滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异

方 薇[1,2], 范 弢[1]

(1.云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500;
2.云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘 要:[目的] 研究滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异, 为岩溶脆弱生境土壤培肥、质量提升、水土固持提供依据。[方法] 通过野外调查和室内分析,研究了滇东岩溶山地云南松纯林、云南松人工混交林、云南松天然混交林、灌丛和原生林 5 种植被类型水稳性团聚体及团聚体有机碳分布特征,揭示不同类型云南松林团聚体稳定性差异。[结果] ①云南松纯林、人工混交林和天然混交林的<0.25 mm 粒径质量分数(5.77%~9.39%)显著低于灌丛(20.92%)和原生林(27.47%)($p<0.05$),且人工混交林和天然混交林>5 mm,2~5 mm 粒径质量分数高于纯林。②湿筛处理的>0.25 mm 水稳性团聚体比例($R_{0.25}$)排序为:人工混交林>天然混交林>纯林>灌丛>原生林;平均重量直径(MWD)排序为:人工混交林>天然混交林>原生林>灌丛>纯林;几何平均直径(GMD)排序为:人工混交林>天然混交林>原生林>纯林>灌丛;分形维数(D)排序为:原生林>灌丛>纯林>天然混交林>人工混交林。③纯林、人工混交林、天然混交林的大粒级团聚体(>0.25 mm)对土壤有机碳的贡献率高于小粒级团聚体(<0.25 mm),且>5,2~5,<0.25 mm 粒径水稳性土壤团聚体有机碳含量均显著小于灌丛、原生林($p<0.05$)。[结论] 云南松人工混交林的土壤团聚体稳定性最高,其养分积累和固碳能力低于灌丛和原生林,高于纯林,作为该区域水土保持的主要植被类型时需要避免人为干扰以提高土壤养分。

关键词:水稳性团聚体;土壤结构稳定性;岩溶山地;滇东;云南松

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2020)03-0095-08 **中图分类号**:S152.4+9

文献参数:方薇, 范弢.滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异[J].水土保持通报, 2020,40(3):95-102.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.014; Fang Wei, Fan Tao. Differences in soil aggregate stability of different species of *Pinus yunnanensis* in karst mountain area of Eastern Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3):95-102.

Differences in Soil Aggregate Stability of Different Species of *Pinus Yunnanensis* in Karst Mountain Area of Eastern Yunnan Province

Fang Wei[1,2], Fan Tao[1]

(1. *College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan* 650500, *China*;
2. *Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environment Change, Kunming, Yunnan* 650500, *China*)

Abstract: [Objective] The soil aggregate stability of different species of *Pinus yunnanensis* in the karst mountain area of Eastern Yunnan Province was studied to provide a basis for soil cultivation, quality improvement, and soil-water conservation of karst fragile habitats. [Methods] Based on the field survey and laboratory analysis, five types of vegetation, namely *P. yunnanensis* pure forest, *P. yunnanensis* artificial mixed forest, *P. yunnanensis* natural mixed forest, shrub, and primeval forest, in the karst mountains of Eastern Yunnan Province were studied in terms of their characteristics of water-stable aggregate and organic carbon distribution in aggregate, which revealed the differences in the soil aggregate stability of different

收稿日期:2019-11-07 **修回日期**:2020-01-02
资助项目:国家自然科学基金项目"滇东岩溶高原云南松水源林产水功能恢复机理研究"(41661004)
第一作者:方薇(1996—),女(汉族),陕西省汉中市人,硕士研究生,研究方向为喀斯特环境与水资源。Email:fangweinn@163.com。
通讯作者:范弢(1969—),男(汉族),江西省赣州市人,教授,博士,主要从事喀斯特生态水文研究。Email:fantaojx@163.com。

species of *P. yunnanensis*. [Results] ① The mass fraction of particle size <0.25 mm (5.77%～9.39%) of *P. yunnanensis* pure forest, artificial mixed forest, and natural mixed forest was significantly lower than that of shrub (20.92%) and primeval forest (27.47%) ($p<0.05$). The mass fraction of particle size >5 mm and 2～5 mm of artificial mixed forest and natural mixed forest was higher than that of pure forest. ② The proportion order of water-stable aggregate >0.25 mm ($R_{0.25}$) after wet sieving treatment was *P. yunnanensis* artificial mixed forest > *P. yunnanensis* natural mixed forest > *P. yunnanensis* pure forest > shrub > primeval forest. The mean weight diameter order was *P. yunnanensis* artificial mixed forest > *P. yunnanensis* natural mixed forest > primeval forest > shrub > *P. yunnanensis* pure forest. The geometric mean diameter order was *P. yunnanensis* artificial mixed forest > *P. yunnanensis* natural mixed forest > primeval forest > *P. yunnanensis* pure forest > shrub. The fractal dimension order was primeval forest > shrub > *P. yunnanensis* pure forest > *P. yunnanensis* natural mixed forest > *P. yunnanensis* artificial mixed forest. ③ The contribution rate of large aggregates (>0.25 mm) of *P. yunnanensis* pure forest, *P. yunnanensis* artificial mixed forest, and *P. yunnanensis* natural mixed forest to soil organic carbon was higher than that of small aggregates (<0.25 mm), and the content of organic carbon in soil aggregates with particle sizes of 5, 2～5, and <0.25 mm was significantly lower than that of shrub and primeval forest ($p<0.05$). [Conclusion] *P. yunnanensis* artificial mixed forest was observed to have the maximum soil aggregate stability, and its nutrient accumulation and carbon sequestration were lower than those of shrub and primeval forest but higher than those of pure forest. When the *P. yunnanensis* artificial mixed forest was planted as the main vegetation type for soil and water conservation in this region, it was necessary to avoid human interference for the purpose of improvement of soil nutrients.

