

# 徂徕山植被类型对不同坡位土壤团聚体特征的影响

李岩<sup>1</sup>, 王如岩<sup>1</sup>, 董智<sup>2</sup>, 刘冰倩<sup>2</sup>, 刘瑞琳<sup>2</sup>, 吴其聪<sup>2</sup>

(1.泰安市水文中心, 山东泰安 271000; 2.山东农业大学林学院/泰山森林生态系统国家定位观测研究站, 山东泰安 271018)

**摘要:** [目的] 研究徂徕山不同植被类型不同坡位的土壤团聚体特征, 为北方土石山区植被建设和水土保持提供理论支撑。[方法] 采用干筛和湿筛法分析徂徕山板栗林、刺槐麻栎混交林坡上及坡下的土壤团聚体组成与稳定性, 并测定土壤固液气三相比及其结构距离。[结果] ①机械稳定性团聚体组成中 2~0.25 mm 粒级所占比例为 55.60%~72.76%, 0.25~0.053 mm 粒级所占比例为 25.11%~41.98%, <0.053 mm 粒级含量最低, 所占比例为 0.60%~3.75%。②与板栗林相比, 刺槐×麻栎混交林的土壤机械稳定性团聚体的平均重量直径提高 10.51%, 几何平均直径提高 7.51%, 不稳定团粒指数降低 19.01%, 而水稳定性团聚体各指标在不同植被类型及不同坡位均未表现出显著差异。③固液气三相体积比例表现为: 土壤固相体积(56.46%~66.15%)>液相体积(21.66%~36.56%)>气相体积(4.40%~12.19%), 刺槐×麻栎混交林的土壤三相结构距离与板栗林相比约减少 8.87%。[结论] 植被类型对徂徕山土壤团聚体结构稳定性的影响大于坡位, 其中刺槐×麻栎混交林对土壤团聚体机械稳定性的促进作用显著优于板栗林。固相体积比是解释团聚体组成的关键因子。

**关键词:** 坡位; 植被类型; 土壤团聚体; 土壤三相结构

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0082-06

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 李岩, 王如岩, 董智, 等. 徂徕山植被类型对不同坡位土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 82-87. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.011; Li Yan, Wang Ruyan, Dong Zhi, et al. Effects of vegetation types on soil aggregate characteristics at different slope positions of Culai Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 82-87.

## Effects of Vegetation Types on Soil Aggregate Characteristics at Different Slope Positions of Culai Mountain

Li Yan<sup>1</sup>, Wang Ruyan<sup>1</sup>, Dong Zhi<sup>2</sup>, Liu Bingqian<sup>2</sup>, Liu Ruilin<sup>2</sup>, Wu Qicong<sup>2</sup>

(1. Hydrology Center in Tai'an City, Tai'an, Shandong 271000, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University/Mountain Tai Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of soil aggregates under different vegetation types and slope positions of Culai Mountain were determined in order to provide theoretical support for vegetation construction and soil and water conservation in rocky mountain areas of North China. [Methods] The composition and stability of soil aggregates on and below the slope of *Robinia pseudoacacia* × *Quercus* mixed forest and Chestnut forest of Culai Mountain were analyzed by dry sieve and wet sieve methods, and the soil solid-liquid-gas three phase rate and its structural distance were measured. [Results] ① The composition of mechanically stable aggregates accounted for 55.60%—72.76% for particle sizes of 2—0.25 mm, 25.11%—41.98% for particle sizes of 0.25—0.053 mm, and 0.60%—3.75% for particle sizes <0.053 mm. ② Compared with the Chestnut forest, the mean weight diameter of soil mechanical stability aggregates increased by 10.51%, geometric mean diameter increased by 7.51%, and unstable aggregate index decreased by 19.01% in the *Robinia pseudoacacia* and *Quercus* mixed forest. However, none of the indexes of water stable aggregates showed significant differences under different vegetation types and slope positions. ③ Soil solid phase volume (56.46%—66.15%)>liquid phase volume (21.66%—36.56%)>gas phase volume (4.40%—12.19%). The

