

基于稀土氧化物示踪的黄土高原典型林分 土壤团聚体周转特征

张昌甜^{1,2}, 王凯博^{1,3}, 江瑶⁴, 魏蓉⁴, 吴普侠⁵, 李继伟^{1,6}

(1. 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安 710061; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061; 4. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061;

5. 陕西省林业科学院, 西安 710082; 6. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究林分类型对土壤团聚体周转特征的影响, 从动态过程角度阐明森林植被驱动土壤结构发育与稳定的内在机制。[方法] 以黄土高原典型阔叶林(山杨林)、针叶林(油松林)及其混交林为研究对象, 采用稀土氧化物示踪结合室内培养试验, 标记不同粒级团聚体, 定量分析其形成、破碎量及周转速率与时间。[结果] 3种林型土壤团聚体平均重量直径(MWD)差异显著($p < 0.05$), 混交林MWD最高, 稳定性最强, 油松林MWD最小, 稳定性最弱。培养期间, 所有林型团聚体破碎量均大于形成量, 呈净崩解特征。油松林周转最为剧烈, 大团聚体平均破碎率为74%, 且缺乏恢复韧性; 混交林大团聚体保留率 $> 50\%$, 扰动后快速稳定; 山杨林破碎与形成呈动态平衡。团聚体周转速率峰值出现在培养初期, 大团聚体平均速率为油松林 $[0.026 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})] > \text{混交林}[0.022 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})] > \text{山杨林}[0.013 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})]$ 。培养中后期, 混交林微团聚体周转时间延长, 物理保护作用增强。方差分析表明, 团聚体周转速率与破碎率受林型、粒级、时间三因素交互作用影响($p < 0.05$), 而形成率主要受林型与粒级、林型与时间的双因素交互驱动($p < 0.001$)。[结论] 混交林通过调控团聚体形成与破碎的相对强度, 降低大团聚体周转速率, 延长微团聚体周转时间, 从而增强土壤结构的稳定性。

关键词: 土壤团聚体; 周转特征; 稀土氧化物示踪; 林分类型; 黄土高原

中图分类号: S152.4; S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0213-12

Characteristics of Soil Aggregate Turnover in Typical Forest Stands on the Chinese Loess Plateau Revealed by Rare Earth Oxide Tracers

Zhang Changtian^{1,2}, Wang Kaibo^{1,3}, Jiang Yao⁴, Wei Rong⁴, Wu Puxia⁵, Li Jiwei^{1,6}

(1. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Observation and Research Station of Earth

Critical Zone on the Loess Plateau, Xi'an 710061, China; 4. Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research,

Xi'an 710061, China; 5. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China; 6. State Key Laboratory of Soil and

Water Conservation and Desertification Combating, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of stand types on the turnover characteristics of soil aggregates, and to clarify the intrinsic mechanism by which forest vegetation drives the development and stability of soil structure from the perspective of dynamic processes. [Methods] Taking typical broad-leaved forests (*Populus davidiana* forests), coniferous forests (*Pinus tabulaeformis* forests), and their mixed forests on the Loess Plateau as the research objects, rare earth oxide tracing combined with laboratory incubation experiments was adopted to label aggregates of different particle sizes. The formation amount, breakdown amount, turnover rate, and

收稿日期: 2026-03-18

修回日期: 2026-04-10

录用日期: 2026-04-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177339, U24A420629); 黄土科学全国重点实验室开放基金项目(SKLLQGFZ2503)

第一作者: 张昌甜(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被恢复与土壤固碳研究。E-mail: zhangchangtian@ieecas.cn