Keywords: water-stable aggregate; soil structural stability; karst mountains; Eastern Yunnan Province; *Pinus yunnanensis*

土壤团聚体即土壤结构，是土壤所含的大小不同，形状不一，有不同孔隙度、机械稳定性和水稳性的团聚体总和[1]。它的形成受到土壤微生物[2]、有机质[3]、植物根系[4]、无机粘合剂[5-7]和环境因素[8]等的影响。团聚体各粒级组成比例不同会影响土壤质量和肥力的高低[9]，相关研究表明，1～10 mm 粒径水稳性团聚体有利于调节通气与持水之间、养分的释放与保持之间的矛盾，适于植物生长的良好土壤结构主要依赖于这个粒径级的水稳性团聚体[10]。有机碳是影响土壤团聚体结构的重要因素之一。相关研究认为，新鲜有机质包含在大团聚体(>0.25 mm)内部，大团聚体在土壤新碳固定方面有重大作用，提高大团聚体稳定性有利于提高土壤固碳能力，老化碳一般与微团聚体(<0.25 mm)结合，微团聚体中有机碳含量增多有利于土壤有机碳稳定性提高和积累[11-12]。因此研究团聚体的分布特征、稳定性及团聚体有机碳的含量，是了解和掌握土壤结构优劣的重要途径，对植被土壤的水土保持、土壤肥力和质量的提升具有重要意义。

近年来，有众多学者[1,13]在岩溶地区开展了大量关于团聚体的研究，主要集中在植被恢复、不同生态系统和土地利用方式对团聚体稳定性及有机碳含量的影响方面。相关研究表明，低矮的草本和灌木类植被土壤表层团聚状况优于高大乔木植被[4]。人工林和次生林团聚体稳定性最好，旱地的稳定性最差，旱地转变为人工林和次生林有利于提高各粒径团聚体有机碳含量，大粒径团聚体有机碳贡献率远高于小粒径团聚体[14]。随植被自然恢复土壤结构有所改善，1～2 mm 团聚体含量呈增加趋势，<0.25 mm 团聚体含量呈减少趋势，且土壤有机碳有从大粒径团聚体转移至小粒径团聚体的趋势，土壤碳存储主要发生在0.25～2 mm 粒径团聚体[15]。伊桐、侧柏和菜豆树 3 种植物群落均在一定程度上改善了土壤结构，其中伊桐群落效果最好，提高了土壤颗粒团聚作用，显著增加 2～8 mm 团聚体的含量，促进土壤有机碳积累[11]。可见，不同植被类型不仅会使土壤团聚体稳定性有所差异，也会影响土壤有机碳的迁移、损耗和积累。在中国西南地区广泛分布的云南松具有生长快、耐干旱贫瘠等特点，能涵养水源、改善生态环境。云南松林保护与培育研究已经成为云贵高原森林资源经营管理及其可持续发展的重要任务之一[16]。国内研究者对云南松林生态系统的结构和功能开展了大量研究，主要集中在养分积累和水文功能的研究[16-19]，对云南松土壤结构、团聚体有机碳空间分布特征的研究还非常薄弱。因此本文以滇东沾益县海峰自然保护区为研究区域，通过分析不同类型云南松林土壤团聚体和团聚体有机碳的分布组成，揭示其稳定性差异，以期为调整该区域土地利用方式、最优化配置植被类型提供依据，对岩溶脆弱生境土壤培肥、质量提升、水土固持具有理论参考和现实意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

云南省沾益县海峰自然保护区(103°29′—103°39′E,25°35′—25°57′N,海拔 1 840～2 414 m,面积 27 846 hm^2)地处滇东岩溶高原核心部位,属于典型的亚热带高原季风气候,年平均气温在 13.8～14 ℃,日照时数 2 095.9 h,无霜期 242 d,年降水量 1 073.5～1 089.7 mm,雨季(5—10 月)降水量占年降水量的 87.3%。该区完整保留了滇东高原地带性半湿润常绿阔叶林,森林覆盖率 75.70%,云南松中林龄(占 78%以上)演替系列完备。岩石地层为二叠纪中期的茅口组和栖霞组灰岩。土壤以红壤为主,约占总面积的 85%。

1.2　样品采集与测定

2019 年 1 月,在海峰自然保护区的核心区兰石坡海子(25°46′—25°48′N,103°35′—103°37′E)岩溶小流域建立 5 块典型样地(20 m×20 m),研究样地植被类型分别为云南松人工纯林(简称纯林)、云南松人工混交林(简称人工混交林)、云南松天然混交林(简称天然混交林);对照样地为元江栲栎原生林(简称原生林)、小铁仔石灰岩灌丛(简称灌丛),样地特征与基本理化性质如表 1—2 所示。在样地中选取没有人为干扰的地方挖取土壤剖面 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 土壤,3 次重复,用自封袋带回实验室用于测定分析。风干过程中沿自然裂隙掰成直径 1 cm 左右的土块。经过预试验,黏重的土壤自然风干后往往会结成非常紧实的硬块,因此采用湿筛法进行分级,大致步骤为,称取 100 g 风干土样,用纯水浸润过夜,然后过一套 5 个不同粒径筛子(5,2,1,0.5,0.25 mm),在纯水环境中使用土壤团聚体分析仪(型号 XY-100)进行湿筛上下震荡(振幅 4 cm,频率 30 次/min),进而得到>5,2～5,1～2,0.5～1,0.25～0.5,<0.25 mm 这 6 个级别粒径组分。得到的不同粒径团聚体烘干并称重,各层各粒径土壤团聚体有机碳采用重铬酸钾氧化法测定。

