

# 甘肃小陇山林区不同林分对土壤团聚体稳定性的影响

崔蕊蕊<sup>1,2</sup>, 张嘉良<sup>1,2</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 王玉杰<sup>1,2</sup>, 王鑫皓<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083;  
2.北京林业大学水土保持学院重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083)

**摘要:**为探究甘肃小陇山不同林分对土壤团聚体稳定性的影响,选取小陇山林区 3 种典型林分(油松林、日本落叶松林、锐齿栎林)为研究对象,用 Le Bissonnais 中的快速湿润(FW)处理方法测定其不同土层深度(0—10,10—20,20—40 cm)土壤团聚体平均质量直径(MWD),并进一步研究土壤基本理化性质(土壤机械组成、SOC、CEC、pH)和根系特征(细根与极细根比例、RLD、RMD、SRL)对土壤团聚体稳定性的影响。结果表明:不同林分下土壤团聚体稳定性表现为锐齿栎林>油松林>日本落叶松林。不同土层深度土壤团聚体 MWD 表现为 0—10 cm>10—20 cm>20—40 cm。由一元线性回归模型可知,对土壤团聚体 MWD 贡献较大的土壤特征因子是 CEC( $R^2=0.55$ )和 SOC( $R^2=0.54$ ),贡献较大的根系特征因子是 RMD( $R^2=0.60$ )和 RLD( $R^2=0.45$ ),土壤团聚体稳定性与这 4 个因子均呈显著正相关( $P<0.05$ )。总体而言,不同林分土壤团聚体稳定性差异不同,团聚体稳定性随土层深度增加而降低,且对土壤团聚体稳定性影响最大的因子是根质量密度。

**关键词:**土壤团聚体稳定性;快速湿润;典型林分;根系特征;土层深度

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0275-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.038

## Effect of Different Forests on the Soil Aggregate Stability in Xiaolongshan Forest Region of Gansu Province

CUI Xinrui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jialiang<sup>1,2</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, WANG Yujie<sup>1,2</sup>, WANG Xinhao<sup>1,2</sup>

(1.Jinyun Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation,

Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest

Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to reveal the effect of different forests on soil aggregate stability in Xiaolongshan forest region of Gansu province, three typical forest stands (*Pinus tabuliformis*, *Larix kaempferi*, *Quercus aliena* var. *acuteserrata*) were selected as objects of study. The fast wetting (FW) method in Le Bissonnais was used to determine the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates in different soil depths (0—10, 10—20, 20—40 cm), and the effects of soil physicochemical properties (soil mechanical composition, SOC, CEC, pH) and root characteristics (proportions of fine root and very fine root, RLD, RMD, SRL) on soil aggregate stability were further studied. The results showed that the stability of soil aggregates under different forest stands were ranked as *Quercus aliena* var. *acuteserrata* > *Pinus tabuliformis* > *Larix kaempferi*. Stability of soil aggregates of different soil depths were ranked as 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm. According to simple linear regression models, the soil characteristic factors that contributed the most to the MWD of soil aggregates were CEC ( $R^2=0.55$ ) and SOC ( $R^2=0.54$ ), the root characteristic factors that contributed the most to the MWD of soil aggregates were RMD ( $R^2=0.60$ ) and RLD ( $R^2=0.45$ ), and there was a significant positive correlation between soil aggregate stability and the four factors above. Overall, soil aggregate stability differed in different forest stands, soil aggregate stability decreased with the increasing soil depth, and the factor that influenced the stability of soil aggregates the most was RMD.

**Keywords:** soil aggregate stability; fast wetting; typical forest stand; root characteristic; soil depth

收稿日期:2021-02-22

资助项目:国家自然科学基金项目“降雨条件下植物根系动态固土护坡效应研究”(31971726)

第一作者:崔蕊蕊(1998—),女,硕士,主要从事土壤团聚体与土壤微生物研究。E-mail:595806648@qq.com

通信作者:王云琦(1979—),女,教授,主要从事水土保持工程研究。E-mail:wangyunqi@bjfu.edu.cn

土壤团聚体作为组成土壤的基本结构单元<sup>[1]</sup>,其数量和质量影响土壤肥力、土壤有机碳的产生和微生物活性等,良好的土壤团聚体可以提升土地生产力,提高土壤抗蚀性,降低水土流失的风险,对土壤质量起到至关重要的作用,因此通常把土壤团聚体稳定性作为评估土壤质量的关键指标<sup>[2]</sup>。常用平均质量直径(mean weight diameter, MWD)衡量土壤团聚体稳定性,MWD 越高,表示土壤团聚体越稳定<sup>[3-4]</sup>。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是土壤的重要组成部分之一,作为土粒胶结物被包裹于土壤团聚体内,有利于提升土壤团聚体稳定性。土壤阳离子交换量(cation exchange capability, CEC)是土壤吸附交换的阳离子容量,反映土壤对酸的缓冲能力<sup>[5]</sup>。分析团聚体稳定性随 SOC、CEC、土壤机械组成等土壤因子变化特征,对提升土地质量和开展后续水土保持工作具有重要意义。