通信作者: 王凯博(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与水土保持研究。E-mail: wangkb@ieecas.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

turnover duration of soil aggregates were quantitatively analyzed. [Results] There were significant differences in the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates among the three stand types ($p < 0.05$). The mixed forest had the highest MWD and the strongest stability, while the *Pinus tabuliformis* forest had the lowest MWD and the weakest stability. During the incubation period, the breakdown amount of aggregates was greater than the formation amount in all stand types, showing a net disintegration characteristic. The turnover of aggregates was the most intense in the *Pinus tabuliformis* forest, with an average breakdown rate of 74% for large aggregates and a lack of recovery resilience. The retention rate of large aggregates in the mixed forest was more than 50%, and it stabilized rapidly after disturbance. In the *Populus davidiana* forest, the breakdown and formation of aggregates maintained a dynamic balance. The peak of aggregate turnover rate appeared in the early stage of incubation, and the average turnover rate of large aggregates was in the order of *Pinus tabuliformis* forest [$0.026 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$] > mixed forest [$0.022 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$] > *Populus davidiana* forest [$0.013 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$]. In the middle and late stages of incubation, the turnover time of microaggregates in the mixed forest was prolonged, and the physical protection effect was enhanced. Analysis of variance (ANOVA) showed that the aggregate turnover rate and breakdown rate were affected by the interaction of three factors: stand type, particle size, and time ($p < 0.05$), while the formation rate was mainly driven by the two-factor interactions of stand type $\times$ particle size and stand type $\times$ time ($p < 0.001$). [Conclusion] The mixed forest enhances the stability of soil structure by regulating the relative intensity of aggregate formation and breakdown, reducing the turnover rate of large aggregates, and prolonging the turnover time of microaggregates.

Keywords: soil aggregate; turnover characteristics; rare earth oxides tracers; forest stand types; Loess Plateau

Received: 2026-03-18

Revised: 2026-04-10

Accepted: 2026-04-17

Online(www.cnki.net): 2026-05-12

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,其有机碳储量超过大气与植被碳库之和,在全球碳循环与气候变化调控中扮演核心角色^[1-4]。森林生态系统作为最大的陆地碳汇,其土壤通过物理、化学和生物协同过程实现有机碳的长期固存,是决定森林碳汇能力的关键组成部分^[5-6]。土壤团聚体作为连接森林植被输入、微生物活动与有机碳稳定的关键物理载体,通过其多级结构对有机碳进行物理保护、化学转化和空间再分配,对维持土壤碳库的长期稳定具有重要意义^[7-9]。

有研究^[10]表明,超过 80% 的土壤有机碳被包裹于团聚体结构之中。其中,大团聚体可通过物理保护作用降低有机碳的微生物可及性,而微团聚体和矿物结合态有机碳则与碳的长期稳定性密切相关^[11-12]。然而,团聚体并非静态的“碳容器”,其形成、破碎和重组过程构成的动态周转,是调控土壤有机碳固存与释放的关键机制^[13-14]。因此,仅关注团聚体的静态分布或稳定性指标,难以深入揭示土壤碳库变化的动态本质。近年来,研究模式正逐渐从静态描述转向动态解析过程,强调需要量化团聚体在不同时间尺度上的转移路径和周转速率与周转时间^[15-16]。

稀土氧化物(REOs)示踪技术的兴起,为定量解析团聚体周转过程提供了强有力的工具^[17]。该技术能够同时标记多个粒级团聚体,并在最小化土壤扰动的前提下,追踪其形成与破碎的转移路径^[18-20]。基于

REOs 示踪的研究^[21]表明,团聚体的周转特征对土壤有机质性质及环境因子高度敏感,为从过程层面理解土壤结构-碳循环耦合机制提供了重要的试验证据。

森林植被类型通过调控凋落物输入(数量与质量)、根系分泌物及由此驱动的微生物群落结构与功能,深刻影响着土壤团聚体的胶结物质来源与周转过程^[22-23]。与单一纯林相比,混交林因其更高的物种多样性与更复杂的有机质输入来源,通常被认为能更有效地促进团聚体形成,并增强土壤结构稳定性^[24-25]。有研究^[26-27]表明,混交林土壤往往具有更高的大团聚体比例、平均重量直径(MWD)及有机碳质量分数。然而,现有研究多聚焦于土壤团聚体的静态分布与稳定性特征^[28-29],针对不同林型下团聚体周转的动态过程及其驱动机制仍不明确,限制了对森林类型如何驱动土壤结构发育与稳定性维持的科学认识。