表 1　样地基本特征

样地编号	坐标	海拔/m	平均年龄/a	优势种	土壤类型
1	25°46′30.90″N,103°34′01.96″E	1 993.40	15	云南松(*Pinus yunnanensis*)	棕红色石灰土
2	25°46′01.35″N,103°34′39.70″E	2 087.60	30	乔木层:以云南松、滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)为主,混生少量华山松(*Pinus armandii*)、槲栎(*Quercus aliena*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、旱冬瓜(*Alous nepalensis*)等 灌木层:以炮仗花杜鹃(*Rhododendron spinuliferum*)、白牛筋(*Dichotomanthes tristaniicarpa*)、白牛胆(*Inula cappa*)、薄叶鼠李(*Rhamnus leptophyllus*)等为主。 草本层:以毛蕨菜(*Pteridium revolutum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、小木通(*Clematis armandii*)等为主	棕红色石灰土
3	25°47′04.77″N,103°33′50.09″E	1 990.80	>50	乔木层:以云南松为主,混生少量华山松、滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎、旱冬瓜等 灌木层:以卵叶南烛(*Lyonia variabilis*)、马醉木(*Pieris formosa*)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum*)等为主。 草本层:以毛蕨菜、白健杆(*Eulalia pallens*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、白茅、黄背草(*Themeda japonica*)等为主	棕红色石灰土
4	25°46′32.88″N,103°34′03.82″E	2 004.40	10	灌木层:以小铁仔(*Myrsine africanna*)、小株木(*Cornus paucinervis*)、带叶石楠(*Photinia loriformis*)、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、窄叶火把果(*Pyracantha angustifolia*)等为主 草本层:以凤尾蕨(*Pteris nervosa*)、蜈蚣蕨(*Pteris vittata*)、牛耳草(*Corallodiscus flabellatus*)、石蝴蝶(*Petrocosmea duclouxii*)、云南紫草(*Lithospermum hancockiana*)等为主 藤本:五香血藤(*Schisandra propingqua*)	红色石灰土
5	25°43′27.09″N,103°38′11.01″E	2 023.70	>100	乔木层:以元江栲(*Castanopsis orthacantha*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)为主,混生少量银木荷(*Schima argentea*)、云南泡花树(*Meliosma yunnanensis*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)等 灌木层:以细齿柃木(*Eurya nitida*),乌饭树(*Vaccinium bracteatum*),厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)等为主 草本层:以疏叶蹄盖蕨(*Athyrium dissitifolium*),云南兔儿风(*Ainsliaea yunnanensis*),叶下花(*Ainsliaea pertyoides*)等为主	黄棕色石灰土

注:样地 1 为云南松纯林;样地 2 为云南松人工混交林;样地 3 为云南松天然混交林;样地 4 为小铁仔石灰岩灌丛;样地 5 为元江栲栎原生林。下同。

表2 样地土壤基本理化性质

样地	容重/(g·cm^{-3})	有机碳/(g·kg^{-1})	土壤机械组成			土壤名称	根长密度/(cm·cm^{-3})
			2.0～0.05 mm土粒比例/%	0.05～0.002 mm土粒比例/%	<0.002 mm土粒比例/%		
小铁仔石灰岩灌丛	1.16^{a}	9.51^{a}	58.50	16.26	25.24	砂质黏壤土	7.97^{a}
云南松纯林	1.25^{a}	2.26^{b}	50.74	6.26	43.00	砂质黏土	1.94^{b}
云南松人工混交林	1.23^{a}	2.67^{b}	46.23	5.25	48.52	砂质黏土	2.26^{b}
云南松天然混交林	1.32^{a}	2.67^{b}	41.76	12.66	45.58	黏土	2.90^{b}
元江栲栎原生林	1.2^{a}	11.51^{a}	55.59	23.64	20.77	砂质黏壤土	5.05^{a}

注:同列不同字母分别表示差异显著($p<0.05$)。下同。

1.3 数据处理

分别利用以下公式计算>0.25 mm粒径团聚体的比例($R_{0.25}$)、平均重量直径[1]、几何平均直径[14]、分形维数[20]和团聚体有机碳贡献率。

$$R_{0.25}=M_{r>0.25}/M_T \tag{1}$$

式中:M_T为团聚体总重量,$M_{r>0.25}$表示粒径大于0.25 mm的团聚体的重量。

$$\mathrm{MMD}=(\sum_{i=1}^{n}\overline{R}_i\times m_i) \tag{2}$$

$$\mathrm{GMD}=\exp(\sum_{i=1}^{n}\ln\overline{R}_i\times m_i) \tag{3}$$

式中:$\overline{R}_i$是筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均直径;m_i表示平均直径为$\overline{R}_i$的团聚体重量。

$$D=(R_i'/R_{\max})^{3-D}=W(r<R_i')/W_o \tag{4}$$

式中:两边取对数得:$\lg[W(r<R_i')/W_o]=(3-D)\lg(R_i'/R_{\max})$,分别以$\lg(R_i'/R_{\max})$,$\lg(W/W_o)$为横、纵坐标,用回归分析计算分形维数($D$)。$R_i'$为两筛分粒级$R_i$与$R_{i+1}$间粒径的平均值;$R_{\max}$为最大粒级的平均粒径;$D$为分形维数,$W(r<R_i')$为粒级小于$R_i$的累积土粒质量;$W_o$为土壤各粒级质量的总和。

$$R_{ai}=C_{ai}\times W_{ai}/\sum_{i=1}^{n}C_{ai}\times W_{ai} \tag{5}$$

式中:R_{ai}为某粒径团聚体有机碳贡献率(%);C_{ai}为某粒径团聚体有机碳含量(%);W_{ai}为某粒径团聚体质量百分数(%)。

数据使用Excel2010软件进行处理,使用SPSS23.0软件分析,采用方差齐性检验,如通过($p>0.05$)则采用LSD检验;否则($p<0.05$),采用Tamhane's T2进行差异显著性检验。使用Origin2018作图。