影响土壤团聚体稳定性的因素还有植被类型和根系特征等外部因素<sup>[6-7]</sup>。有研究<sup>[8]</sup>表明,植物根系通过在土壤内部进行穿插、缠绕、分泌胶结物质等固结土壤团聚体,从而提高土壤团聚体稳定性。随着研究的进步,根长密度(root length density, RLD)、根质量密度(root mass density, RMD)和比根长(specific root length, SRL)等指标常被用于反映根系特征分布与土壤特征的关系。但植物根系对土壤团聚体稳定性的作用仍存在争议,黄林等<sup>[9]</sup>研究得出,径级 1~2 mm 根系对改良土壤结构、增加土壤有机碳和全氮含量作用最为显著;而孙一惠等<sup>[10]</sup>研究得出,根系改善土壤团粒结构的性能主要取决于<1 mm 根系含量。因此,关于根系特征对土壤团聚体稳定性的影响还有待进一步研究。

小陇山林区位于我国甘肃省东南部,是嘉陵江、

渭河上中游地区重要的水源涵养林区<sup>[11]</sup>。近年来在小陇山林区开展的森林保护和森林植被恢复工程,大幅提高林区内植被覆盖率<sup>[12]</sup>。然而在进行小陇山林业生态发展的过程中,还存在土壤侵蚀问题<sup>[13]</sup>。大量研究<sup>[14-16]</sup>表明,土壤团聚体稳定性与林分类型和土层深度密切相关,且多随土层深度增加而减低。为深入探究团聚体稳定性的影响因素,本研究通过选取小陇山林区内 3 种典型森林土壤为对象,对土壤理化特征和根系性状指标进行数据测定和统计分析,从林分类型和土层深度来研究土壤团聚体稳定性影响因素,旨在明确生物和非生物因素对团聚体稳定性的影响,以期小陇山林区今后水土保持工作及森林资源合理经营提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于甘肃省东南部的小陇山林区(105°54′—106°40′E, 34°24′—34°33′N),地处我国南北地理位置交界处,因而兼具南北气候与植被特点,年均气温 7~12℃,年降水量 460~800 mm,降雨季节性变化显著,年蒸发量 1 420 mm,湿度 0.36~0.45。选取的样地土壤均为山地褐土,土层厚度为 40—60 cm,土壤含水率和有机质含量较高,锐齿栎林下植被主要有雀梅藤(*Sageretia thea*)、西北栒子(*Cotoneaster zabelii*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、微毛樱桃(*Cerasus clarifolia*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等,日本落叶松林下植被主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、马氏槭(*Acer maximowiczii*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等,油松林下植被主要有胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、青莢叶(*Helwingia japonica*)、卫矛(*Euonymus alatus*)等。

各标准地特征见表 1。

表 1 标准地基本情况

植被类型	样地	林分起源	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	郁闭度	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm
油松	I	人工林	1658	21	阳坡	0.86	36	14.1	16.53
	II	人工林	1640	22	阴坡	0.87	36	15.7	17.49
	III	人工林	1636	19	阳坡	0.87	36	14.4	16.98
日本落叶松	I	天然林	1672	21	半阴坡	0.85	33	12.6	13.09
	II	天然林	1666	22	阴坡	0.83	33	13.1	14.37
	III	天然林	1678	20	阴坡	0.84	33	12.4	13.62
锐齿栎	I	人工林	1691	23	阳坡	0.84	32	8.6	10.34
	II	人工林	1682	21	阳坡	0.85	32	9.4	12.15
	III	人工林	1685	23	半阳坡	0.85	32	9.2	11.58

## 2 材料与方 法

### 2.1 样品采集与处理

2019 年 6 月上旬在甘肃省小陇山林区内选择日本落叶松、锐齿栎、油松成熟林 10 m×10 m 样地各 3

处,每个样地内随机选择 3 处样点,清除地表覆盖后,分别采用规格为 10 cm×5 cm(高度×直径)圆柱形土钻采集 0—10,10—20,20—40 cm 处原状土样约 5 300 cm<sup>3</sup> 用作土壤理化性质分析。同时原样地

再随机选取3处样点,以相同方式采集等量土样,用于测定根系特征,将土样用铝盒装好并带回实验室。从土样中去除石块等杂物后,挑拣出肉眼可见的根径 $<2$  mm的所有活根,并在1 mm的筛子上用自来水冲洗干净后晾干,将细根在4℃的蒸馏水中保存12 h使其重新水合,然后把根系冷冻保存。其余土样去除杂物后按相同深度均匀混合在一起,自然风干1周后,一部分土样沿着自然节理轻轻掰成直径 $<10$  mm的土块,用于土壤基本理化性质测定;另一部分土样筛分出3~5 mm粒径团聚体用于分析土壤团聚体稳定性。样品于2019年6月下旬全部测试完毕。