黄土高原作为我国生态环境脆弱区,植树造林是该区域生态治理的核心措施,而土壤结构的改善是生态系统功能提升的基础^[30]。因此,本研究以黄土高原典型针叶林(油松林)、阔叶林(山杨林)及其混交林为研究对象,结合 REOs 示踪与室内培养试验,旨在实现的目标有:1)明确 3 种林型土壤团聚体组成与静态稳定性的差异;2)定量揭示不同林型下土壤团聚体的周转路径、形成量与破碎量;3)精确量化其周转速率与周转时间。最终,从团聚体动态周

转的过程视角,阐明混交林提升土壤结构稳定性的内在机制,为理解森林类型调控土壤碳固存的动态过程提供科学依据,其具体技术路线见图 1。

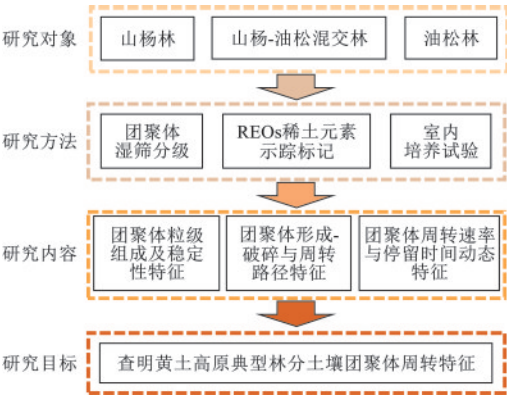


图 1 森林类型调控土壤碳固存的技术路线
Fig. 1 Technical framework of forest regulating soil carbon sequestration

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

研究区位于陕西省延安市洛川县厢寺川林场(35°57′36″N, 109°38′51″E),林场面积约 4.2 万 hm²。地处黄土高原腹地黄龙山林区,地貌类型以丘陵为主,地势由东北向西南倾斜,海拔 950~1 522 m。该区属温带半湿润干旱大陆性季风气候,年平均气温 8.6 ℃,年平均降水量 640 mm,无霜期约 160 d。黄龙山是黄土高原保存较为完整的暖温带落叶阔叶林区,区内土壤类型以森林灰褐土为主,主要乔木树种包括油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、栎类(*Quercus* spp.)、桦类(*Betula* spp.)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等。基本覆盖黄土高原主要的天然次生林类型^[31],具有较强的区域代表性。

于 2024 年 8 月,在研究区内选择林龄相近、立地条件相似的成熟山杨纯林、油松纯林及山杨-油松混交林分别布设样点,每类林型选择 3 个独立样地,各样地间距不少于 200 m。在每个林型样地内,设置 1 个 20 m×20 m 的标准样方,在每个标准样方内沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 小样方。清除地表植被与枯落物后,在每个小样方采用直径 5 cm 土钻采集 5 个 0~20 cm 土层土壤样品,将相同林型下采集的土壤样品充分混合,用于测定土壤稀土元素背景值。同时,在每个样地内,使用不锈钢方盒采集表层原状土,用于土壤团聚体分级测试;采用环刀法测定田间持水量^[32],每个样地设置 3 个重复。

1.2 土壤团聚体分级与稳定性指标

采用湿筛法测定水稳性团聚体粒径分布。将原状土沿自然裂隙轻轻掰成小块,过 5 mm 筛,去除粗

根和石砾。采用四分法称取 80.0 g 过筛土样,置于 TTF-100 型土壤团聚体分析仪的套筛最上层(孔径自上而下依次为 2、0.25、0.053 mm)。将套筛浸没于无菌水中,静置 5 min 使土壤样品充分浸润后,以 25 次/min 的频率(振幅 3 cm)振荡 2 min。随后,将各级筛网上的团聚体分别收集、烘干(40 ℃)并称重。

基于团聚体分级结果,采用平均重量直径(MWD)来衡量土壤团聚体粒径分布和稳定性状况,其值越大表明团聚体越稳定。计算公式为:

