

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.010

钟宇健,何烽,韩光中,等.还林树种对紫色土团聚体分布和稳定性的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):284-292,301.

ZHONG Yujian, HE Feng, HAN Guangzhong, et al. Effect of reforestation tree species on the distribution and stability of purple soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 284-292, 301.

还林树种对紫色土团聚体分布和稳定性的影响

钟宇健^{1,2,3}, 何烽², 韩光中², 赵霞^{1,3}, 杨帆²

(1.青海师范大学地理科学学院青海省自然地理与环境过程重点实验室,西宁 810008;2.内江师范学院地理与资源科学学院内江市土壤过程模拟与污染修复工程技术研究中心,四川 内江 641100;3. 青海省人民政府北京师范大学高原科学与可持续发展研究院—高原土壤信息科学研究团队,西宁 810008)

摘要: [目的] 退耕还林是改善土壤结构、减少水土流失的重要举措,明确还林树种对土壤团聚体形成过程的影响机制可为水土保持提供重要的依据。[方法] 选择华西雨屏区紫色土坡耕地(玉米地)还林 20 年形成的柳杉林、混交林、茶园和慈竹林 4 种人工林土壤为研究对象,分析土壤团聚体分布及其稳定性的变化。[结果] (1)相较于坡耕地,混交林、茶园和慈竹林土壤 >5 mm 团聚体含量显著增加,而 $0.5\sim 1$ mm 团聚体含量显著减少($p < 0.05$),优势团聚体由 $0.5\sim 1$ mm 转变为 >5 mm;(2)人工林土壤团聚体 GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 分别上升 46.93%~330.30%,47.01%~191.03%和 5.02%~19.66%,而 $PAD_{0.25}$ 和 PSD 分别下降 15.41%~75.09%和 1.65%~9.20%,表明人工林土壤团聚体稳定性增强,具体表现为茶园 $>$ 慈竹林 $>$ 混交林 $>$ 柳杉林,以茶园和慈竹林较优;(3)土壤优势团聚体含量及其稳定性与惰性有机碳含量呈极显著正相关,而与土壤砾石含量呈极显著负相关($p < 0.01$)。[结论] 林木生长促进紫色土风化,为土壤团聚体形成提供物质基础;人工林土壤形成的腐殖质作为胶结物质,促进大团聚体的形成及其稳定性的维持。

关键词: 土壤结构; 退耕还林; 树种; 土壤团聚体; 华西雨屏区

中图分类号: S152.4; S714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)06-0284-09

Effect of Reforestation Tree Species on the Distribution and Stability of Purple Soil Aggregates

ZHONG Yujian^{1,2,3}, HE Feng², HAN Guangzhong², ZHAO Xia^{1,3}, YANG Fan²

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Engineering Technology Center for Soil Process Simulation and Pollution Remediation in Neijiang City, College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability-Plateau Soil Information Science Research Team, People's Government of Qinghai Province, Xining 810008, China)

Abstract: [Objective] Afforestation following the Grain for Green initiative is a crucial measure to improve soil structure and reduce soil erosion. Understanding the mechanisms of the effects of afforestation tree species on the formation of soil aggregates can provide valuable insights for soil conservation. [Method] Four types of artificial forests (*Cryptomeria fortunei* (CF), *Cryptomeria fortunei* and *Betula luminifera* (MF), *Camellia sinensis* (CS), and *Neosinocalamus affinis* (NA)) established on sloping farmland (SF) (cornfield) in the Rainy Area of Western China after 20 years of afforestation were taken as the research objects, in order to analyze the changes in soil aggregate content and stability after the conversion from farmland to artificial forests. [Results] (1) Compared to the sloping farmland, the artificial forests of MF, CS, and NA significantly increased the soil aggregates >5 mm, but decreased the $0.5\sim 1$ mm soil aggregates

收稿日期:2024-06-14

修回日期:2024-07-18

录用日期:2024-07-20

网络首发日期(www.cnki.net):2024-11-15

资助项目:内江师范学院科研启动费项目(18B10);科技基础资源调查专项(2022FY100202);国家级大学生创新创业训练计划项目(X2021009);第二次青藏高原综合考察研究项目(2019QZKK0306)

第一作者:钟宇健(1998—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤肥力和区域生态恢复研究。E-mail:faxinger@163.com

通信作者:杨帆(1984—),男,博士,讲师,主要从事土壤地球化学循环和土壤地理研究。E-mail:10001556@njtc.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

($p < 0.05$). The dominant soil aggregates shifted from 0.5~1 mm to >5 mm. (2) The soil aggregate parameters, including the geometric mean diameter (GMD), mean weight diameter (MWD), and the content of aggregates of >0.25 mm ($R_{0.25}$), increased by 46.93%~330.30%, 47.01%~191.03% and 5.02%~19.66%, respectively, in the artificial forests. Conversely, the destruction rate ($PAD_{0.25}$) and fractal dimension (PSD) decreased by 15.41%~75.09% and 1.65%~9.20%, respectively. These indicators of aggregate stability consistently demonstrated that the stability of soil aggregates in the artificial forests was enhanced, with a specific ranking of CS $>$ NA $>$ MF $>$ CF, indicating that CS and NA were both relatively superior. (3) The content and stability of dominant soil aggregates were extremely significantly positively correlated with the content of NOC, and extremely significantly negatively correlated with the content of soil gravel ($p < 0.01$). [Conclusion] The weathering of purple soil following afforestation provides the material foundation for aggregate formation, while the humus formed in the soil of artificial forests acts as a binding agent, promoting the formation of large aggregates and the maintenance of their stability.

Keywords: soil structure; Grain for Green; tree species; soil aggregates; the Rainy Area of Western China

Received: 2024-06-14

Revised: 2024-07-18

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-11-15

团聚体是土壤结构的基本单元,是由土壤颗粒在胶结物的作用下,团聚在一起形成的不同大小、形状和性质各异的土团。团聚体的形成是一个动态过程,多价金属阳离子和有机物通过吸附或共沉淀与矿物相互结合形成微团聚体,微团聚体(<0.25 mm)胶结形成大团聚体(>0.25 mm);大团聚体内部有机胶结物质被分解或被微生物代谢释放为微团聚体^[1-2]。土壤团聚体形成演化主要受矿物类型、风化作用、黏粒、碳酸钙、植被、微生物、土壤有机质及水分等影响。大团聚体在土壤养分供应和土壤结构的稳定性方面发挥着重要调节作用,随着大团聚体增加,土壤的稳定性与抗侵蚀能力增强;而微团聚体则作为土壤肥力的独特结构,影响土壤养分、水分保持与有机质的贮存^[3]。土壤团聚体组成及其含量的变化对土壤气体和水分运移、养分循环、碳的生物地球化学循环产生影响,土壤团聚体这种组成和变化在一定程度上反映成土过程和外界因素的特征。