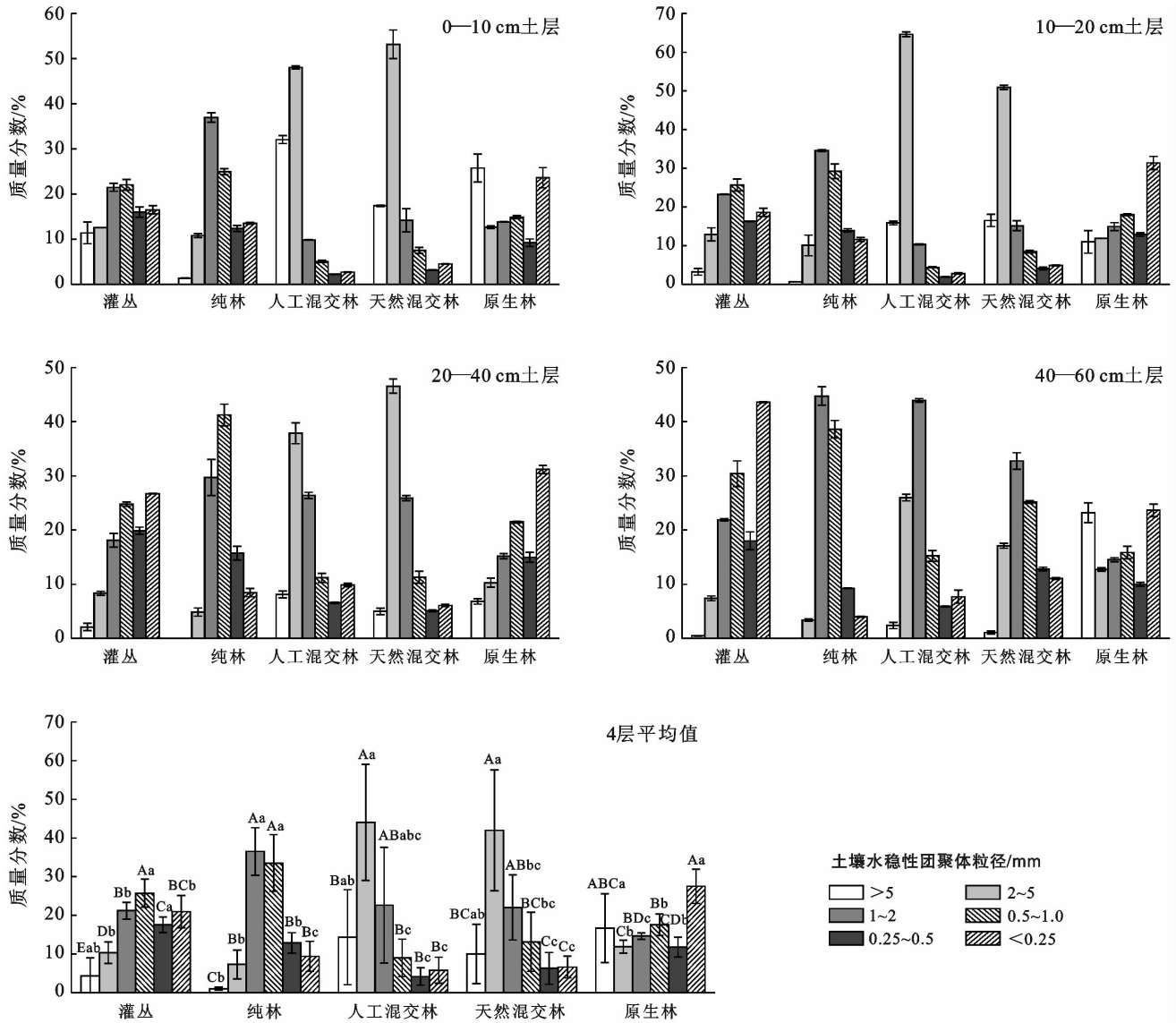
2 结果与分析

2.1 水稳性团聚体质量组成

不同植被类型,以4层平均值来看,云南松人工混交林和天然混交林>5 mm粒径质量分数比云南松纯林提高了13.01倍($p>0.05$)和9.10倍($p>0.05$),2～5 mm粒径质量分数提高了6.05倍($p<0.05$)和5.77倍($p<0.05$)(见图1)。云南松纯林、人工混交林和天然混交林的<0.25 mm粒径质量分数(5.77%～9.39%)显著低于灌丛(20.92%)和原生林(27.47%)($p<0.05$)。说明人工混交林和天然混交林有利于>5,2～5 mm粒径水稳性团聚体质量分数的提高,且云南松有利于大粒级水稳性团聚体(>0.25 mm)的形成。0—60 cm土层中,云南松纯林水稳性团聚体质量分数均以1～2,0.5～1 mm粒径为主(24.96%～44.74%),>5,2～5 mm粒径质量分数随土层的加深而减少,0.25～0.5 mm和<0.25 mm粒径表现为浅层多,深层少。0—20 cm土层中,云南松人工混交林和天然混交林水稳性团聚体质量分数以>5,2～5 mm粒径为主(15.87%～64.65%),20—60 cm层以2～5,1～2,0.5～1 mm粒径为主(11.19%～46.57%),0.25～0.5 mm和<0.25 mm粒径表现为浅层少,深层多。说明云南松纯林相比人工混交林和天然混交林浅层土壤可能容易受外力干扰(土壤侵蚀或人为翻耕),外力干扰倾向于破坏水稳性大团聚体[21],土壤结构发生变化使大团聚体破碎分散成更多较小团聚体。灌丛和原生林不同土层深度均以<0.25 mm粒径水稳性团聚体为主。