MWD = \sum_{i=1}^n (x_i \times w_i) \tag{1}

式中: x_i 为第*i*粒级团聚体的平均直径,mm; w_i 为该粒级团聚体占总质量的百分比,%。

1.3 稀土氧化物示踪剂的标记与重组土样制备

选用氧化镧(La₂O₃)、氧化钐(Sm₂O₃)、氧化钕(Nd₂O₃)和氧化钆(Gd₂O₃)4 种稀土氧化物(REOs)作为示踪剂,均购自河北捷配科技有限公司,所有试剂纯度均为 99.9%,平均粒径 50 nm,其中 La₂O₃密度为 6.51 g/cm³,Sm₂O₃密度为 8.35 g/cm³,Nd₂O₃密度为 7.24 g/cm³,Gd₂O₃密度为 7.41 g/cm³。3 种林型土壤中 4 种稀土元素的背景值测定结果见表 1。

表 1 3 种林型土壤中 4 种稀土氧化物的背景值
Table 1 Background values of four rare earth oxides in soils under three forest types

林型	mg/kg			
	La ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃
山杨林	31.17	4.93	26.43	4.14
油松林	30.80	5.05	27.03	4.28
混交林	32.87	5.39	28.63	4.60

采用湿混法对土壤进行稀土氧化物标记,将过 5 mm 筛的原状土充分混合后均分为 4 份,分别与 4 种稀土氧化物溶液混合,参考 Peng 等^[19]研究方法,并结合本研究区土壤稀土元素背景值,确定稀土氧化物添加浓度为 500 mg/kg,使标记后对应稀土元素显著高于背景值,达到背景浓度的 10 倍以上,从而保证检测灵敏度和示踪信号的可分辨性,同时降低土壤本底值对定量分析结果的干扰。将稀土氧化物配制成水溶液后,均匀喷施于待标记土壤中,多次润洗喷壶,并将润洗液全部喷施至土样以保证标记量准确,添加无菌水调节土壤含水量至田间持水量的 60%。将标记后的土壤装入置物箱,置于 4 ℃恒温培养箱中静置 7 d 实现水分平衡,随后转入 40 ℃烘箱中烘干 48 h,再次过 5 mm 筛,获得均匀标记的土样。

利用湿筛法将标记后的土样分离为不同粒级团聚体,根据各粒级团聚体质量百分比重新组合土壤,构建特异性标记体系。其中,2~5 mm 团聚体用 La₂O₃

标记,0.25~2 mm 团聚体用 Sm_2O_3 标记,0.053~0.25 mm 团聚体用 Gd_2O_3 标记,<0.053 mm 团聚体用 Nd_2O_3 标记。将重组后的土壤充分混合均匀,装入塑封袋中备用,具体重组流程见图 2。

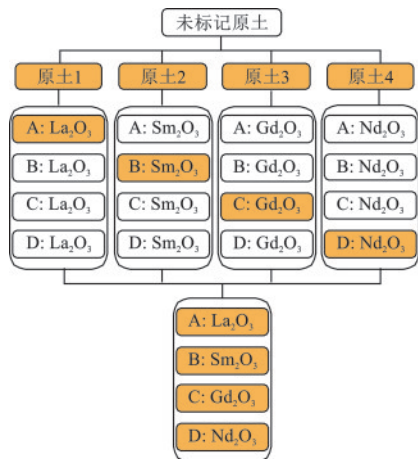


图 2 稀土氧化物标记与土壤团聚体重组流程示意

Fig. 2 Schematic diagram of the rare earth oxides (REOs) labelling and soil aggregate recombination procedure

1.4 土壤团聚体周转室内培养试验

称取相当于 80 g 干土重的重组土壤样品,装入 200 mL 塑料培养瓶中,加入无菌水调节土壤含水量至田间持水量的 60%。所有样品先置于 4 °C 培养箱中预培养 3 d,在抑制土壤微生物活性的条件下实现水分充分平衡,随后转移至 (25±2)°C 恒温培养箱中进行 56 d 培养试验。培养过程中采用保鲜膜密封培养瓶瓶口,保鲜膜上扎小孔保证气体交换,每隔 3 d 对培养瓶称重,补充无菌水至初始重量,维持土壤含水量稳定。

每个处理设置 3 次重复,在培养第 0、7、14、28、56 d 进行破坏性采样,测定土壤团聚体动态变化特征。采集的土样于 40 °C 烘箱中烘干 48 h,采用 1.2 节的湿筛法进行团聚体分级,收集各粒级团聚体样品,用于测定稀土元素浓度。