有机质与土壤团聚体形成及其稳定性的维持关系密切,它是土壤团聚体重要的胶结剂,微团聚体能够在有机质的胶结、黏合作用下形成水稳性大团聚体^[4],成为土壤供肥、保肥及耕性和缓冲性能的重要决定因素。因此,土壤有机质形成、分解的过程及其强度直接影响土壤团聚体的形成与稳定。黄土高原、南方红壤、东北黑土地区由于植被破坏,土壤团聚体稳定性下降,造成严重的水土流失和养分贫瘠^[5-7]。退耕还林(草)有效恢复林草植被的同时,增加地表覆盖,改善土壤结构,减少水土流失^[8]。退耕还林后,植被覆盖率提高,植物地上生物量和凋落物增加;凋落物分解促进土壤有机质形成和积累,表层土壤胶结作用增强;土壤大团聚

体含量与稳定性增加;土壤结构显著改善、抗侵蚀性增强,还林植被种类及其组合对土壤团聚体的改变起主导作用^[9]。另外,相对浅根系的农作物,深根系林木的根系结构、根系密度、根系分泌物对表下层土壤有机质的形成和转化及土壤团聚体的形成产生深刻的影响^[10-11]。植物根系状况和母质特征共同影响表下层土壤团聚体的形成与分布^[11-12]。因此,不同还林植被地上生物量归还、根系及其分泌物影响土壤团聚体的形成过程及其速度,进而影响土壤的抗侵蚀性、碳固存、养分保持等生态功能^[2]。

华西雨屏区是我国首批退耕还林地区,其主要土壤——紫色土具有母岩埋藏较浅、极易风化的特点,可快速形成细土物质,同时也容易产生水土流失。已有研究^[10,13]表明,华西雨屏区退耕还林显著增加土壤有机碳总量和惰性碳含量,还林树种类型影响有机质积累和组分变化。此外,紫色土成土作用快,深根系林木还林通过生物与化学作用促进紫色砂岩的风化,增加表下层的细土物质^[10]。华西雨屏区退耕还林后土壤团聚体,尤其是可快速风化的紫色土表下层土壤团聚体的形成演变过程仍不清楚。基于此,本研究对长江上游首批退耕还林华西雨屏区的紫色土旱坡地退耕还林形成的4种代表性人工林(柳杉林、混交林、慈竹林和茶园)土壤团聚体的含量及其剖面分异进行分析;采用几何平均直径(GMD)、平均重量直径(MWD)、分形维数(PSD)、团聚体破坏率($PAD_{0.25}$)、大团聚体含量($R_{0.25}$)多种指标对其团聚体稳定性进行评价。本研究可揭示华西雨屏区人工林土壤团聚体演变机制,为长江上游水土流失、区域碳固存及其人工林生态系统稳定性提供重要的支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪雅县(29°24′11″—30°00′19″N,102°50′48″—103°31′57″E)地处华西雨屏区中段,地貌以低山丘陵为主,地势西南高东北低。气候属于亚热带季风气候,年平均气温 14~16℃,年平均降水量 1 300~2 000 mm,是四川省降雨量最多的区域之一^[14]。地带性植被为常绿阔叶林,广泛分布着发育于中生代紫色泥岩、砂岩和页岩的紫色土。由于紫色岩层不稳定、降雨强度大和陡坡耕作、林地减少等自然和人为因素导致区域水土流失严重。因此,自 1999 年开始,洪雅县实施退耕还林(草)工程,建立以生态林树种柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、光皮桦(*Betula luminifera*)和经济林树种慈竹(*Neosinocalamus affinis*)、茶树(*Camellia*

sinensis)等的复合还林模式^[13]。

1.2 样品采集

2019 年在洪雅县紫色土陡坡耕地退耕还林区,以种植玉米的坡耕地(SF)为对照,选择相似坡度和坡向的柳杉林(CF)、柳杉—桦树混交林(MF)、茶园(CS)、慈竹林(NA)4 种代表性林地(20 林龄)作为研究对象(图 1)。按照“品”字形分布挖取 3 个剖面,剖面以 10 cm 间隔采集 0—40 cm 的原状土样、环刀样品和混合土样,共采集 180 个土壤样品。原状土样采用塑料盒装运,沿土壤团聚体自然裂隙轻掰为 12 mm 左右的小土块,并除去其中的碎石块和植物残体,室内自然风干。混合土样挑去植物残体、侵入体,室内自然风干,混合风干土样过 2 mm 尼龙筛,记录砾石含量,然后将细土在玛瑙研钵磨细,过 0.25 mm 尼龙筛,保存备用。