2.2 水稳性团聚体稳定性差异

$R_{0.25}$值表现为云南松人工混交林、天然混交林和纯林显著大于灌丛、原生林($p<0.05$)(见表3),说明云南松林有利于大团聚体的形成。MWD值表现为人工混交林(3.05 mm)>天然混交林(2.68 mm)>原生林(2.10 mm)>灌丛(1.29 mm)>纯林(1.15 mm),GMD值表现为人工混交林(2.28 mm)>天然混交林(1.91 mm)>原生林(0.86 mm)>纯林(0.85 mm)>灌丛(0.70 mm),D值表现为原生林(2.68)>灌丛(2.60)>纯林(2.37)>天然混交林(2.26)>人工混交林(2.19),说明人工混交林土壤团聚状况最好,结构最稳定,天然混交林次之,云南松纯林和灌丛的土壤团聚状况最差。



注:不同大写字母代表同一植被类型不同粒径团聚体在 5%水平上差异显著,不同小写字母代表不同植被类型相同粒径团聚体在 5%水平上差异显著。图中数据为均值±标准差。下同。

图 1　不同类型云南松林地 0—60 cm 土层水稳性土壤团聚体质量分数

表 3　不同类型云南松林地水稳性团聚体稳定性

样地类型	$R_{0.25}$/%	平均重量直径 MWD/mm	几何平均直径 GMD/mm	分形维数 D
灌 丛	79.08±4.18^{b}	1.29±0.40^{bc}	0.70±0.16^{b}	2.60±0.05^{a}
纯 林	90.50±3.72^{a}	1.15±0.13^{c}	0.85±0.08^{b}	2.37±0.13^{b}
人工混交林	94.23±3.39^{a}	3.05±1.04^{a}	2.28±0.92^{a}	2.19±0.16^{b}
天然混交林	93.36±2.78^{a}	2.68±0.87^{a}	1.91±0.67^{a}	2.26±0.11^{b}
原生林	72.53±4.42^{c}	2.10±0.66^{ab}	0.86±0.26^{b}	2.68±0.04^{a}

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.3　水稳性团聚体有机碳含量

不同植被类型整体上,云南松纯林、人工混交林和天然混交林的>5,2~5,<0.25 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量显著小于灌丛和原生林($p<0.05$)(见图 2),说明灌丛、原生林大团聚体和微团聚体有机碳含量高,有利于土壤有机碳的积累和固定。>5 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量表现为灌丛(12.71 g/kg)>原生林(12.39 g/kg)>天然混交林(2.80 g/kg)>人工混交林(2.73 g/kg)>纯林(2.08 g/kg);<0.25mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量表现为原生林(11.10 g/kg)>灌丛(9.22 g/kg)>人工混交林(3.77 g/kg)>天然混交林(2.98 g/kg)>纯林

(2.58 g/kg),表明小粒级水稳性团聚体有机碳可能是从大粒级水稳性团聚体中转移而来。不同土层中,灌丛与原生林各粒径土壤团聚体有机碳含量(5.93 g/kg～17.17 g/kg)明显高于纯林、人工混交林、天然混交林(0 ～5.33 g/kg)。云南松纯林、人工混交林和天然混交林各粒径水稳性土壤团聚体有机碳含量均随土层的加深而减少(纯林、天然混交林的 2～5 mm 粒径除外)。说明 3 种类型云南松林土壤有机碳输入量较少且呈表层富集,土壤下层剖面有机碳含量很大程度受上层的向下迁移作用支配,使有机碳含量从上到下减少并且各层各粒径有机碳含量较少。灌丛各粒径水稳性土壤团聚体有机碳含量均随土层的加深而减少。原生林团聚体有机碳含量均随土层的加深而先减小后增多。