1.5 稀土氧化物指标测定与计算

1) 稀土氧化物浓度的测定。称取 0.1 g 烘干磨细的土壤样品,置于 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中,加入少量无菌水润湿后,采用酸消解体系进行全消解;消解完成

后用去离子水冲洗烧杯内壁,冷却至室温后将消解液转入 50 mL 具塞聚乙烯刻度试管中,用去离子水定容至刻度线,摇匀后静置澄清,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定上清液中稀土氧化物浓度。

2) 稀土氧化物回收率计算。标记回收率用于表征 REOs 标记过程的有效性。计算公式为:

$$\text{LR} = \frac{\text{LC} - \text{BC}}{\text{AC}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:LR 为稀土氧化物的标记回收率,%;LC 为标记后土壤中 REOs 的浓度,mg/kg;BC 和 AC 为土壤中稀土元素的背景浓度(表 1)和添加浓度(500 mg/kg)。

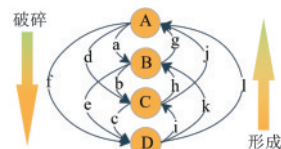
计算稀土氧化物湿筛回收率以表征湿筛过程中示踪剂的守恒性,为湿筛后 4 个粒级团聚体中 REOs 总质量与湿筛前标记土壤 REOs 总质量的比值。计算公式为:

$$\text{WR} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times C_i - \text{BC}}{\text{LC} - \text{BC}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:WR 为 REOs 的湿筛回收率,%; w_i 为湿筛后某一粒级团聚体的质量比例,%; C_i 为湿筛后某一粒级团聚体中 REOs 的浓度,mg/kg; n 为团聚体分级数。

1.6 土壤团聚体周转路径计算

基于 Peng 等^[19]建立的稀土氧化物示踪方法,定量计算土壤团聚体周转速率与周转路径。以 4 种稀土氧化物分别标记 4 个粒级团聚体:A(2~5 mm)、B(0.25~2 mm)、C(0.053~0.25 mm)、D(<0.053 mm)。根据团聚体破碎与重组的粒级转移特征,确定 6 条团聚体破碎路径(a~f)和 6 条形成路径(g~l)(图 3)。



注:A、B、C、D 分别表示 2~5、0.25~2、0.053~0.25、<0.053 mm 团聚体;字母 a~f 为破碎路径,g~l 为形成路径。

图 3 土壤团聚体的破碎与形成路径示意

Fig.3 Schematic diagram of breakdown and buildup pathways of soil aggregates

定义时间 $t_1 \sim t_2$ 内团聚体质量比例的离散变换矩阵为 $K(t_2 - t_1)$,表达式为:

$$K(t_2 - t_1) = \begin{bmatrix} 1 - a - d - f & g & j & l \\ a & 1 - g - b - e & h & k \\ d & b & 1 - j - h - c & i \\ f & e & c & 1 - l - k - i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:矩阵元素表征不同粒级团聚体间的转移比例; $a \sim f$ 为破碎路径转移系数, $g \sim l$ 为形成路径转移系数。基于变换矩阵,计算 t_2 时刻各粒级团聚体的质量百分比:

$$A(t_2) = (1 - a - d - f)A(t_1) + gB(t_1) + fC(t_1) + D(t_1) \quad (5)$$

$$B(t_2) = aA(t_1) + (1 - g - b - e)B(t_1) + hC(t_1) + kD(t_1) \quad (6)$$

$$C(t_2)=dA(t_1)+hB(t_1)+(1-j-h-c)C(t_1)+iD(t_1)$$
 (7)

$$D(t_2)=fA(t_1)+eB(t_1)+cC(t_1)+(1-l-k-i)D(t_1)$$
 (8)

计算 $t_1\sim t_2$ 培养期间 A、B、C 粒级团聚体的破碎

$$BU(A)=\frac{(g_{t_2}-g_{t_1})\times m_B+(j_{t_2}-j_{t_1})\times m_C+(l_{t_2}-l_{t_1})\times m_D}{m_A}$$
 (12)

$$BU(B)=\frac{(h_{t_2}-h_{t_1})\times m_C+(k_{t_2}-k_{t_1})\times m_D}{m_B}$$
 (13)

$$BU(C)=\frac{(i_{t_2}-i_{t_1})\times m_D}{m_C}$$
 (14)