收稿日期: 2022-03-02

修回日期: 2022-03-02

资助项目: 泰安市水文局徂徕山水土保持综合观测站项目(380912); 山东农业大学科研启动项目(72171)。

第一作者: 李岩(1979—), 男(汉族), 山东省新泰市人, 大学, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的研究。Email: 675747648@qq.com。

通讯作者: 吴其聪(1988—), 男(汉族), 山东省高密市人, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与生态修复方面的研究。Email: qcwu@sdau.edu.cn。

soil three phase structure distance of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus* mixed forest was reduced by 8.87% compared with that of Chestnut forest. [Conclusion] The influence of vegetation type on the structural stability of soil aggregates of Culai Mountain was greater than that of slope position, where the contribution of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus* mixed forest to the mechanical stability of soil aggregates was significantly greater than that of Chestnut forest. The solid volume ratio was the key factor explaining the composition of soil aggregates.

**Keywords:** slope position; vegetation type; soil aggregates; soil three-phase structure

土壤团聚体是土壤的基本结构单元,其组成与稳定性在保持水分、维持生物多样性、抵御洪水、侵蚀和滑坡等方面具有重要作用<sup>[1-2]</sup>,对促进“土壤—降水—植被”间的水循环具有重要影响,已成为近 10 a 来土壤学、水文学、水土保持等学科的研究热点<sup>[3-4]</sup>。影响土壤团聚体稳定性的因素主要有土壤有机质、土地利用方式、管理措施、气候条件、土壤微生物、植被覆盖情况等<sup>[5]</sup>。其中,植被能够促进土壤结构形成与质量提升,降低土壤的可蚀性,抑制土壤侵蚀的发生发展,被认为是影响坡面水土流失的关键因子<sup>[6-7]</sup>。然而,当前研究主要关注不同植被类型对土壤团聚体稳定性及坡面水土流失的单一影响,较少考虑不同坡位带来的协同影响。有研究<sup>[8]</sup>证实,在相同植被覆盖下,不同坡位的土壤团聚体稳定性有所差异,土壤大团聚体含量呈现出:上坡>下坡>坡底>中坡的趋势。这表明植被类型与坡位可能会存在交互效应,并对土壤团聚体稳定性产生影响。然而,植被类型与坡位如何协同影响土壤团聚体稳定性,尤其是在植被稀少、土壤贫瘠、气候干旱和水土流失危害严重的我国北方土石山区<sup>[9]</sup>,不同植被类型与不同坡位下,土壤团聚体组成与稳定性如何响应,尚不明确。因此,研究不同植被类型以及不同坡位下土壤团聚体组成与稳定性对明确土壤结构优劣以及抗侵蚀能力具有重要意义。

本研究选取山东省泰安市徂徕山水土保持综合观测站板栗、刺槐×麻栎混交林等当地常见的植被类型为研究对象,开展定位研究。分析不同植被类型及不同坡位对土壤团聚体组成与稳定性的影响。研究结果可为北方土石山区植被恢复与水土流失防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省泰安市徂徕山水土保持综合观测站(36°4′36″N,117°14′16″E),属暖温带大陆性季风气候,年平均降水量 1 000 mm,年日照时数 2 494 h,年平均气温 13.9 °C,年无霜期 215 d。径流场的土壤以山地棕壤为主,周边植被以常绿针叶林和落叶阔叶林为主,主要是刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、赤松(*Pinus densiflora*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、板栗(*Castanea mollissima*)等。林下植被主要有小蓬草(*Erigeron canadensis*)、鸭跖草(*Commelina communis*)、莎草(*Cyperus rotundus*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等。

徂徕山水土保持综合观测站中 4 个试验小区基本情况详见表 1。

表 1 试验小区基本情况

处理代号	水保措施	植被类型	坡度/(°)	坡长/m	坡宽/m	郁闭度/%	植被盖度/%
CM <sub>1</sub>	石坎梯田	板栗	21	20	5	33	47
CM <sub>2</sub>	石坎梯田	板栗	23	20	5	9	12
RQ <sub>1</sub>	人工混交林	刺槐×麻栎	19	20	5	92	40
RQ <sub>2</sub>	人工混交林	刺槐×麻栎	15	20	5	91	36