## 2.2 土壤团聚体稳定性

采用LB(Le Bissonnais)法<sup>[17]</sup>测定土壤团聚体稳定性, LB法是通过模拟田间土壤常见破坏形式,了解对土壤团聚体不同破坏机制的试验方法。本研究采用快速湿润处理(fast wetting test, FW),该处理能模拟强降雨条件下的野外土壤团聚体破碎情况,用筛子筛选出粒径为3~5 mm土壤团聚体(每个5 g左右),在40℃下干燥24 h,将团聚体快速浸入50 mL去离子水中5 min,收集残余团聚体并转移到预先浸入95%乙醇的50  $\mu$ m筛子上,手动将其以恒定幅度(4 cm)进行缓慢螺旋振荡5次,每次具有相同频率(每个周期1 s)。收集筛子上剩余的土壤团聚体,并在40℃下再次干燥48 h,然后使用0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00, 2.00 mm 6个等级的筛子对土壤团聚体进行干筛。用平均质量直径(mean weight diameter, MWD)表示土壤团聚体稳定性,即筛分后留在每个筛子上的土壤团聚体质量百分数乘以相邻2个筛子平均粒径并求和。MWD数值对应的团聚体稳定性等级分为MWD $<0.4$  mm表示团聚体非常不稳定, MWD为0.4~0.8 mm表示团聚体不稳定, MWD为0.8~1.3 mm表示团聚体中度稳定, MWD为1.3~2.0 mm表示团聚体稳定, MWD $>2.0$  mm表示团聚体非常稳定。MWD计算方法<sup>[18]</sup>为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为筛分后第*i*粒级土壤团聚体的平均直径(mm); $\omega_i$ 为筛分后第*i*粒级土壤团聚体质量占土壤样品干质量的比例(%)。

## 2.3 土壤理化性质测定

土壤机械组成采用激光粒度分析仪测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤阳离子交换量采用醋酸铵法测定;用pH计测定土壤pH,水土比为2.5:1<sup>[19]</sup>。

## 2.4 根系性状测定

取出冷冻保存的直径 $<2$  mm的根系,在室温下除霜,并擦干根系上多余的水,采用根系扫描仪扫描活根

样本以测定根长( $L_r$ , cm)和平均根径(mm),将根系分为2个径级: $<0.1$  mm为极细根(very fine root length, VFRL), 0.1~1.0 mm为细根(fine root length, FRL)。扫描后将根系在60℃的烘箱中烘干,称量根系干质量并按照公式<sup>[20-21]</sup>计算根长密度(RLD, mm/cm<sup>3</sup>)、根质量密度(RMD, g/cm<sup>3</sup>)和比根长(SRL, mm/g)。

$$\text{RLD} = \frac{L_r}{V_s} \quad (2)$$

$$\text{RMD} = \frac{W_d}{V_s} \quad (3)$$

$$\text{SRL} = \frac{L_r}{W_d} \quad (4)$$

式中: $L_r$ 为根系长度(mm); $W_d$ 为根系干质量(g); $V_s$ 为土样体积(cm<sup>3</sup>)。每一相同层、段取算数平均值,用于分析比较。

## 2.5 分析方法与数据处理

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)的最小显著差法(least-significant difference, LSD)检验土壤性质及根系性状的数据差异,显著水平为 $P < 0.05$ 。数据整理和分析软件使用Excel 2016和SPSS 25.0软件完成,图表采用Origin 2018软件绘制。

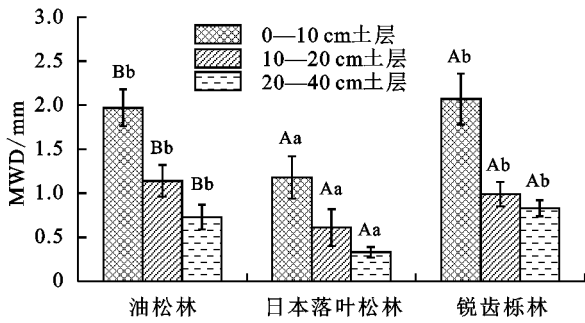
# 3 结果与分析

## 3.1 土壤团聚体稳定性

从图1可以看出,不同林分土壤团聚体稳定性存在显著差异( $P < 0.05$ ),且随土层深度增加,土壤团聚体稳定性呈降低趋势。根据Le Bissonnais<sup>[17]</sup>提出的分级标准,土层深度为0—10, 10—20, 20—40 cm的土壤团聚体:(1)在日本落叶松林土层中不稳定至中等稳定(0.33~1.18 mm);(2)在油松林土层中中度稳定至稳定(0.73~1.97 mm);(3)在锐齿栎林土层中中度稳定至非常稳定(0.83~2.07 mm)。总体看来,3种林分中土壤团聚体较稳定的是锐齿栎林(1.30 $\pm$ 0.53 mm),其次是中度稳定的油松林(1.28 $\pm$ 0.54 mm)和稳定性较差的日本落叶松林(0.7 $\pm$ 0.4 mm),且0—10 cm土层土壤团聚体稳定性显著高于10—20, 20—40 cm( $P < 0.05$ )(表2)。