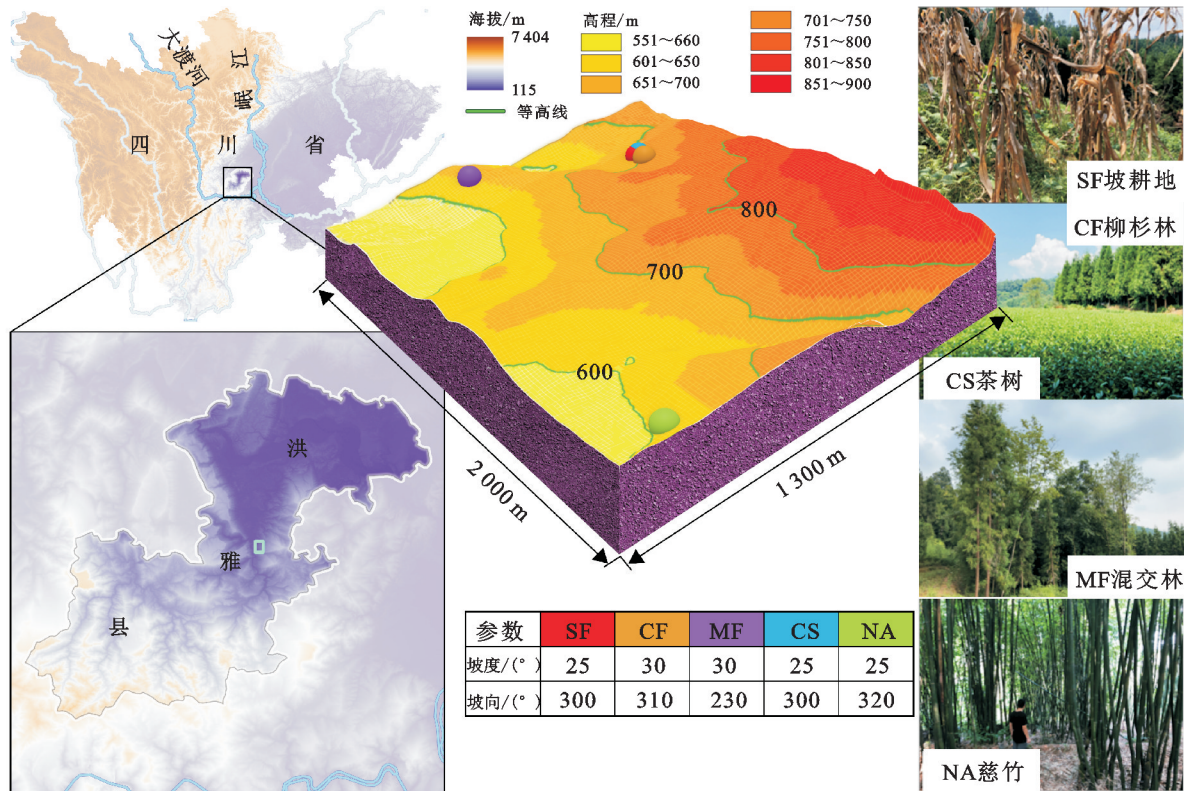


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

1.3 土壤理化性状分析

土壤团聚体稳定性采用经典干湿筛法^[15]。四分法选取 100 g 的原状土风干样,通过孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm 套筛,分别计算各级干筛团聚体占土样总量的百分比。按干筛法测定的各粒级土壤所占百分比,配制成 50 g 风干原状土样,然后用机械湿润法测定水稳性团聚体的组成。将样品浸润 3 min,启动土壤团粒分析仪(TTF-100),转速维持在 30 r/min,上下振幅 4 cm,持续 10 min;缓慢使套筛离开水面,

待水稍干后,将团聚体轻轻冲洗至已知重量的铝盒中,弃去上层清液,在烘箱中 40℃烘干,计算各粒径水稳性团聚体的质量比。土壤水分体积分数(WC)、质量密度(BD)采用环刀法测定;pH 采用电位法(土水比 1:2.5)测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾—硫酸消化法测定;活性有机碳(ROC)采用 KMnO₄氧化—比色法测定;具体步骤参照 YANG 等^[10]方法。惰性有机碳(NOC)为土壤有机碳与活性有机碳含量差。

退耕还林后,紫色土理化属性见表 1。SOC、NOC、水分体积分数显著增加($p<0.05$);而砾石含量、质量密度、pH 显著下降($p<0.05$);茶园土壤 ROC 显著增加,而慈竹林土壤 ROC 显著减少($p<0.05$)。退耕还林促进土壤有机质形成,改善土壤物理性状,但也引起土壤酸化等问题。

表 1 研究区土壤理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties of the study area

样地	土层 深度/cm	砾石/%	质量密度/ (g·cm ⁻³)	水分体积 分数/%	pH	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	易氧化有机碳/ (g·kg ⁻¹)	惰性有机碳/ (g·kg ⁻¹)
坡耕地 (SF)	0—10	17.37±3.31Aa	1.31±0.08Aa	30.97±4.46Ba	5.73±0.61Aa	12.11±0.99Ca	2.42±0.51BCa	9.69±1.37Da
	10—20	15.96±2.53Aa	1.37±0.11Aa	29.27±2.23Ca	5.70±0.51Aa	10.34±0.90Ba	2.17±0.52ABa	8.16±0.39Ba
	20—30	18.90±7.75Aa	1.45±0.02Aa	27.65±0.74Ca	5.72±0.34Aa	5.25±1.03Cb	0.86±0.14Bb	4.40±1.16Cb
	30—40	16.99±1.64Aa	1.44±0.08ABa	26.89±2.01ABa	5.60±0.47ABa	4.64±1.04Cb	0.72±0.13Bb	3.92±0.93Cb
柳杉林 (CF)	0—10	5.04±1.53Bb	1.24±0.04ABa	33.25±1.16Ba	4.81±0.05Bb	12.72±0.72Ca	1.69±0.07Ca	11.04±0.69CDa
	10—20	7.67±2.27Bab	1.30±0.02ABa	31.28±0.49BCb	4.99±0.08Ba	10.62±0.37Bb	1.55±0.44BCa	9.07±0.70Bb
	20—30	10.19±1.39Ba	1.32±0.04Ba	29.69±0.28BCc	5.05±0.07Ba	9.66±0.72Bbc	1.37±0.13Aa	8.29±0.80Bbc
	30—40	9.70±1.09Ba	1.34±0.09Ba	29.01±0.16Ac	5.10±0.03Ca	8.85±0.59Bc	1.18±0.47ABa	7.67±0.29Bc
混交林 (MF)	0—10	0.02±0.03Ca	1.02±0.09Cc	44.46±2.94Aa	4.72±0.08Bc	18.77±1.41Ba	3.10±0.38Ba	15.67±1.30ABa
	10—20	0.05±0.05Da	1.26±0.01Bb	33.16±1.44Bb	4.89±0.05Bbc	10.86±0.96Bb	0.96±0.22Cb	9.91±1.14Bb
	20—30	0.17±0.03Ca	1.45±0.05Aa	27.41±1.20Cc	4.99±0.14Bb	9.01±0.56Bb	0.87±0.07Bb	8.14±0.62Bb
	30—40	0.30±0.22Ca	1.53±0.07Aa	25.05±2.40Bc	5.26±0.10BCa	9.00±1.29Bb	0.86±0.08ABb	8.14±1.36Bb
茶园 (CS)	0—10	1.95±0.30Cb	1.12±0.02BCd	42.92±0.74Aa	4.79±0.04Bc	22.41±2.40Aa	4.09±0.16Aa	18.31±2.52Aa
	10—20	3.47±0.83Cab	1.23±0.02Bc	36.42±0.40Ab	4.93±0.12Bc	16.59±1.78Ab	2.88±0.43Ab	13.70±1.49Ab
	20—30	7.11±4.71BCab	1.30±0.01Bb	34.63±1.03Ab	5.10±0.07Bb	13.15±1.17Abc	1.62±0.07Ac	11.53±1.18Ab
	30—40	8.14±2.78Ba	1.49±0.02Aa	28.60±1.82Ac	5.31±0.04BCa	11.92±2.46Ac	1.42±0.59Ac	10.50±1.89Ab
慈竹林 (NA)	0—10	0.60±0.29Cb	1.11±0.11BCc	42.00±3.44Aa	5.21±0.10Bc	15.06±2.88Ca	1.69±0.90Ca	13.37±2.05BCa
	10—20	0.71±0.36Cdb	1.28±0.05ABb	33.58±2.15Bb	5.29±0.10ABc	10.07±0.37Bb	0.92±0.31Ca	9.16±0.67Bb
	20—30	2.19±0.52Ca	1.35±0.06Bab	31.14±2.04Bbc	5.54±0.10Ab	9.34±0.49Bb	0.79±0.29Ba	8.55±0.37Bb
	30—40	1.14±0.78Cb	1.43±0.06ABa	27.37±1.33ABc	5.74±0.09Aa	8.77±0.37Bb	0.76±0.20ABa	8.00±0.33Bb