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2021 年 7 月在徂徕山水土保持综合观测站选取 CM<sub>1</sub>, CM<sub>2</sub>, RQ<sub>1</sub>, RQ<sub>2</sub> 共 4 个径流小区作为样地,在坡上、坡下沿对角线分别选取 3 个 1 m×1 m 样方。每个样方沿对角线采集 3 个 0—20 cm 原状土壤样品用作土壤团聚体组成分析,同时采集 0—20 cm 环刀样品。

1.2.2 指标测定与计算 土壤容重(BD)采用环刀

法<sup>[10]</sup>测定,土壤总孔隙度(TP)、毛管孔隙度(CP)、非毛管孔隙度(NCP)、土壤饱和含水量(SW)和田间持水量(FC)通过环刀浸泡法<sup>[11-12]</sup>测定,采用干湿筛结合的方法<sup>[13]</sup>测定土壤机械稳定性团聚体组成与水稳定性团聚体组成。

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、不稳定团粒指数(ELT)、团聚体破坏率(PAD)、土壤三相结构距离(STPSD)和广义土壤结构指数(GSSI)

等,在一定程度上可以表征土壤结构优劣。其中 MWD, GMD, GSSI 值越大,团聚体稳定性越强,土壤结构越好;ELT, PAD 和 STPSE 值越小,团聚体越稳定,土壤结构越好。

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

$$\text{GMD} = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (2)$$

式中:  $X_i$  表示每个筛分粒径的团聚体的平均直径;  $W_i$  特定尺寸范围内的团聚体重量。

$$\text{ELT} = \frac{W_t - W_{R>0.25}}{W_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $W_{R>0.25}$  指颗粒直径  $>0.25$  mm 的团聚体的质量;  $W_t$  指团聚体总质量。

$$\text{PAD} = \frac{D_{R0.25} - W_{R0.25}}{D_{R0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $D_{R0.25}$  为直径  $>0.25$  mm 的机械稳定性大团聚体含量(干筛法测得);  $W_{R0.25}$  为直径  $>0.25$  mm 的水稳定性大团聚体含量(湿筛法测得)。

$$\text{CSSI} = [(S - 25) LG]^{0.4769} \quad (5)$$

式中:  $S$  为土壤固相体积百分比( $>25\%$ );  $L$  为土壤液相体积百分比( $>0$ );  $G$  为土壤气相体积百分比( $>0$ )。

STPSD =

$$\sqrt{(S - 50)^2 + (S - 50)(L - 25) + (L - 25)^2} \quad (6)$$

STPSD =

$$\sqrt{(S - 50)^2 + (S - 50)(G - 25) + (G - 25)^2} \quad (7)$$

STPSD =

$$\sqrt{(L - 25)^2 + (L - 25)(G - 25) + (G - 25)^2} \quad (8)$$

公式(6)~(8)均可以计算土壤三相结构距离。

其中,理想的土壤三相比:固相 50%,液相 25%,气相 25%。样品的土壤三相:固相  $S(\%)$ ,液相  $L(\%)$ ,气相  $G(\%)$ 。通过计算样品与理想土壤三相的距离,来量化土壤结构的优劣。

### 1.3 统计分析

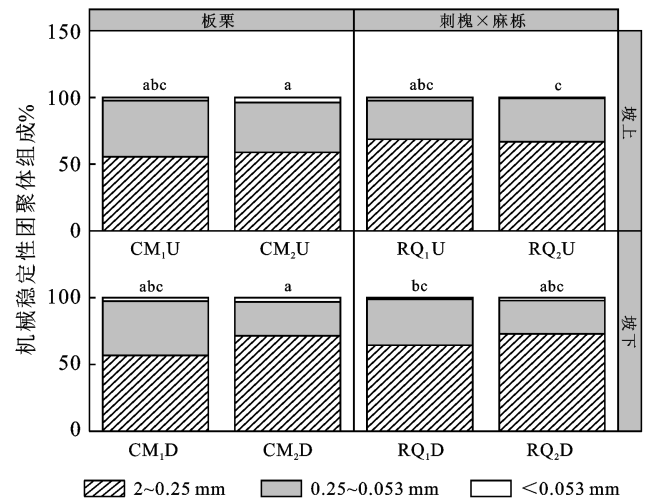
采用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行方差分析,使用 Canoco 5 等软件进行 RDA 分析,使用 Origin 2021b 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤机械稳定性团聚体及水稳定性团聚体组成

