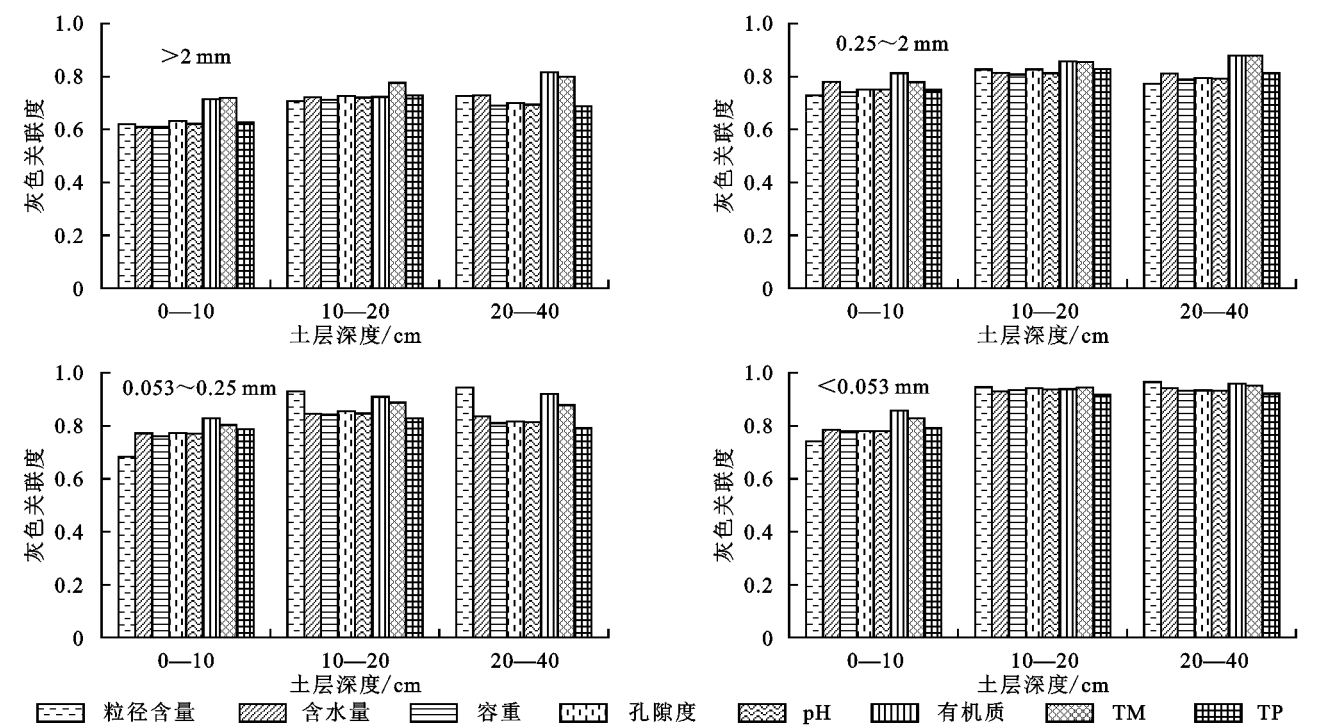


图 3 表层土壤因子对土壤 POC_{agg}影响的灰关联分析

表 5 土壤 POC_{agg}与土壤环境因子的通路分析

系数	>2 mm			2~0.25 mm			0.25~0.053 mm			<0.053 mm		
	团聚体	SOM	TN	团聚体	SOM	TN	团聚体	SOM	TN	团聚体	SOM	TN
相关系数	0.145	0.561	0.610	-0.205	0.574	0.601	-0.245	0.770	0.730	0.147	0.755	0.817
直接通路系数	-0.037	0.345	0.361	-0.057	0.345	0.361	0.003	0.611	0.044	0.212	0.023	0.923
剩余通路系数	-0.024	0.235	0.501	0.035	0.182	0.135	-0.004	0.945	0.078	-0.086	0.024	1.018
	—	-0.005	-0.014	—	0.013	0.013	—	-0.001	-0.001	—	0.009	-0.017
间接通路系数	0.050	—	0.219	-0.020	—	0.075	-0.223	—	0.547	0.001	—	0.020
	0.135	0.230	—	-0.105	0.417	—	-0.016	0.039	—	-0.075	0.807	—