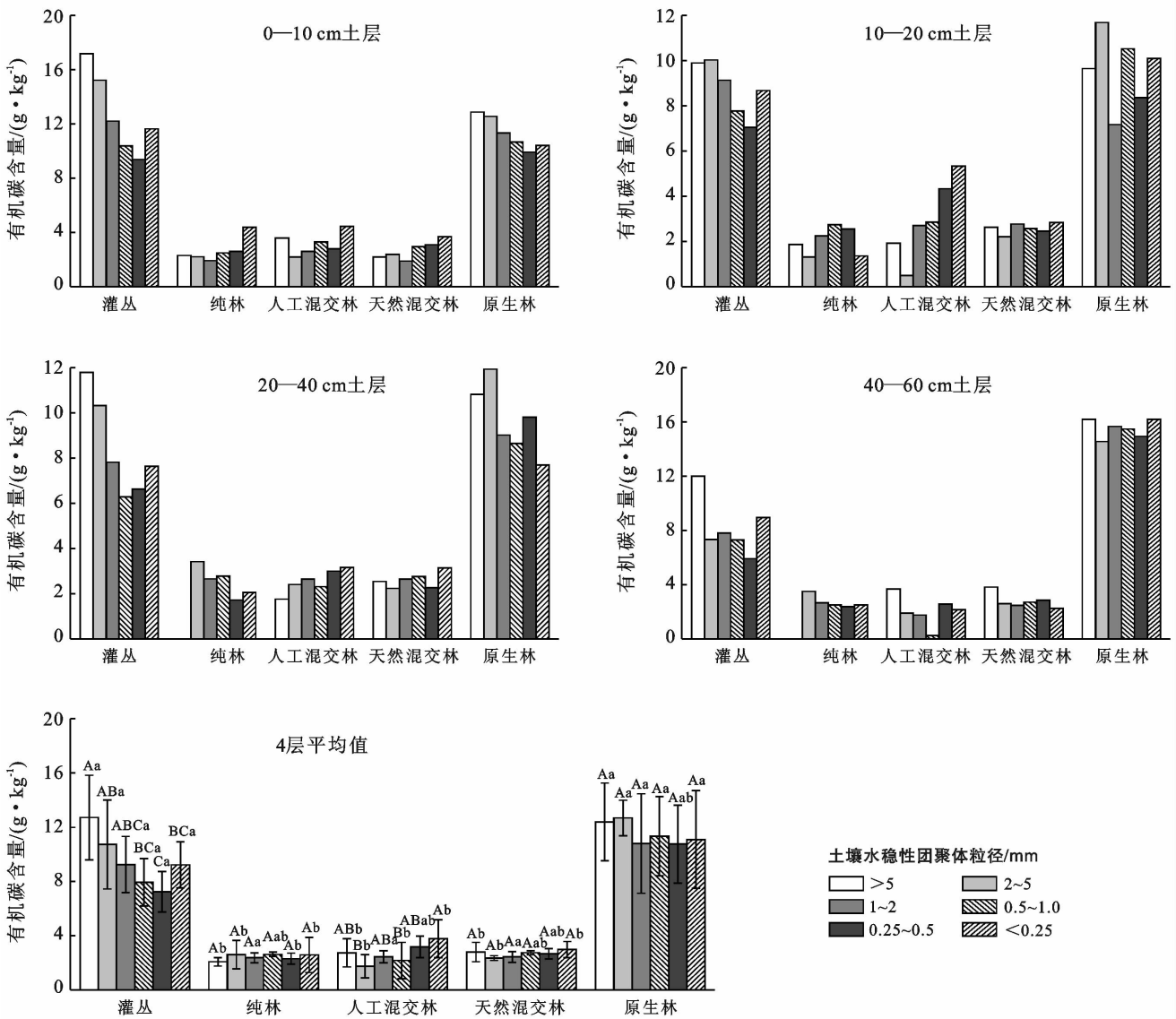


图 2 不同类型云南松林地 0—60 cm 土层水稳性团聚体有机碳含量

2.4 水稳性团聚体有机碳贡献率变化

团聚体有机碳贡献率是对不同粒径团聚体有机碳含量及团聚体比例的综合计算,表示各粒径团聚体对土壤有机碳的贡献状况[15]。

如图 3 所示,3 种类型云南松林中,>5 mm 粒径水稳性团聚体有机碳贡献率表现为人工混交林(18.98%)>天然混交林(10.14%)>纯林(0.90%);2～5 mm 粒径表现为天然混交林(39.49%)>人工混交林(31.89%)>纯林(6.61%)。云南松纯林主要以 1～2,0.5～1 mm 粒径水稳性团聚体有机碳贡献率最大,>5 mm 最小。人工混交林和天然混交林以 2～5,1～2 mm 粒径水稳性团聚体有机碳贡献率最大。灌丛和原生林以 0.5～1,<0.25 mm 粒径水稳性团聚体有机碳贡献率最大。说明 3 种云南松林主要是大粒级水稳性团聚体(>0.25 mm)有机碳对土壤有机碳的贡献率最大。

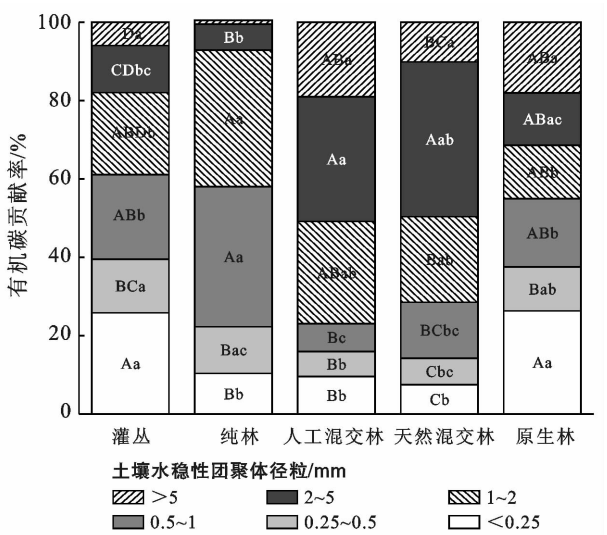


图 3　不同类型云南松林地 0—60 cm 土层各粒径水稳性团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率

3　讨 论

3.1　不同类型云南松林水稳性团聚体有机碳特征

云南松纯林、人工混交林和天然混交林的各粒径水稳性团聚体有机碳含量均随土层的加深而减少(除云南松纯林和天然混交林的 2～5 mm 粒径团聚体)。究其原因,可能是云南松的根系深,侧根发达,根幅较宽,且根系主要分布在 0—30 cm 土层,树木的生长主要需要根系从深层土壤吸收养分和水分[16],因此云南松浅层土壤有机碳的积累大于消耗,深层土壤有机碳消耗大于积累,而且土壤容重较大,孔隙度较小,养分向深层土壤运移较为缓慢,影响深层土壤有机碳较少。

在滇东岩溶山地,云南松纯林、人工混交林和天然混交林的>5,2～5,<0.25 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量显著小于灌丛和原生林($p<0.05$),与孙筱璐等[8]得出的阔叶林大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)有机碳含量高而针叶林较低的结论相似。主要原因是植物枯落物作为土壤有机碳最主要来源[22]。不同植被配置下,其植物枯落物类型、数量及其分解速率也会不同,导致土壤有机碳含量有所差异,阔叶林(原生林)群落层次结构复杂,土壤表层养分丰富,有利于微生物的活动,灌丛的根系分布密集,生物量高,枯落物更容易分解,进而导致枯落物分解速率和养分迁移率均高于云南松林,可以积累更多的土壤有机碳[4,18]。云南松枯落物含有很多如木质素、木栓、蜡质和角质等难分解化合物[23],分解周转周期比较长,再加上当地居民强烈人为干扰收取云南松林内的枯枝落叶作为薪柴燃烧消耗,使云南松林土壤有机碳输入量较少。>5 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量表现为:灌丛(12.71 g/kg)>原生林(12.39 g/kg)>天然混交林(2.80 g/kg)>人工混交林(2.73 g/kg)>纯林(2.08 g/kg);<0.25 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量表现为:原生林(11.10 g/kg)>灌丛(9.22 g/kg)>人工混交林(3.77 g/kg)>天然混交林(2.98 g/kg)>纯林(2.58 g/kg),表明小粒径水稳性团聚体有机碳可能是从大粒径水稳性团聚体中转移而来,黄宗胜等[15]也研究发现在贵州茂兰喀斯特地区,土壤有机碳随植被自然恢复有从大粒级土壤团聚体转移至小粒级土壤团聚体的趋势。Elliott[12]认为微团聚体(<0.25 mm)中的有机碳受物理保护作用,相对于大团聚体中的新鲜有机质稳定性更高,微团聚体中的有机碳含量增加有利于土壤碳的稳定[15],本研究中原生林和灌丛的土壤各粒径团聚体有机碳含量较高,且更多的有机碳存储在微团聚体中。针、阔叶树种的混交,相比针叶纯林有利于促进林地枯落物的分解和养分元素的循环利用[18],影响较多的有机碳储存于微团聚体(<0.25 mm)中,30 a云南松人工混交林的生长发育和代谢速率均较快,导致有机碳的积累速率比天然混交林高[19]。