不同植被类型及不同坡位下,均未发现  $>2$  mm 粒径的土壤机械稳定性团聚体与水稳定性团聚体(粗大团聚体)。机械稳定性团聚体组成中,  $2 \sim 0.25$  mm

粒级(细大团聚体)含量最高,所占比例为  $55.60\% \sim 72.76\%$ ;其次为  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒级(微团聚体),所占比例为  $25.11\% \sim 41.98\%$ ;  $<0.053$  mm 粒级(粉黏粒)含量最低,所占比例为  $0.60\% \sim 3.75\%$ (图 1)。各粒级中仅  $<0.053$  mm 粒级在不同处理下存在显著性差异,其中板栗林( $CM_1, CM_2$ )  $<0.053$  mm 粒级机械稳定性团聚体含量略高于刺槐 × 麻栎混交林( $RQ_1, RQ_2$ )。与  $RQ_2$  坡上处理( $RQ_2U$ )的  $<0.053$  mm 粒级含量相比,  $CM_2$  坡上处理( $CM_2U$ )显著提高 5.25 倍( $p < 0.05$ )。与  $RQ_2$  坡下处理( $RQ_2D$ )的  $<0.053$  mm 粒级含量相比,  $CM_2$  坡下处理( $CM_2D$ )提高 53%( $p > 0.05$ )。



注:图中不同小写字母表示  $<0.053$  mm 粒级的不同处理之间存在  $p < 0.05$  的显著差异。  $CM_1U, CM_1D$  分别表示板栗处理  $CM_1$  的坡上(U)和坡下(D);  $CM_2U, CM_2D$  分别表示板栗处理  $CM_2$  的坡上(U)和坡下(D);  $RQ_1U, RQ_1D$  分别表示刺槐 × 麻栎处理  $RQ_1$  的坡上(U)和坡下(D);  $RQ_2U, RQ_2D$  分别表示刺槐 × 麻栎处理  $RQ_2$  的坡上(U)和坡下(D)。下同。

图 1 研究区土壤机械稳定性团聚体组成

与机械稳定性团聚体类似,水稳定性团聚体组成中  $2 \sim 0.25$  mm 粒级含量最高,所占比例为  $40.18\% \sim 53.42\%$ ;其次为  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒级,所占比例为  $31.44\% \sim 50.66\%$ ;  $<0.053$  mm 粒级含量最低,所占比例为  $7.78\% \sim 16.26\%$ (图 2)。同一粒级中,各处理间差异不显著。与板栗林相比,刺槐 × 麻栎混交林坡上  $2 \sim 0.25$  mm 粒级含量略高,而  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒级含量略低( $p > 0.05$ )。具体表现为:与  $CM_1U$  相比,  $RQ_1U$  和  $RQ_2U$  处理的  $2 \sim 0.25$  mm 粒级含量分别增加 23.77% 和 24.40%,  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒级含量分别降低 30.20% 和 21.59%;与  $CM_2U$  相比,  $RQ_1U$  和  $RQ_2U$  处理的  $2 \sim 0.25$  mm 粒级含量分别增加 15.57% 和 16.15%,  $0.25 \sim 0.053$  mm 粒级含量分别降低 24.99% 和 15.74%。