## 3.2 不同林分土壤理化性质和根系特征

不同林分下的0—40 cm土层中土壤颗粒组成均以粉粒所占比重最大(56.42%~81.25%),其次是砂粒(4.19%~37.41%),黏粒所占比重最小(6.17%~14.56%)。其中,日本落叶松林的黏粒平均含量(7.74 $\pm$ 4.06%)显著低于油松林(11.76 $\pm$ 1.95%)和锐齿栎林(12.41 $\pm$ 4.55%),而林地砂粒含量(28.17 $\pm$ 23.21%)显著高于油松林(13.02 $\pm$ 7.20%)和锐齿栎林(14.45 $\pm$ 12.99%)。随着土层深度变化,土壤机械组成并未表现出明显规律(表3)。



注:不同大写字母表示相同林分不同土层土壤团聚体间差异显著( $P < 0.05$ );不同小写字母表示相同土层不同林分土壤团聚体间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同林分土壤团聚体 MWD

表 2 不同林分土壤团聚体 MWD

土层深度/cm	平均质量直径 MWD/mm				
	油松林	日本落叶松林	锐齿栎林	平均值	F/P
0—10	1.97 ± 0.21 Bb	1.18 ± 0.24 Ba	2.07 ± 0.29 Bb	1.65 ± 0.69 B	11.85**
10—20	1.14 ± 0.18 Ab	0.61 ± 0.21 Aa	0.99 ± 0.14 Ab	0.91 ± 0.46 A	7.02*
20—40	0.73 ± 0.14 Ab	0.33 ± 0.06 Aa	0.83 ± 0.09 Ab	0.59 ± 0.32 A	20.65***
均值	1.28 ± 0.54 b	0.70 ± 0.40 a	1.30 ± 0.53 b		4.71*

注:表中数据为平均值 ± 标准差;不同大写字母表示相同林分不同土层土壤团聚体间差异显著( $P < 0.05$ );不同小写字母表示相同土层不同林分土壤团聚体间差异显著( $P < 0.05$ )。

表 3 土壤基本理化性质

林分类型	土层深度/cm	SOC/(g · kg <sup>-1</sup> )	CEC/(cmol · kg <sup>-1</sup> )	pH	黏粒(0~2 μm)/mm	粉粒(2~50 μm)/mm	砂粒(50~5000 μm)/mm
油松林	0—10	64.58 ± 35.08	19.15 ± 3.84 b	6.71 ± 0.95 b	12.15 ± 2.23	77.09 ± 5.08	10.76 ± 7.26
	10—20	24.35 ± 6.26	17.19 ± 2.96	6.77 ± 0.97 b	12.53 ± 1.79 ab	77.39 ± 1.23	10.08 ± 1.96
	20—40	14.01 ± 5.01	13.58 ± 3.27 ab	6.92 ± 1.09 b	10.48 ± 1.65	70.53 ± 7.16	18.99 ± 8.59
	均值	34.31 ± 29.54	16.64 ± 4.16 b	6.8 ± 0.91 c	11.76 ± 1.95 b	75.21 ± 5.55	13.02 ± 7.20 a
日本落叶松林	0—10	42.75 ± 16.20	12.39 ± 0.57 a	4.54 ± 0.75 a	6.17 ± 5.65	56.42 ± 27.85	37.41 ± 33.47
	10—20	19.05 ± 4.88	11.92 ± 3.70	4.39 ± 0.86 a	8.82 ± 2.40 a	72.60 ± 12.13	18.58 ± 14.44
	20—40	11.49 ± 3.31	10.56 ± 1.56 a	4.35 ± 0.59 a	8.25 ± 4.19	63.22 ± 16.38	28.53 ± 20.26
	均值	24.43 ± 16.56	11.62 ± 2.27 a	4.42 ± 0.68 a	7.74 ± 4.06 a	64.08 ± 19.31	28.17 ± 23.21 b
锐齿栎林	0—10	38.81 ± 8.64	18.04 ± 6.11 b	4.75 ± 0.68 a	9.16 ± 3.74	69.77 ± 12.01	21.06 ± 15.74
	10—20	16.76 ± 2.70	16.87 ± 4.24	5.29 ± 0.55 a	14.56 ± 2.57 b	81.25 ± 3.68	4.19 ± 3.14
	20—40	10.57 ± 1.17	19.21 ± 6.55 b	5.19 ± 0.31 a	12.74 ± 6.13	68.37 ± 7.09	18.11 ± 13.19
	均值	22.53 ± 13.40	18.04 ± 5.27 ab	5.07 ± 0.55 b	12.41 ± 4.55 b	73.13 ± 9.46	14.45 ± 12.99 a
F/P(油松林、日本落叶松林、锐齿栎林)	0—10	1.48/ns	3.013/*	8.90/****			
	10—20	2.15/ns	1.88/ns	8.69/****			
	20—40	1.02/ns	13.05/**	12.68/****			
	均值	1.09/ns	7.542/**	34.06/****			