式中： m_A 、 m_B 、 m_C 、 m_D 分别为 A、B、C、D 粒级团聚体的初始质量，g；在破碎方向，负值(BD<0)表示团聚体破碎程度低于初始状态，而正值(BD>0)表示破碎程度加剧。在形成方向上，正值(BU>0)表示相对于初始条件，团聚体形成量累积增加，而负值(BU<0)表示团聚体以破碎为主。

计算 $t_1\sim t_2$ 内各粒级团聚体的质量变化量 $M(t_2-t_1)$ ：

$$M(t_2-t_1)=\begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ M_C \\ M_D \end{bmatrix} \times K(t_2-t_1)$$
 (15)

式中： M_A 、 M_B 、 M_C 、 M_D 分别为 A、B、C、D 粒级团聚体的初始质量，g。

以周转速率 (TR) 表征团聚体周转的动态强度，计算公式为：

$$TR(A)=\frac{|a_{t_1}+d_{t_1}+f_{t_1}-(a_{t_2}+d_{t_2}+f_{t_2})|}{t_2-t_1}$$
 (16)

$$TR(B)=\frac{|g_{t_1}+b_{t_1}+e_{t_1}-(g_{t_2}+b_{t_2}+e_{t_2})|}{t_2-t_1}$$
 (17)

$$TR(C)=\frac{|j_{t_1}+h_{t_1}+c_{t_1}-(j_{t_2}+h_{t_2}+c_{t_2})|}{t_2-t_1}$$
 (18)

$$TR(D)=\frac{|l_{t_1}+k_{t_1}+i_{t_1}-(l_{t_2}+k_{t_2}+i_{t_2})|}{t_2-t_1}$$
 (19)

率(BD)与形成率(BU)，表征团聚体周转的相对变化特征：

$$BD(A)=(a_{t_2}-a_{t_1})+(d_{t_2}-d_{t_1})+(f_{t_2}-f_{t_1})$$
 (9)

$$BD(B)=(b_{t_2}-b_{t_1})+(e_{t_2}-e_{t_1})$$
 (10)

$$BD(C)=(c_{t_2}-c_{t_1})$$
 (11)

式中：TR 为团聚体周转速率，g/(g·d)；团聚体周转时间(MRT)为周转速率的倒数，表征团聚体在土壤中的平均停留时间，d。

1.7 数据处理

采用 SPSS 24 软件进行统计分析，通过单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林型、培养时间下土壤团聚体指标的组间差异显著性，显著性水平设为 $p<0.05$ 。每个处理设置 3 个重复，试验结果以平均值±标准误表示。采用 R4.5.2 软件进行三因素方差分析，以全面评估林型、培养时间和土壤粒级三因子及其交互作用对团聚体指标的影响。图形绘制采用 Origin 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 REOs 标记回收率与湿筛回收率

3 种林型土壤 REOs 标记回收率为 63%~90%，湿筛回收率为 75%~117%，总体处于可接受范围(表 2)，说明 REOs 与土壤颗粒结合较为均匀，且在样品处理与团聚体湿筛过程中流失量有限。利用 REOs 转移矩阵预测土壤团聚体质量比例发现，团聚体实测比例与预测比例高度吻合，其线性关系接近 1:1，且决定系数(R^2)均>0.97(图 4)。

由此可知，REOs 在土壤团聚体各粒级间质量守恒性良好，能够较好地示踪团聚体的物理混合与周转过程，为本研究定量解析不同林型下土壤团聚体的周转动态提供可靠的方法学基础。