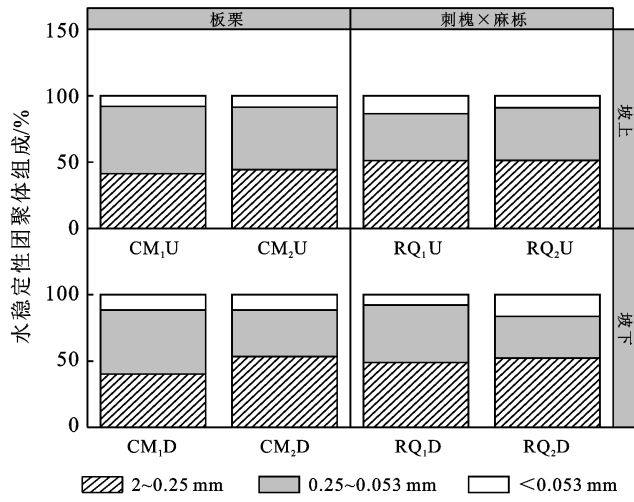


图 2 研究区土壤水稳定性团聚体组成

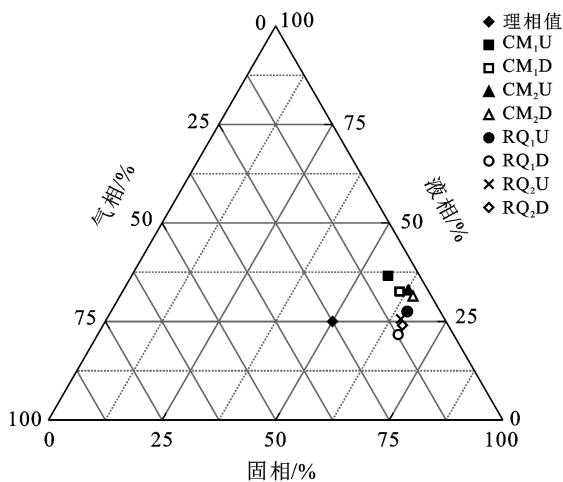
表 2 研究区不同植被类型及坡位下土壤团聚体参数

处理	干筛			湿筛			PAD/%	GSSI
	MWD/mm	GMD/mm	ELT/%	MWD/mm	GMD/mm	ELT/%		
CM <sub>1</sub> U	0.69 <sup>a</sup>	0.70 <sup>a</sup>	44.40 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.60 <sup>a</sup>	58.73 <sup>a</sup>	26.22 <sup>a</sup>	72.76 <sup>ab</sup>
CM <sub>1</sub> D	0.70 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	43.28 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.57 <sup>a</sup>	59.82 <sup>a</sup>	29.15 <sup>a</sup>	68.88 <sup>ab</sup>
CM <sub>2</sub> U	0.72 <sup>a</sup>	0.72 <sup>a</sup>	41.16 <sup>a</sup>	0.57 <sup>a</sup>	0.61 <sup>a</sup>	55.80 <sup>a</sup>	25.27 <sup>a</sup>	61.13 <sup>b</sup>
CM <sub>2</sub> D	0.84 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>	28.68 <sup>a</sup>	0.66 <sup>a</sup>	0.65 <sup>a</sup>	46.58 <sup>a</sup>	26.64 <sup>a</sup>	57.74 <sup>b</sup>
RQ <sub>1</sub> U	0.82 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>	31.40 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	48.92 <sup>a</sup>	25.59 <sup>a</sup>	70.48 <sup>ab</sup>
RQ <sub>1</sub> D	0.78 <sup>a</sup>	0.76 <sup>a</sup>	35.58 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	51.17 <sup>a</sup>	23.79 <sup>a</sup>	83.39 <sup>a</sup>
RQ <sub>2</sub> U	0.80 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>	33.35 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	48.66 <sup>a</sup>	22.88 <sup>a</sup>	79.87 <sup>a</sup>
RQ <sub>2</sub> D	0.86 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	27.24 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	47.70 <sup>a</sup>	26.72 <sup>a</sup>	79.20 <sup>a</sup>
植被类型	6.94 <sup>*</sup>	8.53 <sup>**</sup>	6.53 <sup>*</sup>	1.89	0.71	2.19	0.20	9.49 <sup>**</sup>
坡位	1.77	1.84	1.76	0.12	0.02	0.17	0.12	0.09
植被×坡位	1.03	1.10	0.99	0.26	0.04	0.32	0.02	1.31

注: MWD 为平均重量直径, GMD 为几何平均直径, ELT 为不稳定团粒指数, PAD 为团聚体破坏率, GSSI 表示广义土壤结构指数。图中不同小写字母表示不同处理之间存在  $p < 0.05$  的显著差异; \* 表示在 0.05 水平上差异显著, \*\* 表示 0.01 水平上差异显著。下同。