3 讨论

3.1 植被恢复对土壤性质的影响

植被恢复对生态系统尤其是土壤的改良具有重要意义,众多国内外学者^[17-18]研究显示,植被恢复通过利用植物—土壤复合系统功能改善了土壤理化性质。不论对不同地区如黄土丘陵区^[19]、红壤丘陵区^[20]、风沙区^[21]或矿区^[22],或是对不同生态系统如农田、草地^[23]等进行研究均发现,植被恢复的合理规划 and 人为抚育管理在生态系统中发挥了重要作用。土壤团聚体对植被的响应,因植被带的不同呈现显著差异,而恢复模式对土壤团聚体的作用不一^[24]。由于凋落物分解后将养分回归土壤的过程多集中在土壤表层^[25],随土层深度的增加,这一养分归还过程逐渐减弱。为此收集测定本研究 6 种恢复模式的林下枯落物(图 4)发现,木荷纯林及马尾松补植木荷林 2 种模式枯落物明显少于其他模式($P<0.05$),从而影响了其对土壤中输入有机质、改良土壤结构的过程,

其林下土壤大团聚体的形成也较少(图 2)。各植被恢复模式间凋落物分解的质、量和速度均有所差异^[26],阔叶纯林(木荷)下枯落物量虽然最低,但仍然对土壤结构改善作用表现最显著,即孔隙度最大,容重最小。阔叶林较大的冠幅和较好的湿热条件,可为土壤微生物生长提供充足的底物和次生有机化合物,从而加快凋落物分解,促进土壤肥力的积累。因此有阔叶乔木出现的植被恢复模式中(木荷纯林、湿地松补植木荷林及木荷—湿地松混交林),表层土壤的 TN 及 SOM 达到最高值(表 3)。而本研究区湿地松纯林表层土壤 TP 达到最大值,即该种林分类型下土壤对磷素的固持能力相对较高。倪晓薇等^[27]对贵州林场的黄壤研究也发现,马尾松人工林土壤养分含量明显低于湿地松人工林,其对此结果的解释为马尾松对土壤养分利用效率和渴求较高。而这种本地树种(马尾松)林下土壤养分含量和熟化程度较低,具体的机理如何,生态学意义何在,仍需要进一步探讨研究。综上所述,木荷纯林虽然枯落物少,不能较好促进大

团聚体的形成,但仍能明显改善土壤结构和肥力,且湿地松对林下土壤养分固持能力较高。结合退化红壤区生态修复实践,以湿地松纯林作为先锋树种进行植被恢复,抚育过程中补植木荷可能会更好地改善土壤性质,提高碳库稳定性和储量。