注:表中数据为平均值 ± 标准差;不同小写字母表示不同林分土壤团聚体差异性显著( $P < 0.05$ ),且表中每个林分数据为 3 块标准样地的平均值。下同。

从表 4 可以看出,随着土层深度增加,3 种林分的根长密度均呈降低趋势,但总体来说,锐齿栎林的根长密度( $156.9 \pm 56.1 \text{ mm/cm}^3$ )仍显著高于油松林的根长密度( $93.4 \pm 55 \text{ mm/cm}^3$ )和日本落叶松林的根长密度( $97.7 \pm 67 \text{ mm/cm}^3$ )( $P < 0.05$ )。根质量密度按从大到小顺序为锐齿栎林( $8.17 \pm 2.63 \text{ g/cm}^3$ )、油松林( $5.98 \pm 2.96 \text{ g/cm}^3$ )、日本落叶松林( $4.48 \pm 2.89 \text{ g/cm}^3$ ),其中锐齿栎林根长密度显著高

由表 3 可知,3 种林分土壤团聚体 SOC 无显著差异( $P < 0.05$ ),从大到小依次为油松林、日本落叶松林、锐齿栎林,且多集中在 0—10 cm 的土层中,随土层深度增加而减少。3 种林分土壤 CEC 和 pH 均存在显著差异( $P < 0.05$ ),其中锐齿栎林( $18.04 \pm 5.27 \text{ cmol/kg}$ )和油松林的 CEC( $16.64 \pm 4.16 \text{ cmol/kg}$ )显著高于日本落叶松( $11.62 \pm 2.27 \text{ cmol/kg}$ )( $P < 0.05$ ),由于阳离子交换量能够有效缓冲土壤酸化<sup>[22]</sup>,因此可以解释油松林土壤 pH( $6.8 \pm 0.91$ )和锐齿栎林土壤 pH( $5.07 \pm 0.55$ )显著高于日本落叶松林土壤 pH( $4.42 \pm 0.68$ )( $P < 0.05$ )。

于日本落叶松林,且 3 种林分根质量密度均随土层深度增加而降低。

由表 4 可知,3 种林分根系中 0.1~1.0 mm 的细根占比最大,其次是 <0.1 mm 的极细根,不同林地的细根和极细根比例均无显著差异,同一林地随土层深度变化的细根和极细根比例无明显规律,但锐齿栎林细根比例( $66.21 \pm 6.02\%$ )和极细根比例( $23.28 \pm 3.88\%$ )相对较高。



比根长是指单位生物量根的总长度,是衡量细根吸收功能的重要指标<sup>[23]</sup>。随着土层加深,不同林分比根长的差异显著性逐渐增加(表 4)。从平均值来

看,日本落叶松林( $21.44 \pm 2.71$  cm/g)和锐齿栎林比根长( $19.42 \pm 1.6$  cm/g)显著高于油松林( $15.11 \pm 3.14$  cm/g) ( $P < 0.05$ )。

表 4 不同林分根系特征

林分类型	土层深度/cm	RLD/ (mm · cm <sup>-3</sup> )	RMD/ (g · cm <sup>-3</sup> )	极细根 (<0.1 mm)/%	细根 (0.1~1.0 mm)/%	SRL/ (cm · g <sup>-1</sup> )
油松林	0—10	134.70 ± 59.50	7.62 ± 3.63	21.99 ± 0.69	66.16 ± 2.95	18.30 ± 1.95
	10—20	105.20 ± 26.20	6.80 ± 1.34ab	19.82 ± 1.74	65.49 ± 3.19	15.34 ± 1.31a
	20—40	40.30 ± 13.80a	3.52 ± 1.36ab	20.23 ± 2.38	64.86 ± 2.66a	11.67 ± 1.44a
	均值	93.40 ± 55.00a	5.98 ± 2.96ab	20.68 ± 1.99	65.51 ± 3.10	15.11 ± 3.14a
日本落叶松林	0—10	148.10 ± 50.30	6.79 ± 2.14	20.52 ± 1.33	67.07 ± 3.97	21.61 ± 2.77
	10—20	116.10 ± 55.00	5.11 ± 2.18a	22.33 ± 1.50	61.65 ± 0.70	22.44 ± 2.90b
	20—40	29.00 ± 18.00a	1.52 ± 1.11a	18.85 ± 1.81	67.86 ± 1.88b	20.26 ± 1.87b
	均值	97.70 ± 67.00a	4.48 ± 2.89a	20.57 ± 2.11	65.53 ± 4.90	21.44 ± 2.71b
锐齿栎林	0—10	177.50 ± 71.30	9.53 ± 2.82	22.62 ± 3.36	71.47 ± 2.01	18.51 ± 2.16
	10—20	175.00 ± 38.50	9.24 ± 1.31b	22.28 ± 4.43	65.58 ± 6.00	18.67 ± 3.56ab
	20—40	118.10 ± 24.60b	5.72 ± 1.47b	24.93 ± 4.08	61.58 ± 4.36a	21.08 ± 3.15b
	均值	156.90 ± 56.10b	8.17 ± 2.63b	23.28 ± 3.88	66.21 ± 6.02	19.42 ± 1.60b
F/P(油松林、 日本落叶松林、 锐齿栎林)	0—10	0.34/ns	0.55/ns	0.77/ns	2.54/ns	1.91/ns
	10—20	2.63/ns	5.43/*	0.74/ns	0.97/ns	4.97/*
	20—40	18.92/**	7.58/*	3.85/ns	8.85/**	17.61/**
	均值	3.90/*	4.73/*	3.10/ns	0.34/ns	12.70/***