注:同列不同大写字母表示同一土层深度、不同植被类型下土壤属性差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同植被类型下、不同土层深度土壤属性差异显著($p<0.05$)。下同。

1.4 数据处理

本研究采用几何平均直径(GMD)、平均重量直径(MWD)、大团聚体含量($R_{0.25}$)、团聚体破坏率($PAD_{0.25}$)和分形维数(PSD)5 项指标综合表征还林树种紫色土团聚体稳定性的变化,计算公式^[16-20]为:

$$GMD=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n\omega_i\ln X_i}{\sum_{i=1}^n\omega_i}\right]$$
 (1)

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^nX_i\omega_i}{\sum_{i=1}^n\omega_i}$$
 (2)

$$R_{0.25}=\omega_s\times100\%$$
 (3)

$$PAD_{0.25}=\frac{(\omega_d-\omega_s)}{\omega_d}\times100\%$$
 (4)

$$PSD=3-\frac{\lg(\frac{\omega_i}{\omega_T})}{\lg(\frac{X_i}{X_{\max}})}$$
 (5)

式中: X_i 为某级团聚体平均直径(mm); ω_i 为某级团

聚体组分的质量百分数; ω_s 为粒径 >0.25 mm 的水稳性团聚体质量分数; ω_d 为粒径 >0.25 mm 的稳性团聚体质量分数; ω_i 为团聚体粒径 $<X_i$ 的累计质量(g); ω_T 为团聚体总质量(g); $X_{\max}$ 为团聚体最大粒级的平均直径(mm)。

采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,用 Pearson 法进行土壤理化性质指标和团聚体稳定性指标的相关分析;用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同植被下粒径含量、土壤理化属性和团聚体稳定性指标的差异;采用 Origin 2021 软件进行图像化处理。

2 结果与分析

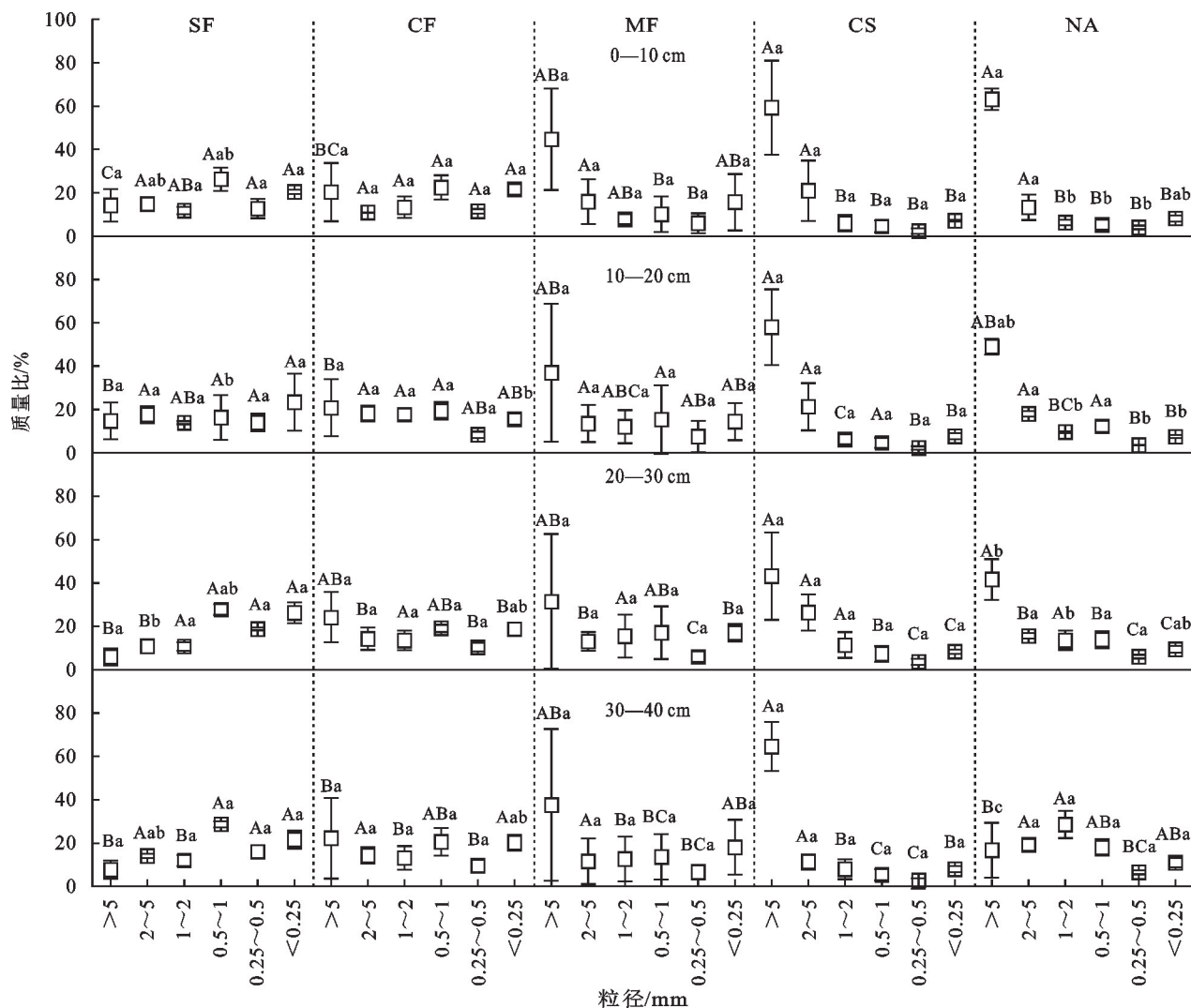
2.1 紫色土水稳性团聚体的分布特征

土壤水稳性团聚体 $>5,2\sim5,1\sim2,0.5\sim1,0.25\sim0.5,<0.25$ mm 含量分别为 10.64%~56.26%,13.49%~19.98%,7.86%~14.51%,5.44%~24.72%,2.75%~15.37%,7.74%~22.89%(图 2)。

紫色土坡耕地还林后,人工林土壤 >5 mm 的团聚体含量显著上升 105.64%~428.71%($p<0.05$),而 0.5~1 mm 团聚体含量显著下降 17.54%~77.99%($p<$

0.05)。土壤优势团聚体由 0.5~1 mm 变为 >5 mm, 还林后土壤优势团聚体变化速率有茶园>慈竹林>混交林>柳杉林。0—20 cm 土壤优势团聚体由坡耕地的