### 2.3 土壤固液气三相比及其结构距离

理想值与各处理在固液气三相图中的分布情况如图 3 所示。



注: 理想值的土壤三相比为固相 50%, 液相 25%, 气相 25%。

图 3 各处理不同坡位土壤固液气三相比

### 2.2 土壤团聚体结构稳定性

通过干筛法获得的土壤机械稳定性团聚体, 表征其机械稳定性的指标 MWD, GMD, ELT 在不同植被类型下表现出显著差异(表 2)。其中, 与板栗林处理相比, 刺槐×麻栎混交林的 MWD 提高 10.51% ( $p < 0.05$ ), GMD 提高 7.51% ( $p < 0.01$ ), ELT 降低 19.01% ( $p < 0.05$ )。

然而, 通过湿筛法获得的土壤水稳定性团聚体, 表征其水稳定性的指标 MWD, GMD, ELT 在不同植被类型及不同坡位均未表现出显著差异。广义土壤结构指数(GSSI)在不同植被类型下表现出显著差异, 与板栗林处理相比, 刺槐×麻栎混交林的 GSSI 提高 20.13% ( $p < 0.01$ )。

由图 3 可知, 各处理土壤固相体积所占比例为 56.46%~66.15%, 液相体积所占比例为 21.66%~36.56%, 气相体积所占比例为 4.40%~12.19%。通过计算土壤三相结构距离(STPSD)来量化各处理与理想值之间的差距, 结果如图 4 所示。与板栗林相比, 刺槐×麻栎混交林的 STPSD 更小, 约减少 8.87%, 可见刺槐×麻栎混交林的土壤结构稳定性更强。

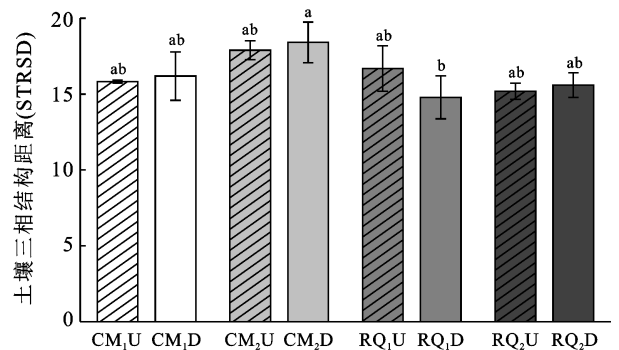
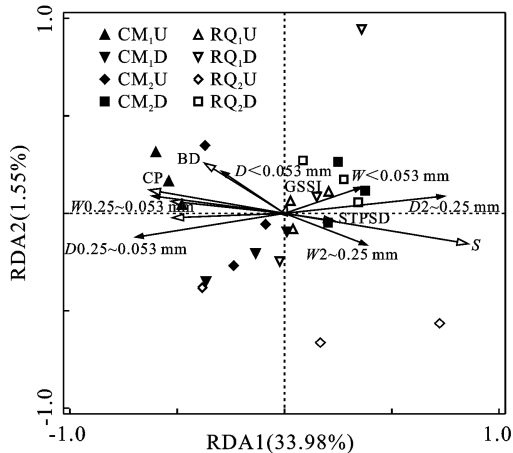


图 4 各处理不同坡位土壤三相结构距离



## 2.4 土壤团聚体组成与三相结构的关系

RDA 分析结果显示了土壤各指标对团聚体分布总方差的贡献,以及土壤各指标、样品和团聚体组成之间的关系(图 5)。RDA 图中轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.34、0.16,共同解释了团聚体分布总变异的 35.53%。由表 3 可知,两个最大的解释变量是 S 和 CP,解释量分别为 25.0% ( $p < 0.05$ ) 和 13.6% ( $p > 0.05$ )。S 与机械稳定性细大团聚体( $D$  为 2~0.25 mm)、水稳定性细大团聚体( $W$  为 2~0.25 mm)、水稳定性粉黏粒( $W < 0.053$  mm)沿轴 1 正轴方向呈正相关。相反,S 与机械稳定性微团聚体( $D$  为 0.25~0.053 mm)、机械稳定性粉黏粒( $D < 0.053$  mm)和水稳定性微团聚体( $W$  为 0.25~0.053 mm)沿轴 1 的负轴呈负相关。同时,S 与板栗林各处理有呈负相关的趋势,而与刺槐×麻栎混交林有呈正相关的趋势。