注:数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同林分土壤团聚体差异性显著( $P < 0.05$ )。

### 3.3 土壤团聚体稳定性与土壤特性和根系特征关系

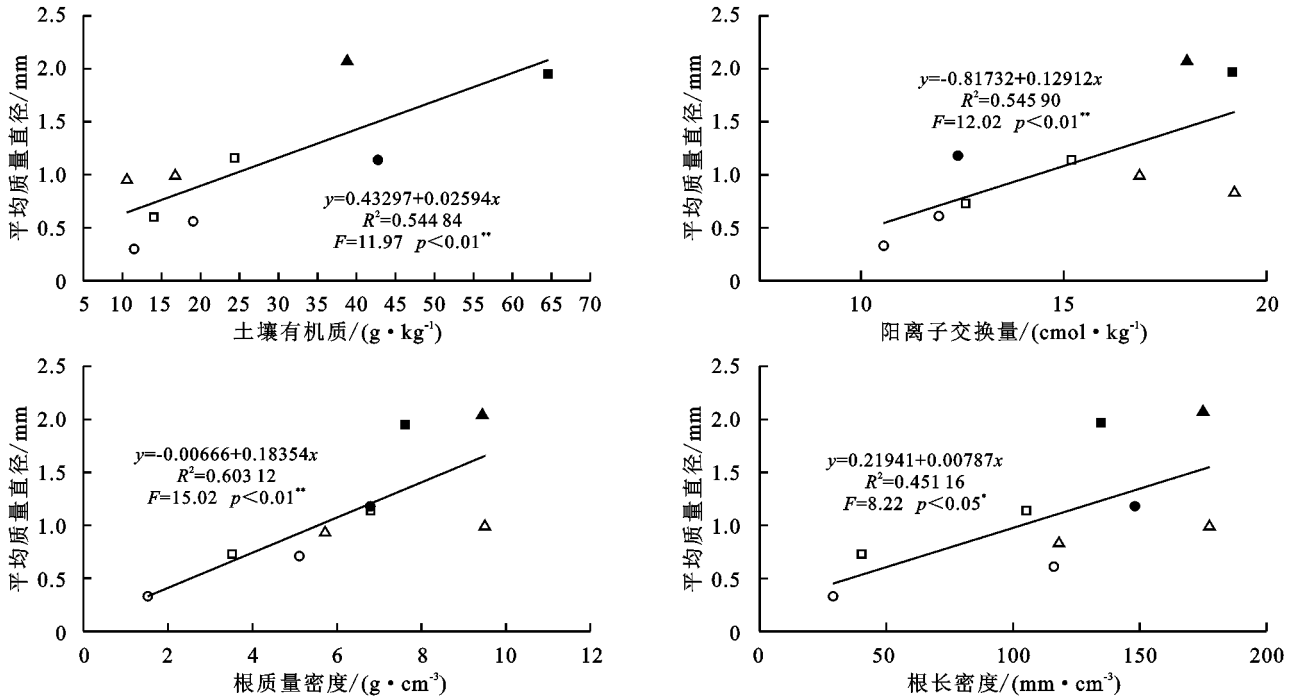
由图 2 可知,在各个林分中,能较好解释土壤团聚体稳定性变化的土壤特性因子有 CEC( $R^2 = 0.55$ )和 SOC( $R^2 = 0.54$ ),根系特性因子有 RMD( $R^2 = 0.60$ )和 RLD( $R^2 = 0.45$ ),所有这些变量均与土壤团聚体稳定性呈正比。这些因子对土壤团聚体稳定性的贡献率由大到小依次为 RMD( $R^2 = 0.60$ )、CEC( $R^2 = 0.55$ )、SOC( $R^2 = 0.54$ )、RLD( $R^2 = 0.45$ )。其中,SOC、CEC 和 RMD 与土壤团聚体稳定性呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),而 RLD 与土壤团聚体稳定性呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。由图 3 可直观看出,所有回归模型中 MWD 数值最大的均为锐齿栎林 0—10 cm 土层土壤(黑色正三角),MWD 数值最小的均为日本落叶松林 20—40 cm 土层土壤(灰色实心圆)。由此可知,3 种林分土壤团聚体稳定性最好的是锐齿栎林,其次是油松林,团聚体稳定性最差的是日本落叶松林。所有土层深度中团聚体稳定性最好的集中在 0—10 cm 土层,土壤团聚体稳定性随着土层深度增加而呈现降低趋势。