<0.25 mm 转变为人工林>5 mm(柳杉林除外);而 20—40 cm 则由 0.5~1 mm 转变为>5 mm 粒径(图 2), 土壤团聚体演变具有明显的层次分异。



注:不同大写字母表示同一土层深度,不同植被类型下团聚体差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同植被类型下,不同土层深度团聚体差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同还林树种土壤水稳性团聚体的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of water-stable aggregates of soil under different reforestation tree species

2.2 紫色土团聚体稳定性的变化

GMD、MWD、 $R_{0.25}$ 、 $PAD_{0.25}$ 和 PSD 分别为 0.80~3.46 mm、1.75~5.10 mm、77.11%~92.27%、5.09%~20.43%和 2.38~2.63(表 2)。以坡耕地为参照,人工林 GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 分别上升 46.93%~330.30%, 47.01%~191.03%和 5.02%~19.66%,增加显著(柳杉林除外);而 $PAD_{0.25}$ 和 PSD 分别下降 15.41%~75.09%和 1.65%~9.20%,下降显著(柳杉林除外)。土壤团聚体的稳定性表现为茶园>慈竹林>混交林>柳杉林>坡耕地。因此,人工林土壤团聚体稳定性均得到提升,茶园土壤团聚体稳定性最高。同样,人工林土壤团聚体稳定性也体现出土层差异,混交林和慈竹林 0—20 cm 土层土壤团聚体的稳定性提升速率高于

20—40 cm 土层;而柳杉林和茶园 20—40 cm 土层土壤团聚体的稳定性提升速率高于 0—20 cm 土层(表 2)。

2.3 土壤理化性质与土壤团聚体的关系

由图 3 可知,土壤>5 mm 团聚体含量与土壤水分体积分数(WC)、土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、惰性有机碳(NOC)呈显著正相关($p<0.05$),而与砾石含量(Gravel)、质量密度(BD)和 pH 呈显著负相关($p<0.05$)。

GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 与土壤水分体积分数(WC)、土壤有机碳(SOC)、惰性有机碳(NOC)和土壤>5 mm 团聚体含量呈极显著正相关($p<0.01$),与易氧化有机碳(ROC)显著正相关($p<0.05$, $R_{0.25}$ 除外);GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 与砾石含量(Gravel)呈极显著负相关($p<0.01$),

GMD、MWD 和 $R_{0.25}$ 与 BD 呈极显著负相关($p<0.01$), 与 pH 呈显著负相关($p<0.05$, $R_{0.25}$ 除外)。PAD_{0.25} 和 PSD 与砾石含量(Gravel)呈极显著正相关($p<0.01$), 与 BD 呈正相关($p<0.05$); PAD_{0.25} 和 PSD 与土壤水分体积分数(WC)、土壤有机碳(SOC)、惰性有机碳(NOC)和土壤 >5 mm 团聚体含量呈极显著负相关($p<0.01$)。

表 2 不同还林树种的土壤团聚体稳定性指标

Table 2 Soil aggregate stability indexes of different reforestation tree species

样地	土层深度/cm	GMD/mm	MWD/mm	$R_{0.25}/\%$	PAD _{0.25} /%	PSD
坡耕地(SF)	0—10	0.91±0.17Ba	2.03±0.52Ca	79.57±0.96Ba	17.67±1.32ABa	2.60±0.01Aa
	10—20	0.96±0.38Ca	2.13±0.59Ca	76.60±13.14Ba	21.05±13.85Aa	2.62±0.14Aa
	20—30	0.60±0.09Ca	1.29±0.24Ba	73.77±4.79Ca	23.49±4.88Aa	2.67±0.05Aa
	30—40	0.75±0.16Ba	1.56±0.33Ba	78.51±4.21Ba	19.50±4.43Aa	2.61±0.05Aa
柳杉林(CF)	0—10	1.01±0.33Ba	2.34±0.88BCa	78.38±2.45Bb	19.69±2.78Aa	2.62±0.02Aa
	10—20	1.33±0.39BCa	2.66±0.79BCa	84.49±2.61ABa	13.67±2.88ABa	2.52±0.03ABb
	20—30	1.21±0.31BCa	2.71±0.66ABa	81.27±2.94Bab	17.33±3.18ABa	2.59±0.04Bab
	30—40	1.18±0.50Ba	2.58±1.14Ba	79.79±3.52Bab	18.42±3.57Aa	2.60±0.04Aa
混交林(MF)	0—10	2.49±1.49ABa	4.14±1.75ABa	84.37±12.97ABa	11.51±14.45ABCa	2.50±0.19ABa
	10—20	2.22±1.45ABCa	3.59±2.37ABCa	85.56±8.57ABa	10.46±8.92ABa	2.50±0.12ABa
	20—30	1.73±1.13ABCa	3.22±1.97ABa	82.93±4.04Ba	14.25±4.48Ba	2.56±0.02Ba
	30—40	2.10±1.50Ba	3.56±2.38ABa	81.95±12.67ABa	15.50±12.41ABa	2.56±0.13Aa
茶园(CS)	0—10	3.75±1.05Aa	5.32±1.06Aa	92.93±0.34Aa	4.40±0.48Ca	2.37±0.06Ba
	10—20	3.62±0.93Aa	5.24±0.88Aa	92.37±1.47Aa	4.87±1.64Ba	2.38±0.02Ba
	20—30	2.86±0.90Aa	4.41±1.10Aa	91.71±0.97Aa	5.56±1.68Ca	2.38±0.01Ca
	30—40	3.61±0.79Aa	5.42±0.67Aa	92.07±1.46Aa	5.52±1.63Ba	2.41±0.02Ba
慈竹林(NA)	0—10	3.46±0.15Aa	5.36±0.17Aa	91.85±1.39Aab	5.64±0.58BCb	2.42±0.05Ba
	10—20	2.79±0.23ABab	4.56±0.23ABab	92.50±0.71Aa	5.58±0.36Bb	2.36±0.02Ba
	20—30	2.25±0.51ABb	4.01±0.64Ab	90.63±1.59Aab	7.78±1.28Cab	2.42±0.03Ca
	30—40	1.45±0.42Bc	2.53±0.80Bc	88.99±2.07ABb	9.27±1.88ABa	2.42±0.04Ba