表 2 3 种林型土壤稀土氧化物 (REOs) 标记回收率与湿筛回收率

Table 2 Labelling and wet sieving recoveries of rare earth oxides in soils under three forest types				%
回收率	REOs	山杨林	油松林	混交林
标记回收率	La ₂ O ₃	76.46±1.50Ab	83.51±1.02Aa	63.16±1.63Bc
	Sm ₂ O ₃	74.55±1.62Ab	86.46±1.96Aa	67.12±8.66Bc
	Nd ₂ O ₃	85.78±0.68Ba	89.99±0.77Aa	80.41±1.32Cb
	Gd ₂ O ₃	75.10±0.28Ab	80.08±1.46Aa	70.75±3.53Bb
湿筛回收率	La ₂ O ₃	95.34±2.43Aa	99.05±1.63Aa	104.01±3.58Aa
	Sm ₂ O ₃	117.03±4.20Aa	114.39±3.22Aa	104.99±20.75Aa
	Nd ₂ O ₃	83.26±1.49Ab	87.22±2.43Aab	85.30±1.88Ab
	Gd ₂ O ₃	75.49±1.44Ac	76.79±2.57Ab	85.44±2.41Aa

注：表中数据为平均值±标准误；n=3。同行不同大写字母表示同一稀土元素在不同林型间差异显著($p<0.05$)；同列不同小写字母表示同一林型不同稀土元素间差异显著($p<0.05$)。