## 4 讨论

土壤有机碳水平的高低与土壤团聚体稳定性密切相关<sup>[24]</sup>。多数研究<sup>[25-26]</sup>表明,土壤大团聚体的比例在很大程度上影响土壤结构稳定,土壤有机碳通过

其胶结作用黏结土壤微粒,并以颗粒的形式存在于土壤中,从而促进大团聚体的形成,提高土壤团聚体稳定性。从图 2 可知,平均质量直径与土壤有机碳含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明土壤有机质含量显著影响土壤团聚体稳定性,且随着有机质含量的增加,土壤团聚体稳定性越高。

土壤阳离子交换量作为衡量土壤质量的重要指标之一,直接表征土壤肥力及其酸缓冲能力<sup>[5]</sup>。由图 2 可知,土壤平均质量直径与阳离子交换量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明阳离子交换量显著影响土壤团聚体稳定性。李跃林等<sup>[27]</sup>对林地土壤有机质研究得出,土壤有机质含量增加促进阳离子交换量提升,根据线性回归模型中的  $R^2$  值可知,CEC 和 SOC 对促进土壤团聚体稳定性具有相似的重要性。另外,吴梦瑶等<sup>[28]</sup>研究得出,较高的粉粒含量有助于土壤团聚体稳定性,本研究中锐齿栎林和油松林均比日本落叶松林土壤中粉粒比例高,这可能是这 2 种林分土壤团聚体稳定性较好的原因之一。有研究<sup>[29-30]</sup>表明,阔叶林比针叶林土壤团聚体稳定性高,可能是因为锐齿栎林作为阔叶林,叶片更容易被分解,分解产生的有机质使土壤团聚体稳定性提高,这也是本研究结果中锐齿栎林土壤团聚体稳定性高于油松林和日本落叶松林的原因之一。



注: 正方形符号为油松林土壤样本; 圆形符号为日本落叶松林土壤样本; 三角形符号为锐齿栎林土壤样本; 黑色为 0—10 cm 土层; 白色为 10—20 cm 土层; 灰色为 20—40 cm 土层。

图 2 MWD 线性回归模型

高密度根系通过与相关真菌菌丝形成网络或释放分泌物直接黏结土壤微粒来提高团聚体稳定性<sup>[31]</sup>。有研究<sup>[32]</sup>表明, SOC 和根系密度 (RLD、RMD) 对土壤团聚体稳定性的相对重要性取决于地点。在某些地点, 根系密度对土壤团聚体稳定性的贡献率与 SOC 相似, 甚至超过 SOC。本研究结果中 (图 2) RMD 对 MWD 的重要性为  $R^2=0.60$ , 在所有影响因子中对土壤团聚体稳定性贡献率最大, 可能由于研究区域的植物根系分布较广且密度较大, 与土壤团聚体接触面积较高, 导致团聚体稳定性更加依赖于植物根系。从图 2 可以看出, RLD 对 MWD 的重要性 ( $R^2=0.45$ ) 虽然不及其他三者, 但总体与之呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 这与孙丽丽等<sup>[33]</sup>得出的土壤团聚体稳定性随根长密度增加而增大的结论相一致。

综合看来, 土壤团聚体稳定性由高到低依次为锐齿栎林、日本落叶松林、油松林; 土层梯度上土壤团聚体稳定性由高到低依次为 0—10, 10—20, 20—40 cm。可能由于锐齿栎林叶片比日本落叶松林和油松林更容易分解, 且土壤表层 (0—10 cm) 积累大量枯枝落叶, 腐殖化作用更明显, 同时随着土层加深, 植物根系分布减少, 根系密度和土壤有机质含量降低, 导致土壤团聚体稳定性降低。值得注意的是, 本研究中最能解释土壤 MWD 变化的土壤因子是 CEC 和 SOC, 而油松林土壤 SOC ( $34.31 \pm 29.54$  g/kg) 与锐齿栎林土壤 SOC ( $22.53 \pm 13.40$  g/kg)、油松林土

壤 CEC ( $16.64 \pm 4.16$  cmol/kg) 与锐齿栎林 CEC ( $18.04 \pm 5.27$  cmol/kg) 均无显著差异 ( $P>0.05$ ) (表 3)。最能解释土壤 MWD 变化的植物根系特征因子是 RLD 和 RMD, 而本研究中锐齿栎林 RMD ( $8.17 \pm 2.63$  g/cm<sup>3</sup>) 大于油松林 RMD ( $5.98 \pm 2.96$  g/cm<sup>3</sup>), 锐齿栎林的 RLD ( $156.9 \pm 56.1$  mm/cm<sup>3</sup>) 也大于油松林的 RLD ( $93.4 \pm 55$  mm/cm<sup>3</sup>)。可以看出, 本研究中土壤团聚体稳定性主要由根系性状中的 RMD 决定, 其次才是土壤特性中的 CEC 和 SOC, 这与万海霞等<sup>[34]</sup>得出 RLD 和 SRL 等根系参数与土壤团聚体稳定性指标未表现出显著相关性的结论不一致, 但与 Ali 等<sup>[35]</sup>得出的根系密度比土壤特征对土壤团聚体稳定性更有影响力的研究结论相类似。