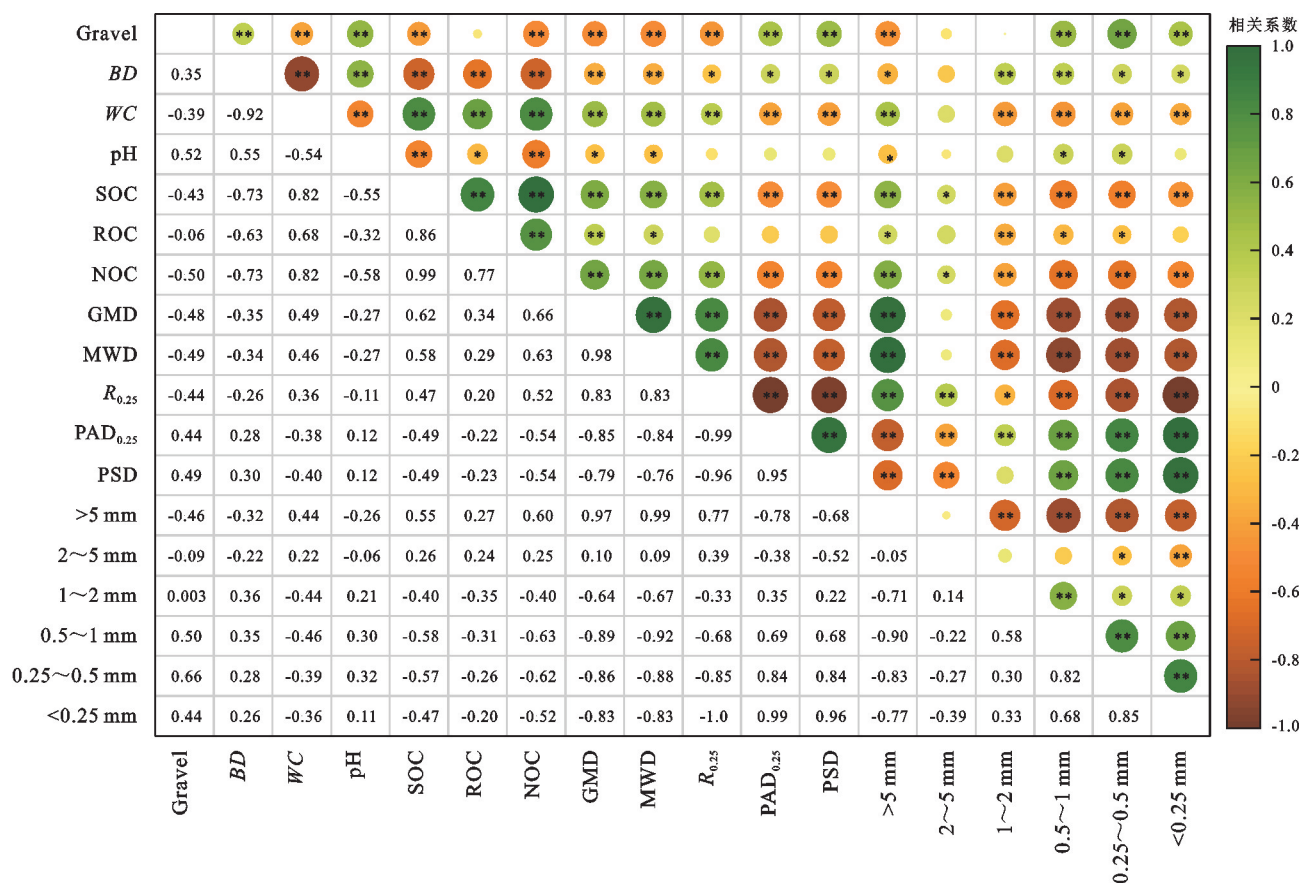
综上所述,砾石含量与土壤优势团聚体(>5 mm)及其团聚体稳定性呈极显著负相关($p<0.01$);而土壤水分体积分数、惰性碳含量与优势团聚体(>5 mm)及其团聚体稳定性呈极显著正相关($p<0.01$)。本研究表明,土壤惰性有机碳、风化(砾石含量)和土壤水分体积分数共同影响土壤团聚体的形成及稳定性。

3 讨论

3.1 还林树种对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土地利用方式的改变对土壤团聚体的粒径变化和稳定性产生重要影响^[4,21-23]。本研究发现,华西雨屏区紫色土坡耕地还林后,紫色土优势团聚体均由耕地(玉米地)的 <0.25 mm 和 $0.5\sim1$ mm 粒径转变为人工林的 >5 mm,大团聚体含量显著增加。植被恢复后,人工林凋落物增加,在微生物作用下合成腐殖质,进而作为胶结物质促进大团聚体的形成。表层(0—20 cm)受人为耕作影响,玉米地土壤以微团聚体为主,可以有效地保续肥力,但抗侵蚀能力较弱。

坡耕地还林后,人为影响减弱,土壤微团聚体在腐殖质作用下形成大团聚体,抗侵蚀能力显著增强;茶园土壤优势团聚体(>5 mm)含量高于其他还林树种,与川西地区的研究^[7]不同,川西地区紫色土退耕后,土壤优势团聚体转化为微团聚体。陈玉真等^[24]研究认为,随着植茶年限的增加,人为修剪枝叶和凋落物回归土壤,地下根系生成分泌物,抵偿土壤有机质的消耗。成龄茶园土壤受到机械扰动较少,改变团聚体的演变进程,还林时间和管理方式引起茶园土壤团聚体不同演化方向。柳杉—光皮桦组成的混交林凋落物归还量高于柳杉纯林,其有机碳总量及惰性有机碳含量均较高,引起混交林土壤大团聚体含量更高(图 2);柳杉的强木质化和厚角质层特征导致其不溶性物质含量较阔叶树的光皮桦更高^[25],叶片凋落后难以分解。腐殖质形成的速率低,在表层缺乏将小团聚体黏结为大团聚体的动力因子。因此,树种类型是影响华西雨屏区紫色土坡耕地还林后人工林土壤团聚体的形成和分布的重要因素。



注：* 表示 $p<0.05$ ；* * 表示 $p<0.01$ ；Gravel 为砾石含量（%）；BD 为质量密度（ g/cm^3 ）；WC 为水分体积分数（%）；SOC 为土壤有机碳（ g/kg ）；ROC 为易氧化有机碳（ g/kg ）；NOC 为惰性有机碳（ g/kg ）。

图 3 土壤理化性质与团聚体的相关性

Fig.3 Correlations between soil physical and chemical properties and aggregates

华西雨屏区紫色土坡耕地还林后,人工林土壤团聚体各稳定性指标均显著提升(柳杉林土壤团聚体 GMD 和 MWD 除外),与 ZHANG 等^[26]的研究结果一致,其中,茶树土壤团聚体稳定性上升最为明显。茶园剪枝、施用有机肥等使有机物源更为丰富,其 C 循环速率高于其他人工林^[10],土壤有机碳总量和惰性有机碳含量均显著高于其他人工林(表 1)。因此,在腐殖质的胶结作用下形成大团聚体速率更高(图 2),进而提高土壤团聚体的稳定性。混交林和慈竹林 0—20 cm 土层土壤团聚体稳定性提升速率高于 20—40 cm 土层,与在西南地区^[27]和东北地区^[28]还林后表层土壤团聚体稳定性提升更多的研究结果相似。主要是由于表层土壤腐殖质形成的速率高于下层土壤^[10],土壤腐殖质具有明显的表聚性(表 1)。本研究人工林土壤团聚体稳定性随惰性有机碳含量的增加而增加(图 3),也证实腐殖质对土壤团聚体稳定性的影响。本研究发现,人工林除表层土壤团聚体的稳定性显著提升外,20—40 cm 土壤团聚体的稳定性也得到显著提升,茶园和柳杉林 20—40 cm 土壤团聚体稳定性的提升甚至高于表层。由于深根系林木根系生