注:S 为土壤固相体积百分比;CP 为毛管孔隙度;FC 为田间持水量;SW 为土壤饱和含水量;BD 为土壤容重;STPSD 为土壤三相结构距离;GSSI 为广义土壤结构指数。

图 5 各处理土壤团聚体组成与土壤性质的 RDA 分析

表 3 RDA 分析中土壤性质的解释量

土壤性质	解释量/%	F 值	p 值
S	25	7.3	0.012
CP	13.6	3.5	0.064
FC	9.6	2.3	0.108
SW	9.2	2.2	0.13
BD	4.9	1.1	0.286
STPSD	2	0.4	0.616
GSSI	0.1	<0.1	0.98

注:S 为土壤固相体积百分比;CP 为毛管孔隙度;FC 为田间持水量;SW 为土壤饱和含水量;BD 为土壤容重;STPSD 为土壤三相结构距离;GSSI 为广义土壤结构指数。

## 3 讨论

刺槐×麻栎混交林与板栗相比,其 MWD 显著提

高 10.51%,GMD 显著提高 7.51%,ELT 显著降低 19.01%,表明其土壤团聚体机械稳定性显著高于板栗纯林。可能的原因是:纯林浅层土壤容易受外力干扰而破坏大粒级团聚体,而混交林由于冠层特征、枯落物的质量和数量、植被空间结构等特征可减少降雨和地面径流对土壤的直接冲刷进而减少大团聚体的破坏,从而提高土壤抗冲击能力,对团聚体起到保护作用,促进了土壤结构的形成与稳定<sup>[14]</sup>。我们的调查结果也表明徂徕山径流小区刺槐×麻栎混交林的植被盖度与郁闭度,相较于板栗纯林具有一定优势(表 1),这为刺槐×麻栎混交林土壤团聚体机械稳定性显著高于板栗纯林提供了直接证据。不同坡位间坡下土壤团聚体稳定性有高于坡上的趋势,但差异不显著。这可能是由于坡下土壤养分一般高于坡上<sup>[15]</sup>,有利于坡下土壤动物与微生物的积聚以及植物根系的生长<sup>[16]</sup>,促进了土壤团聚体的形成与稳定,但由于坡长仅有 20 m,坡上坡下之间的差异并没有凸显出来。然而,刘鹏等<sup>[8]</sup>在岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤团聚体稳定性的研究中,发现坡上层土壤团聚体稳定性显著高于坡中以及坡下。这与我们的结果存在较大差异,可能的原因是该研究地处岩溶断陷盆地高原面洼地,地质作用强烈,相对高差大,更容易受到重力的影响,坡下土壤结构稳定性差,更易受到侵蚀而损失;而本研究中徂徕山地处北方土石山区,在侵蚀性降雨发生时,坡上土壤随水流下,在坡下累积并形成更稳定的结构。

通过土壤三相比计算得到的土壤三相结构距离(STPSD)和广义土壤结构指数(GSSI)是评价土壤结构优劣的重要参数。本研究结果显示,与板栗林相比,刺槐×麻栎混交林的 STPSD 减少约 8.87%,GSSI 显著提高 20.13%,表明其土壤结构稳定性更强。这与团聚体稳定性的结果趋于一致。主要原因可能是土壤颗粒与土壤颗粒间的孔隙主导了团聚体的组成。本研究冗余分析的结果很好地证实了这一推论,即土壤三相中固相体积比(S)与毛管孔隙度(CP)是团聚体组成的两个最大的解释变量,分别解释 25.0% 和 13.6%。其中,S 与机械稳定性细大团聚体( $D$  为 2~0.25 mm)、水稳定性细大团聚体( $W$  为 2~0.25 mm)、水稳定性粉黏粒( $W < 0.053$  mm)呈正相关;CP 与机械稳定性微团聚体( $D$  为 0.25~0.053 mm)、机械稳定性粉黏粒( $D < 0.053$  mm)和水稳定性微团聚体( $W$  为 0.25~0.053 mm)呈正相关。同时,S 与板栗林各处理有呈负相关的趋势,而与刺槐×麻栎混交林有呈正相关的趋势。这表明固相体积比在土壤三相结构中更为重要,可能是评价团聚体组成与稳定性的关