## 5 结论

(1) 土壤特性和根系特征都是影响土壤团聚体稳定性的重要驱动力, 土壤团聚体稳定性与 SOC、CEC、RMD、RLD 存在线性关系, 并随之增加而显著提高 ( $P<0.05$ )。

(2) 在某些情况下, 根系性状如 RMD 可成为比 SOC、CEC 等土壤性质对土壤团聚体稳定性更为重要的驱动因子。

(3) 各林分土壤团聚体稳定性大小排序为锐齿栎林 > 日本落叶松林 > 油松林。在同一林分中, 土壤团聚体稳定性随土层深度增加而显著降低, 阔叶林 0—10 cm 表层土壤团聚体稳定性最好。

## 参考文献:

- [1] 于海艳,宫汝宁,周娅,等.北京八达岭地区4种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].水土保持学报,2015,29(5):162-166.
- [2] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.
- [3] 刘艳玲,庞奖励,黄春长,等.汉江与嘉陵江源区土壤团聚体分布特征及机制研究[J].水土保持学报,2021,35(2):235-242.
- [4] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001,99(1/2):123-145.
- [5] 刘蓉,邓茂,李莹莹,等.不同酸碱度土壤阳离子交换量的测定研究[J].中国环境监测,2020,36(1):125-130.
- [6] 林立文,邓羽松,王金悦,等.南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2020,31(11):3647-3656.
- [7] 黄永珍,王晟强,叶绍明.杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J].应用生态学报,2020,31(9):2857-2865.
- [8] 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[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.
- [9] 黄林,王峰,周立江,等.不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J].生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- [10] 孙一惠,马岚,张栋,等.2种扦插护岸植物根系对土壤结构的改良效应[J].北京林业大学学报,2017,39(7):54-61.
- [11] 郑子龙,蔺岩雄,袁一超,等.甘肃小陇山林区不同森林类型土壤水分动态[J].东北林业大学学报,2013,41(1):51-54.
- [12] 魏代梅.甘肃小陇山林区资源发展研究[J].农业与技术,2015,35(14):64-65.
- [13] 杨琳.小陇山林业生态建设中存在的问题及对策[J].现代农村科技,2020,55(10):101.
- [14] 胡琛,贺云龙,崔鸿侠,等.神农架4种典型人工林对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(12):125-133.
- [15] 魏霞,贺燕,魏宁,等.祁连山区主要植被类型下土壤团聚体变化特征[J].农业工程学报,2020,36(2):148-155.
- [16] 胡昭,张懿,郭建.黄土丘陵区典型林地土壤团聚体稳定性评价[J].人民黄河,2020,42(8):104-108.
- [17] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science,1996,47(4):425-437.
- [18] 王彬.东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 陈柳娟,钟全林,李宝银,等.翅荚木人工林不同径阶间细根主要功能性状与根际土壤养分的关系[J].应用生态学报,2019,30(11):3627-3634.
- [21] 魏国良,汪有科,王得祥,等.梨枣人工林有效吸收根系密度分布规律研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(1):133-138.
- [22] Nordiani S, Ahmad Z A, Siti N T, et al. Influential factors on the cation exchange capacity in sediment of Merambong Shoal, Johor[J]. Procedia Environmental Sciences,2015,30:186-189.
- [23] 戎秋涛,杨春茂,徐文彬.土壤酸化研究进展[J].地球科学进展,1996,11(4):71-76.
- [24] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma,2005,124(1/2):3-22.
- [25] 韩加强,高晓飞,路路军,等.水保措施对褐土水稳性大团聚体的影响研究[J].水土保持研究,2012,19(6):50-53.
- [26] 王子龙,胡斐南,赵勇刚,等.土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):331-336.
- [27] 李跃林,彭少麟,赵平,等.鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究[J].山地学报,2002,20(5):548-552.
- [28] 吴梦瑶,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J].水土保持学报,2021,35(2):200-209.
- [29] 朱家琪,满秀玲,王飞.我国寒温带四种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究[J].土壤通报,2020,51(3):606-613.
- [30] 丛高,张志丹,张晋京,等.长白山不同林型土壤有机碳特征[J].水土保持学报,2019,33(3):179-184,191.
- [31] Morel J L, Habib L, Plantureux S, et al. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability[J]. Plant and Soil,1991,136(1):111-119.
- [32] Yves L B, Iván P, Catherine R, et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: Effect of plant roots and soil characteristics[J]. Plant and Soil,2018,424(1/2):303-317.
- [33] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.
- [34] 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):80-86,91.
- [35] Ali H E, Reineking B, Münkemüller T. Effects of plant functional traits on soil stability: Intraspecific variability matters[J]. Plant and Soil,2017,411(1/2):359-375.