长活动,一方面促进 20—50 cm 土壤腐殖质的形成^[10];另一方面促进紫色土的风化^[13],土壤砾石含量显著下降,细土物质增加。细土物质在腐殖质的胶结作用下形成大团聚体(图 4)。

3.2 紫色土植被恢复后团聚体的形成机理

华西雨屏区紫色土坡耕地退耕还林进程中,显著增加凋落物的归还,土壤腐殖质含量增加(图 4);扎根较深的林木,通过根系生长活动,可为 20—50 cm 土壤提供有机物源,促进土壤腐殖质的形成^[10]。因此,在腐殖质的胶结作用下,人工林土壤大团聚体含量显著增加,紫色土的抗侵蚀能力增强。退耕还林后,人工林土壤砾石含量显著下降(表 1),土壤风化增强,细土物质增加(图 4),为土壤团聚体的形成提供物质基础。前期研究^[13]表明,紫色砂、页岩风化成土过程中,含量丰富且易风化的长石类矿物在降雨作用下, Na^+ 淋失,部分 K^+ 转化为伊利石或蛭石等黏土矿物保存下来,长石类矿物的风化为土壤团聚体的形成提供黏土矿物。

退耕还林后,人工林土壤水分体积分数显著增加(表 1),促进人工林表层土壤团聚体的形成及其稳定性的维持,其影响机制有待进一步研究。

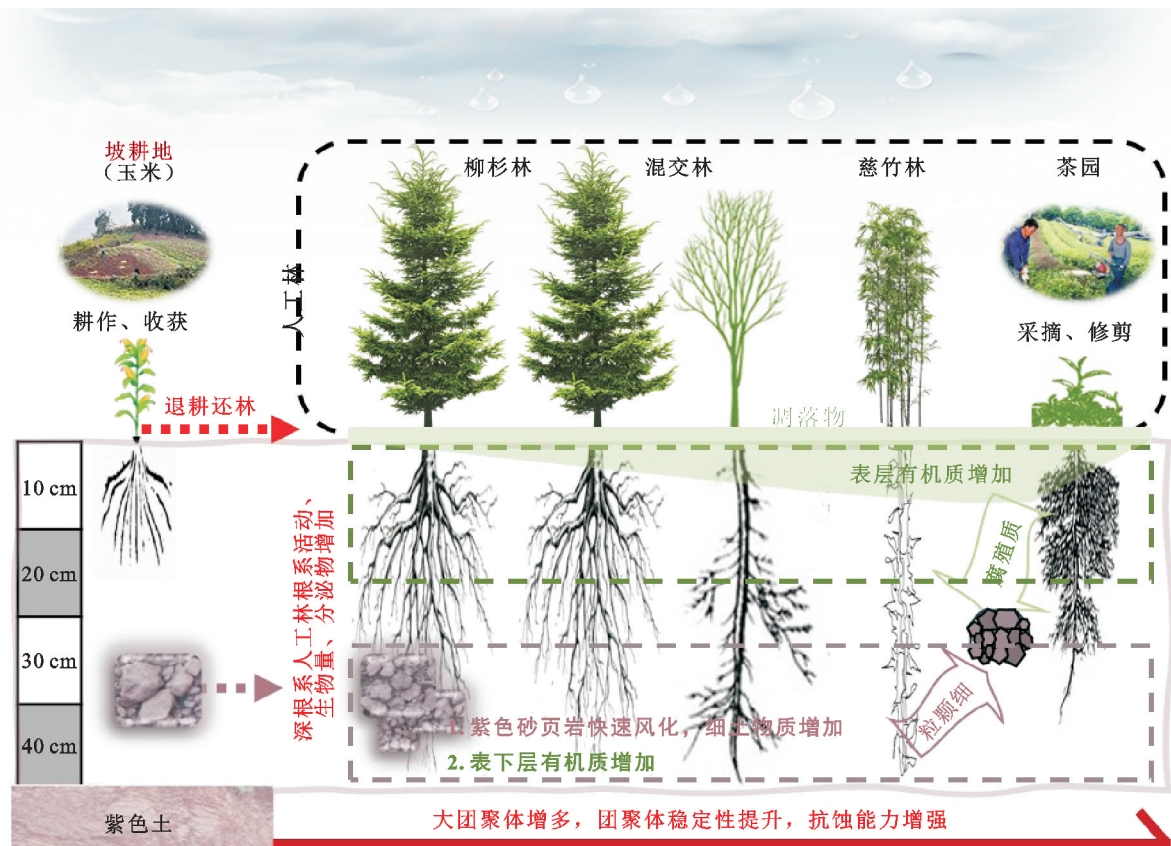


图 4 还林后紫色土团聚体形成示意

Fig.4 Schematic diagram of aggregate formation in purple soil after afforestation

4 结 论

还林树种类型对紫色土团聚体的演化具有重要影响,华西雨屏区紫色土坡耕地还林 20 年后,4 种人工林土壤大团聚体含量显著增加,土壤优势团聚体由微团聚体或中团聚体转变为大团聚体;人工林土壤团聚体稳定性显著增强,表现为茶园>慈竹林>混交林>柳杉林,以茶树和慈竹还林较优。林木生长促进紫色土风化,为土壤团聚体形成提供物质基础;人工林土壤形成的腐殖质作为胶结物质,促进土壤大团聚体的形成及其稳定性的维持。因此,本研究可为长江上游广泛分布的紫色土区的水土流失及其人工林生态系统稳定性提供重要的参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.

LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J].Acta Pedologica Sinica,2023,60(3):627-643.

[3] 陈路明.平朔矿区不同植被恢复模式对土壤水稳性团聚体的影响研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.

CHEN L M. Study on effects of different vegetation restoration patterns on soil aggregate in pingshuo open-cast mine [D]. Beijing: China University of Geosciences,2016.

[4] 王文鑫,王文龙,郭明明,等.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[J].中国农业科学,2019,52(16):2845-2857.

WANG W X, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of natural vegetation restoration on characteristics of soil aggregate and soil erodibility of gully heads in Gully Region of the Loess Plateau[J].Scientia Agricultura Sinica,2019,52(16):2845-2857.