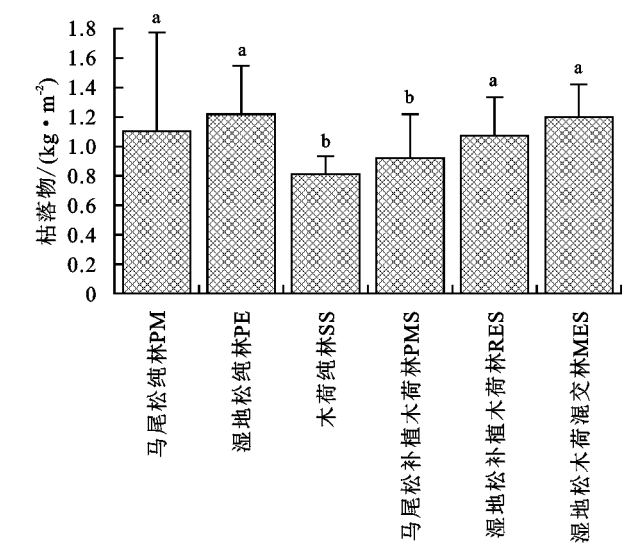


图 4 不同植被恢复模式枯落物特征

3.2 土壤 POC_{agg} 的环境因子响应

土壤碳库的稳定性很大程度上取决于 POC 的含量及其分布,本研究以植被恢复为背景,研究土壤 POC_{agg} 的环境因子响应。其中植被是影响土壤质量和肥力的关键因素。Ahmed 等^[28] 对美国多个州的 650 个土样分析发现,植被是影响土壤 POC 的决定性变量之一,但目前我国关于植被恢复对于土壤 POC 影响机制方面的报道仍较少。事实上,土壤 POC 含量及其分布受众多因素的影响,在不同植被恢复模式下,土壤 POC 尤其是不同粒级水稳性团聚体中的 POC 究竟对环境因子的响应如何,各个因素之间的影响差异等成为本研究关注的重点。由于土壤 POC 对土地利用和管理措施的敏感性,本研究选择以其为指标,研究退化红壤区不同植被恢复模式对土壤质量的影响差异,其中针叶纯林类型下,土壤团聚体与 POC_{agg} 的表现出较强的相关性。图 4 中同样显示针叶纯林下枯落物含量较高,使得在团聚体形成过程中,枯落物分解、根系分泌物衍生的土壤 POC 及微生物产物会在土壤颗粒表面结壳,从而增加团聚体稳定性,并使 POC 保持在团聚体内部^[29],因此呈现出湿地松纯林土壤 POC_{agg} 含量最大。而所有恢复模式的团聚体 SOM 和团聚体 TN 均与 POC_{agg} 有显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关性(表 4),这与 Debasish 等^[29] 研究结果一致。从土壤物理性质、化学性质、恢复模式等环境因子中,提取出退化红壤区植被恢复背景下影响土壤 POC_{agg} 的三大关键指标,即土壤团聚体组成、SOM 和 TN(图

3)。本文研究发现,深层土壤团聚体组成对 POC_{agg} 影响作用最大,这可能是因为表层土壤受外界环境影响剧烈,而 20—40 cm 土壤微生物、根系等活动相对稳定,从而保证团聚体对 POC_{agg} 的持续固持作用。而这种固持土壤 POC 的作用,在不同粒级的团聚体中有所差异,本文通过 POC_{agg} 与土壤环境因子的通径分析发现,在小粒级的水稳性团聚体中(<0.25 mm),SOM 和 TN 对土壤 POC_{agg} 的直接和剩余通径系数均较大(表 5)。有研究^[30] 显示,粉粒(0.053~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)的 POC_{agg} 对于立地类型的改变较敏感,且粉、黏粒级土壤团聚体更不容易被破坏,所以微团聚体对于土壤 POC 的固存能力较高。而在这一粒级里影响 POC_{agg} 的主要因素是 SOM 和 TN,类似的结果在 Lou 等^[31] 的研究中也有发现。微团聚体(<0.25 mm)SOM 和 TN 的增加,可能导致微生物和微动物群更活跃,从而使得 SOM 和 TN 对土壤 POC_{agg} 表现出直接或间接的正效应。有研究^[32] 显示,土壤 POC 是由根系残积物、动植物残体等向腐殖质过渡的活性有机碳,根源性的 POC 与微生物产物结合便形成了新的微团聚体^[33]。因此 SOM 在 0.053~0.25 mm 粒级团聚体中的影响,更多地体现在本文未考虑的因素对 POC_{agg} 的间接作用,而这些未考虑的因素很大程度上可能包括了微生物活动、酶活性、根系等。另外,植被恢复条件下的土壤养分变化也多与微生物活动有关,其中碳(C)、氮(N)等均为基础性元素。C/N 的升高,对微生物活性产生抑制,减缓有机质及氮的矿化速率,从而增加土壤固碳能力。因此,虽然 C、N 分别在空间上表现出一定程度的空间异质性,但碳氮变化则呈现一致性,从而导致 C/N 相对稳定。这可以解释本文表 5 中 TN 对 POC_{agg} 不论是直接效应、间接效应甚至是剩余效应均较强。