键指标。另外,需要注意的是目前土壤三相比的理想值参考的是旱作农业土壤的相关参数,未来应探索林地土壤理想土壤三相比,不断完善广义土壤结构指数和土壤三相结构距离等表征土壤结构的指标在林业土壤当中的应用。

## 4 结论

研究区土壤机械稳定性团聚体与水稳定性团聚体组成均表现出细大团聚体( $2\sim 0.25\text{ mm}$ ) $>$ 微团聚体( $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ ) $>$ 粉黏粒( $<0.053\text{ mm}$ )的趋势。刺槐 $\times$ 麻栎混交林土壤团聚体机械稳定性显著优于板栗林,而水稳定性与板栗林无显著差异。不同坡位之间,土壤团聚体组成与稳定性无显著差异。刺槐 $\times$ 麻栎混交林的土壤结构稳定性更强。不同坡位土壤 GSSI 与 STPSD 均未表现出显著差异。固相体积所占比例可作为评价团聚体组成的重要指标。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Zheng Wei, Zhao Zhiyuan, Lv Fenglian, et al. Assembly of abundant and rare bacterial and fungal sub-communities in different soil aggregate sizes in an apple orchard treated with cover crop and fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156:108222.

[2] Merino-Martin L, Stokes A, Gweon H S, et al. Interacting effects of land use type, microbes and plant traits on soil aggregate stability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154:108072.

[3] 张志明,李禄军.基于 CNKI 的近 30 年土壤团聚体研究趋势分析[J].土壤与作物,2021,10(4):385-394.

[4] 张彧行,翁白莎,严登华.基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J].地球科学进展,2022,37(4):429-438.

[5] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.

[6] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆

盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.

[7] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报,2021,41(3):8-14.

[8] 刘鹏,蒋忠诚,李衍青,等.岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性研究[J].地球学报,2021,42(3):373-381.

[9] 王志印,曹建生.中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(9):1319-1331.

[10] He Jianing, Shi Yu, Yu Zhenwen. Subsoiling improves soil physical and microbial properties, and increases yield of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187:182-193.

[11] Yu Qi, Wang Hao, Wen Pengfei, et al. A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199:104600.

[12] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].水文,2015,35(4):62-66.

[13] Wu Qicong, Zhang Congzhi, Yu Zhengong, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen addition on organic carbon and aggregates in soil planted with different rice cultivars [J]. *Plant and Soil*, 2018, 432(1):245-258.

[14] 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):95-102,132.

[15] 潘树林,周顺涛,辜彬.坡度和坡位对岩质边坡早期生态恢复土壤养分变异性的影响[J].水土保持研究,2012,19(4):289-292.

[16] 李传人,艾应伟,郭培俊,等.铁路边坡不同坡位土壤物理化学性质差异性[J].水土保持学报,2012,26(6):91-95,101.

(上接第 53 页)

[22] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278: 11-22.

[23] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in Northern Apennines (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2007, 87:268-283.

[24] Li Youfang, Liu Jing, Zhang Xin, et al. Study on the vulnerable root location of two kinds of plants by anti-

fracture force [C]. Hunan Changsha: Proceedings of 2016 International Conference on New Energy and Sustainable Development, 2016.

[25] 吕春娟,陈丽华,赵红华,等.油松根系的轴向疲劳性能研究[J].摩擦学学报,2013,33(6):578-585.

[26] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength of tree roots [J]. *Plant Soil*, 2005, 278:1-9.

[27] 苏慧敏,刘静,张欣,等.3 种灌木根系易损荷载类型及易损部位研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(12):127-131.