3 种类型云南松林,云南松纯林以 1～2,0.5～1 mm粒径土壤团聚体有机碳贡献率较高,人工混交林和天然混交林以>5,2～5,1～2 mm 粒径土壤团聚体有机碳贡献率较高,这与谭秋锦等[14]、卢凌霄等[11]和黄宗胜等[15]研究得出的大粒级团聚体(>0.25 mm)对岩溶地区土壤有机碳的贡献率高于小粒级团聚体(<0.25 mm)的结果相似,说明滇东岩溶山地云南松林土壤有机碳增加主要是大粒级土壤团聚体(>0.25 mm)的贡献,土壤碳存储也主要发生在大粒级团聚体中。

3.2　不同类型云南松林水稳性团聚体分布及稳定性差异

黔西南峡谷型喀斯特地区水田、旱地、草地、灌丛、人工林和次生林 6 种生态系统土壤团聚体以>0.25 mm 粒径为主,<0.25 mm 粒径为辅[14];西南喀斯特森林石灰土以>2 mm 粒径团聚体为主[24],广西平果县果化镇岩溶峰丛洼地荒地、草地、灌丛、林灌 4 种不同植被覆盖下土壤水稳性团聚体以 1～2,0.5～1,<0.25 mm 粒径含量最多[1]。本研究中云南松纯林以 1～2,0.5～1 mm 粒径水稳性团聚体含量多,云南松人工混交林和天然混交林以 2～5 mm 粒径含量最多。云南松纯林、人工混交林和天然混交林的<0.25 mm 粒径质量分数(5.77%～9.39%)显著低于灌丛(20.92%)和原生林(27.47%)($p<0.05$),这说明滇东岩溶山地不同类型云南松林以>0.25 mm 粒径水稳性土壤团聚体为主。究其原因,可能是 3 种云南松林的黏粒(<0.002 mm)含量(43%～48.52%)

高于灌丛(25.24%)和原生林(20.77%),黏粒是土壤团聚体形成最重要的胶结物质,具有较高的比表面积和较多的反应位点,有机质通过与多价阳离子和粘粒的共同作用促进团聚体的形成[5-6],有机碳含量比较低的情况下,足够的无机胶结物质(黏粒)可以避免土壤结构的恶化[7];此外,可能是云南松根系的分泌物有利于促进大团聚体的形成和积累,植被根系作为植被和土壤之间的纽带,不同植被类型的根系具有不同的理化性质和生理功能,使土壤之间产生差异[25]。

4 种团聚体稳定性指标表明人工混交林土壤团聚状况最好,结构最稳定,天然混交林次之,云南松纯林和灌丛最差。在云南松纯林 0—60 cm 土层中,>5,2~5 mm 粒径水稳性团聚体质量分数小于云南松人工混交林和天然混交林,且云南松纯林 0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 粒径表现为浅层多,深层少,人工混交林和天然混交林 0.25~0.5,<0.25 mm 粒径表现为浅层少,深层多,说明云南松纯林表层土壤结构容易遭受破坏,水稳性大团聚体被分解成较小团聚体,其原因可能受植被冠层特征、枯落物的质量和数量、植被空间结构的影响。植被类型不同,其冠层垂直空间结构会产生差异,另外,枯枝落叶的组成和分解程度不同,在持水量方面也有差异,相关研究表明阔叶林的冠层相比针叶林对降雨的截留量较高[17],枯落物持水量也表现为:阔叶林>针阔混交林>灌丛>针叶林[26],因此云南松人工混交林和天然混交林相对云南松纯林、灌丛减少了降雨和地面径流对土壤的直接冲刷而破坏大团聚体,提高了土壤抗冲性,对水稳性团聚体起到了保护作用。团聚体粒径组成和稳定性也是土壤侵蚀的重要指标,土壤结构越稳定,>0.25 mm 水稳性团聚体含量越高说明土壤抗蚀性越好[7,27],如将云南松纯林和灌丛改造为云南松人工混交林和天然混交林后,则有望提高土壤抗侵蚀性能。

4 结 论

(1) 滇东岩溶山地 5 种植被类型中,灌丛和云南松纯林土壤团聚体稳定性最差,且纯林浅层土壤容易受外力干扰而破坏大粒级水稳性团聚体。原生林、云南松人工混交林和天然林混交林均在一定程度改善土壤结构,其中人工混交林土壤稳定性最好,>5 mm 和 2~5 mm 粒径含量显著增加,提高了土壤颗粒团聚作用。

(2) 3 种类型云南松林的土壤有机碳具有表聚性,土壤养分归还量较少,>5,2~5,<0.25 mm 粒径水稳性团聚体有机碳含量显著小于灌丛和原生林。人工混交林相对于天然混交林和纯林提高了<0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量,促进了土壤有机碳积累。云南松纯林以 1~2,0.5~1 mm 粒径土壤团聚体有机碳贡献率较高,人工混交林和天然混交林以>5,2~5,1~2 mm 粒径土壤团聚体有机碳贡献率较高。

(3) 滇东岩溶地区许多营林作业和人为活动破坏了地带性植被阔叶林(原生林),大面积人工栽种云南松纯林来提高林木产量,这会导致土壤结构稳定性降低、有机碳减少,加剧水土流失,而云南松人工混交林可以有效提高土壤结构稳定性、土壤碳积累,同时需要避免人为干扰消耗云南松林地表枯落物以提高土壤养分输入量。

[参 考 文 献]

[1] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持通报,2015,35(1):61-67.