4 结论

- (1)本研究区土壤大团聚体(>0.25 mm)质量百分比达 87%,随着粒径的减小,其百分比含量逐渐减小;湿地松纯林、马尾松补植木荷林下土壤大团聚体含量显著小于其他模式。表层土壤(0—10 cm) POC_{agg} 表现为湿地松纯林(14.440 g/kg) $>$ 湿地松木荷混交林 $>$ 木荷纯林 $>$ 马尾松补植木荷林 $>$ 湿地松补植木荷林 $>$ 马尾松纯林(4.131 g/kg),且表土层 POC_{agg} 含量显著高于深层土壤(20—40 cm)。
- (2)恢复模式对退化红壤的理化性质有显著影响($P<0.05$),其中阔叶纯林(木荷)及与湿地松补植木荷林、混交林对土壤性质(TP 除外)的改善(尤其是土壤表层)相对较明显。外来树种湿地松纯林土壤 TP 含量最高,而本地树种马尾松不论纯林或补植林

对土壤均未表现出较明显的改良作用

(3) 针叶纯林水稳性团聚体与 POC_{agg} 相关性显著; 在各土壤因子中, 土壤团聚体组成、SOM 和 TN 对 POC_{agg} 的影响最大 ($P < 0.01$), 尤其以微团聚体 ($< 0.25 \text{ mm}$) 中 SOM、TN 对 POC_{agg} 直接或间接的影响较大。

(4) 在退化红壤区的生态修复和土地治理过程中, 土壤 POC 可以作为反映土壤质量变化及物理化学过程的敏感指标, 以湿地松纯林作为先锋树种进行植被恢复, 抚育过程中补植木荷, 注重对 SOM、TN 和团聚体的保护与碳改善, 可能会更好地提升森林生态系统服务功能。

参考文献:

- [1] 戴尔阜, 李双元, 吴卓, 等. 中国南方红壤丘陵区植被净初级生产力空间分布及其与气候因子的关系: 以江西省泰和县为例[J]. 地理研究, 2015, 34(7): 1222-1234.
- [2] 董莉丽, 陈益娥, 李晓华, 吴起县退耕还林对土壤团聚体水稳性和养分含量的影响[J]. 林业科学, 2014(5): 140-146.
- [3] 张雅茜, 方晰, 洗应男, 等. 亚热带区 4 种林地土壤微生物量碳氮磷及酶活性特征[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [4] 张杰, 郑太辉, 肖胜生, 等. 不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 115-122.
- [5] Zheng T H, Yang J, Zhang J, et al. Factors contributing to aggregate stability at different particle sizes in ultisols from Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 1342-1354.
- [6] 朱丽琴, 黄荣珍, 黄国敏, 等. 不同人工恢复林对退化红壤团聚体组成及其有机碳的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 58-66.
- [7] 王敬哲, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方红壤侵蚀区不同植被恢复年限下芒萁叶功能性状对土壤因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 900-909.
- [8] 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.
- [9] 潘俊, 刘苑秋, 刘晓君, 等. 退化红壤植被恢复团聚体及化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 187-195, 320.
- [10] 邓翠, 吕茂奎, 曾敏. 红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 178-183.
- [11] 李燕燕, 刘亮英, 张志坚, 等. 亚热带红壤区自然恢复草地转换为人工林后对土壤团聚体有机碳周转的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 80-85.
- [12] Wei Y M, Hu H Q, Sun J B. Effect of fire intensity on active organic and total soil carbon in a Larixgmelinii forest in the Daxing'anling Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Forestry Research, 2016, 27(6): 1351-1359.
- [13] Jung B J, Jeanneau L, Alewell C, et al. Downstream alteration of the composition and biodegradability of particulate organic carbon in a mountainous, mixed land-use watershed[J]. Biogeochemistry, 2015, 122(1): 79-99.
- [14] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
- [15] Zhao F Z, Chen S F, Han X H, et al. Policy-guided nationwide ecological recovery: Soil carbon sequestration changes associated with the grain-to-green program in China[J]. Soil Science, 2013, 178(10): 550-555.
- [16] Damien H, Nathalie V, Louault F, et al. How does soil particulate organic carbon respond to grazing intensity in permanent grasslands? [J]. Plant and Soil, 2015, 394(1): 239-255.
- [17] 马宁, 李强, 郭玉涛. 神东矿区典型植被不同恢复年限对土壤质量的影响[J]. 中国水土保持, 2019(11): 59-62, 79.
- [18] Ndou E, Ruwansa S. Soil and vegetation recovery following alien tree clearing in the Eastern Cape Province of South Africa[J]. African Journal of Ecology, 2016, 54(4): 460-470.
- [19] 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.
- [20] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
- [21] 张鸾, 赵利华. 晋北丘陵风沙区不同植被恢复模式的水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 107-111.
- [22] 李启艳, 翁炳霖, 李宗勋, 等. 稀土矿废弃地植被恢复过程中土壤微生物演变[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4360-4368.
- [23] 卞莹莹, 陈林, 柳博文, 等. 荒漠草原区不同植被恢复模式下土壤可溶性氮组分特征[J]. 中国草地学报, 2019, 41(5): 94-103.
- [24] 徐红伟, 吴阳, 乔磊磊, 等. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性: 以黄土高原为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2223-2232.
- [25] Ovsepyan L, Kurganova I N, Gerenyu V L D, et al. Recovery of organic matter and microbial biomass after abandonment of degraded agricultural soils: The influence of climate [J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(15): 1861-1874.
- [26] 刘兴锋, 刘思凡, 蒋龙, 等. 湘西北石漠化区不同植被类型土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(2): 72-78.
- [27] 倪晓薇, 宁晨, 同文德. 贵州龙里林场马尾松湿地松人工林土壤养分分布特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 49-56.