[5] 安韶山,张杨,郑粉莉.黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J].中国水土保持科学,2008,6(2):66-70.

AN S S, ZHANG Y, ZHENG F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau[J].Science of Soil and Water Conservation,2008,6(2):66-70.

[6] 毛艳玲,杨玉盛,邢世和,等.土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2008,22(4):132-137.

- MAO Y L, YANG Y S, XING S H, et al. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 132-137.
- [7] 谷思玉, 胡洋, 聂艳龙, 等. 农垦九三管理局不同开垦年限农田黑土团聚体变化[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(11): 56-62.
- GU S Y, HU Y, NIE Y L, et al. Change of aggregate in Agricultural Reclamation Jiusan Administration Bureau black soil with different reclamation years[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(11): 56-62.
- [8] DENG L, LIU S G, KIM D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's Grain for Green Program[J]. Global Environmental Change, 2017, 47: 13-20.
- [9] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713-722.
- TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713-722.
- [10] YANG F, ZHONG Y J, HAN G Z, et al. Effect of different vegetation restoration on soil organic carbon dynamics and fractions in the Rainy Zone of Western China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 331: e117296.
- [11] 彭珏, 陈家赢, 王军光, 等. 中国典型地带性土壤团聚体稳定性与孔隙特征的定量关系[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 113-121.
- PENG J, CHEN J Y, WANG J G, et al. Linking aggregate stability to the characteristics of pore structure in different soil types along a climatic gradient in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 113-121.
- [12] 范家伟, 朱广宇, 上官周平, 等. 黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 19-26.
- FAN J W, ZHU G Y, SHANGGUAN Z P, et al. Dynamics changes of soil aggregate stability and soil erodibility of *Robinia pseudoacacia* plantations in hilly region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 19-26.
- [13] 杨帆, 郝梓君, 黄来明, 等. 华西雨屏区植被恢复对紫色土酸化的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1410-1419.
- YANG F, HAO Z J, HUANG L M, et al. Effect of vegetation restoration on Purple soil acidification in rainy area of Western China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1410-1419.
- [14] 郭小军, 赖元长, 先开炳. 洪雅退耕还林地苦竹生物量与碳储量研究[J]. 四川林业科技, 2013, 34(1): 11-16.
- GUO X J, LAI Y C, XIAN K B. Biomass and carbon storage of *Pleioblastus amarus* on the defarming-and-reafforestation land in Hongya County[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2013, 34(1): 11-16.
- [15] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses (1)[J]. Soil Science Society of America Journal, 1936, 17(2001): e165.
- [16] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5481-5490.
- DENG H, GAO M, LONG Y, et al. Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5481-5490.
- [17] 何淑勤, 郑子成, 宫渊波. 不同退耕模式下土壤水稳性团聚体及其有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 229-233.
- HE S Q, ZHENG Z C, GONG Y B. Distribution characteristics and soil organic carbon of soil water-stable aggregates with different de-farming patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 229-233.
- [18] PINHEIRO E F M, PEREIRA M G, ANJOS L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 77(1): 79-84.
- [19] YOUKER R E, MCGUINNESS J L. A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analyses of soils[J]. Soil Science, 1957, 83(4): 291-294.
- [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.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. The fractal characteristics of soil represented by the weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [21] ZHU G Y, SHANGGUAN Z P, HU X Z, et al. Effects of land use changes on soil organic carbon, nitrogen and their losses in a typical watershed of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: e108443.
- [22] 杨宁, 邹冬生, 付美云, 等. 紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2361-2368.
- YANG N, ZOU D S, FU M Y, et al. Properties of soil aggregates in purple soils during re-vegetation on sloping land in relation to soil characteristics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2361-2368.

(下转第 301 页)

- R, et al. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 309-320.
- [23] MAO B, ZHAO L, ZHAO Q, et al. Effects of ultraviolet (UV) radiation and litter layer thickness on litter decomposition of two tree species in a semi-arid site of Northeast China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(3): 416-428.
- [24] BLANCO J A, IMBERT J B, CASTILLO F J. Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106(3): 397-414.
- [25] HUANG G, LI Y. Photodegradation effects are related to precipitation amount, precipitation frequency and litter traits in a desert ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 383-392.
- [26] WANG L F, CHEN Y M, ZHOU Y, et al. Environmental conditions and litter nutrients are key determinants of soluble C, N, and P release during litter mixture decomposition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: e104928.
- [27] 肖文娅,刁娇娇,费菲,等.不同强度间伐对杉木人工林凋落物分解速率的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1291-1299.
- XIAO W Y, DIAO J J, FEI F, et al. Effects of different intensity thinning on litter decomposition in Chinese fir plantations[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1291-1299.
- [28] WANG C Y, LÜ Y N, WANG L, et al. Insights into seasonal variation of litter decomposition and related soil degradative enzyme activities in subtropical forest in China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 683-689.
- [29] QIN Q Q, WANG H Y, LI X, et al. Spatial heterogeneity and affecting factors of litter organic carbon and total nitrogen over natural spruce-fir mixed forests in northeastern China[J]. *CATENA*, 2019, 174: 293-300.
- [30] 冯晓娟,戴国华,刘婷,等.从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J]. *中国科学:地球科学*, 2024, 54(11): 3421-3432.
- FENG X J, DAI G H, LIU T, et al. 2024. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(11): 3421-3432.
- [31] KUZUYAKOV Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- components in litter of several native trees at different phenological stages in the Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(1): 9-15.
- [26] ZHANG Y, LI P F, LIU X J, et al. Changes in soil aggregate fractions, stability, and associated organic carbon and nitrogen in different land use types in the Loess Plateau, China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): e3963.
- [27] LIU M, HAN G L, ZHANG Q. Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in Southwest China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): e3809.
- [28] WU Y, WANG Q, WANG H M, et al. Effects of poplar shelterbelt plantations on soil aggregate distribution and organic carbon in Northeastern China[J]. *Forests*, 2022, 13(10): e1546.

(上接第292页)

- [23] 程欢,宫渊波,付雨欣,等.四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 109-115.
- CHENG H, GONG Y B, FU Y X, et al. Soil aggregate stability and characteristics of organic carbon components in three forests of the southwest edge of Sichuan Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 109-115.
- [24] 陈玉真,王峰,尤志明,等.不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能[J]. *山地学报*, 2016, 34(1): 38-45.
- CHEN Y Z, WANG F, YOU Z M, et al. Soil physical properties and infiltration capability with different tea plantation ages[J]. *Mountain Research*, 2016, 34(1): 38-45.
- [25] 何聪,任颖,麦淑媛,等.华西雨屏区几种乡土树种不同物候关键时期凋落物的有机组分特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 9-15.
- HE C, REN Y, MAI S Y, et al. Characteristics of organic