[2] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil & Tillage Research, 2004,79(1):7-31.

[3] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. European Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.

[4] 孙涛,刘艺杉,孙崇玉,等.石灰岩山地植被恢复对土壤水稳性团聚体的影响[J].草业科学,2018,35(6):1361-1367.

[5] 李小刚.甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究[J].土壤学报,2000,37(2):263-270.

[6] Edwards A P, Bremner J M. Microaggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1967,18(1):64-73.

[7] Colazo J C, Buschiazzo D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina [J]. Geoderma, 2010,159(1):228-236.

[8] 孙筱璐,唐佐芯,尤业明,等.气候和林分类型对土壤团聚体有机碳的影响[J].广西植物,2018,38(3):341-351.

[9] 刘晓利,何园球.不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J].土壤,2009,41(1):84-89.

[10] 姚贤良,许绣云.于德芬.不同利用方式下红壤结构的形成[J].土壤学报,1990,27(1):25-33.

[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] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3):627-633.

[13] 王进,刘子琦,鲍恩侯,等.喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):249-256.

[14] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2014,25(3):671-678.

(下转第 132 页)

[10] 张露凝.黄河三角洲湿地生态环境脆弱性评价及演变特性研究[D].郑州:华北水利水电大学,2017.

[11] Tuya A, Jirigala B R, Yin Bao. Research on the classification of coupling relationship among the ecological environment, natural disasters and regional poverty in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,260/261:1063-1068.

[12] Admassie A, Abebaw D. Rural Poverty and Marginalization in Ethiopia: A Review of Development Interventions [M]// von Braun J, Gatzweiler F W. Marginality: Addressing the Nexus of Poverty, Exclusion and Ecology, Dordrecht: Springer, 2014.

[13] 徐满厚,杨晓艳,张潇月,等.山西吕梁连片特困区生态环境质量评价及其经济贫困的时空分布特征[J].江苏农业科学,2018,46(6):304-309.

[14] 王淑强,董锁成,王新,等.定西市经济与生态环境互动机理研究[J].资源科学,2005,27(4):106-111.

[15] 李静怡,王艳慧.吕梁地区生态环境质量与经济贫困的空间耦合特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1715-1724.

[16] 李传华,赵军.基于 GIS 的民勤县生态环境脆弱性演化研究[J].中国沙漠,2013,33(1):302-307.

[17] 杨帆,庄天慧,阚杰,等. 四川省藏区县域经济社会发展评价研究[J]. 贵州民族研究,2015,36(9):170-173.

[18] 李治兵,舒莉,赵睿祥,等.生态环境保护与农业精准扶贫协调发展机制研究:以四川省藏区为例[J].阿坝师范学院学报,2019,36(2):51-57.

[19] 卢冲,耿宝江,庄天慧,等.藏区贫困农牧民参与旅游扶贫的意愿及行为研究:基于四川省藏区 23 县(市)1320 户的调查[J].旅游学刊,2017,32(1):64-76.

[20] 丛晓男.耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J].经济地理,2019,39(4):18-25.

[21] 杜英.黄土丘陵区退耕还林生态系统耦合效应研究:以安塞县为例[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.

[22] 李涛,廖和平,杨伟,等.重庆市"土地、人口、产业"城镇化质量的时空分异及耦合协调性[J].经济地理,2015,35(5):65-71.

[23] 牛亚琼,王生林. 甘肃省脆弱生态环境与贫困的耦合关系[J].生态学报,2017,37(19):6431-6439.

(上接第 102 页)

[15] 黄宗胜,符裕红,喻理飞,等.喀斯特森林植被自然恢复中土壤团聚体有机碳含量与团聚体分形特征[J].林业科学研究,2015,28(2):277-283.

[16] 苗娟,周传艳,李世杰,等.不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J].应用生态学报,2014,25(3):625-631.

[17] 刘文耀,刘伦辉,郑征,等.滇中常绿阔叶林及云南松林水文作用的初步研究[J].植物生态学与地植物学学报,1991,15(2):159-167.

[18] 刘文耀,刘伦辉,荆桂芬,等.云南松林与常绿阔叶林中枯落叶分解研究[J].云南植物研究,2000,22(3):298-306.

[19] 廖周瑜,惠阳,王邵军,等.不同林龄云南松凋落叶分解及养分归还特征[J].生态环境学报,2018,27(11):1981-1986.

[20] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[21] 方华军,杨学明,张晓平,等.东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J].生态学报,2006,26(9):2847-2854.

[22] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002,34(2):139-162.

[23] Derenne S, Largeau C. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments [J]. Soil Science, 2001,166(11):833-847.

[24] 俞月凤,卢凌霄,杜虎,等.不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征[J].西北植物学报,2013,33(5):1011-1019.

[25] 万海霞,马璠,许浩,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系[J].水土保持研究,2019,26(6):80-86.

[26] 孟广涛,方向京,李贵祥,等.云南金沙江流域不同植被类型水源涵养能力分析[J].水土保持研究,2007,14(4):160-163.

[27] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter (Ⅱ): A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(3):1042-1049.