- 报,2013,32(11):2239-2245.
- [19] 柴亚凡,周波,吕文强,等.黄土残塬区泻溜红土坡积体土壤改良效果研究[J].人民黄河,2019,41(1):85-87,100.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62: 1367-1377.
- [21] 曲晓晶,吴景贵,李建明,等.外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J].水土保持学报,2017,31(5): 278-286.
- [22] 陶雪,杨琥,季荣,等.固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J].土壤,2016,48(1):1-11.
- [23] 吕岩.吉林省东部地区沼泽草炭土的结构特性及模型研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [24] Nadler A, Perfect E, Kay B D. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(2):555-561.
- [25] 王芬,刘会,冯敬涛,等.牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1795-1801.
- [26] Rabbi S M, Wilson B R, Lockwood P V, et al. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses[J]. Geoderma, 2014, 216: 10-18.
- [27] 程曼,朱秋莲,刘雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报, 2013, 33(9): 2835-2844.
- [28] Kaiser M, Wirth S, Ellerbrock R H, et al. Microbial respiration activities related to sequentially separated, particulate and water-soluble organic matter fractions from arable and forest top soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42: 418-428.
- [29] 张豪.盐碱农田全年候土壤活性和惰性有机碳变化及其微生物作用研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [30] Brady N, Weil R. 土壤学与生活[M].李保国,徐建明,等,译.1版.北京:科学出版社,2019:134.
- [31] 邹文秀,梁尧,郝翔翔,等.黑土颗粒有机碳和氮含量对有机肥剂量响应的定量关系[J].土壤,2016,48(3): 442-448.
- [32] 石亚攀,乔璐,陈立新,等.红松针阔混交林林隙土壤颗粒有机碳和矿物结合有机碳的时空异质性[J].林业科学,2014,50(6):18-27.
- [33] 刘思佳,关松,张晋京,等.秆还田对黑土团聚体有机碳含量的影响:基于多级团聚体结构的物理和化学保护作用[J].吉林农业大学学报,2019,41(1):61-70.
- [34] 王娜,朱小叶,方晰,等.中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J].水土保持学报,2018,32(3):218-225,234.
- (上接第 224 页)
- [28] Ahmed Z U, Woodbury P B, Sanderman J. Assessing soil carbon vulnerability in the Western USA by geospatial modeling of pyrogenic and particulate carbon stocks[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2017, 122(2): 354-369.
- [29] Debasish S, Kukal S S, Bawa S S. Soil organic carbon stock and fractions in relation to land use and soil depth in the degraded Shiwaliks Hills of Lower Himalayas [J]. Land Degradation and Development, 2012, 25(5): 407-416.
- [30] Covalada S, Gallardo J F, F Garcia-Oliva, et al. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico)[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 186-194.
- [31] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic carbon fractions and management index after 20yr of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 163-169.
- [32] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123-130.
- [33] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.