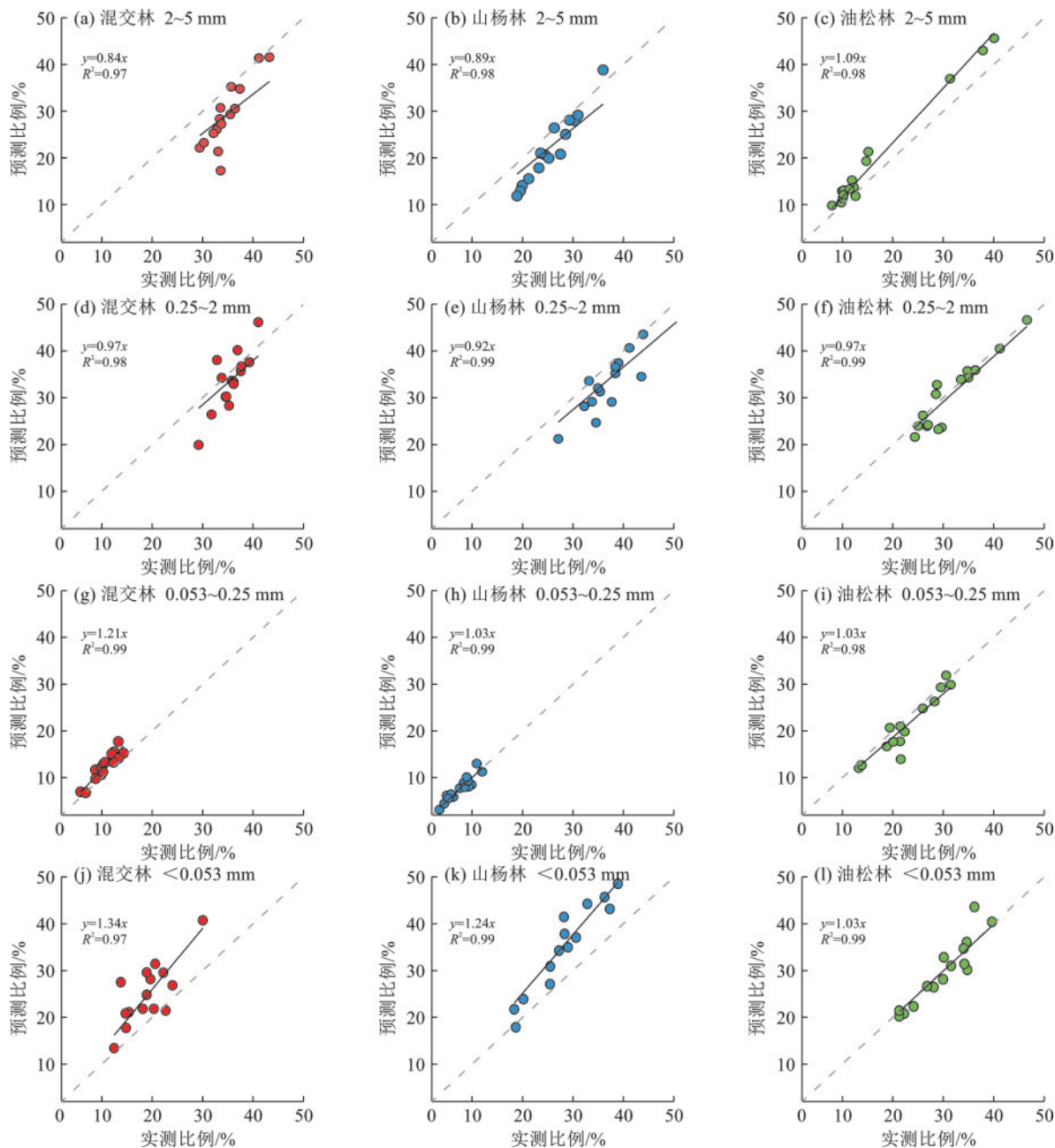


图 4 3 种林型土壤团聚体质量比例的预测值与实测值拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between predicted and measured mass proportions of soil aggregates under three forest types

2.2 不同林型下土壤团聚体粒径分布及其稳定性分析

2.2.1 土壤团聚体粒级组成及其稳定性 3 种林型土壤团聚体均以 >0.25 mm 团聚体为主, 平均质量百分比为 62.2%~75.3%, <0.25 mm 团聚体占比相对较低(图 5)。具体而言, 混交林土壤中 2~5 mm 的大团聚体比例最高为 40.8%, 显著高于山杨林的 28.2% 和油松林的 21.6%。相应地, 土壤团聚体平均重量直径(MWD)在 3 种林型间也呈显著差异($p < 0.05$)。混交林 MWD 值最大, 可能与其有机质输入更丰富、根系结构更复杂、更有利于大团聚体形成与保留有关, 且显著高于山杨林和油松林; 油松林 MWD 值最小, 可能与其凋落物分解较慢, 胶结物质供给不足, 不利于团聚体结构稳定维持有关。

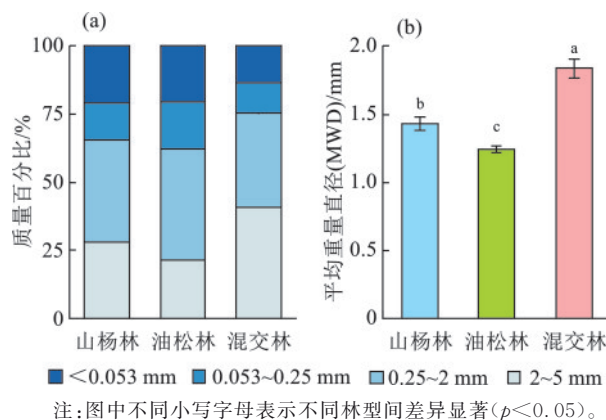


图 5 3 种林型土壤团聚体的粒级分布特征与平均重量直径
Fig. 5 Size class distribution characteristics and mean weight diameter of soil aggregates under three forest types

2.2.2 土壤团聚体粒级与MWD动态变化 培养期间,3种林型土壤团聚体粒级分布和MWD均呈显著时间动态变化(图6、图7)。整体而言, >0.25 mm大团聚体质量百分比在培养初期(0~14 d)显著下降,而在中后期(28~56 d)下降速率趋缓甚至回升,体现土壤团聚体“边破碎、边重组”的动态演变特征。

3种林型MWD的变化趋势与大团聚体高度一致,也表现为初期下降、后期稳升。混交林MWD在培养各阶段均显著高于山杨林和油松林,且各粒级占比的时间变幅最小,结构稳定性最优;山杨林MWD处于中间水平,大团聚体占比呈先降后升趋

势;油松林MWD初期快速下降后持续低水平,大团聚体占比降幅最大,结构稳定性最差。这种初期下降、后期稳升的变化特征主要是由于培养初期重新润湿和培养扰动打破原有团聚体结构平衡,使得对扰动更敏感的大团聚体优先崩解并向小粒级转移,从而导致MWD快速下降;进入培养中后期后,随着不稳定结构的瓦解完成,团聚体重组逐渐增强,部分林型中MWD下降趋缓,甚至出现回升。相比之下,混交林变化幅度较小,说明其对扰动具有较强的缓冲能力;油松林降幅最大,则显示其结构在培养初期最易失稳。

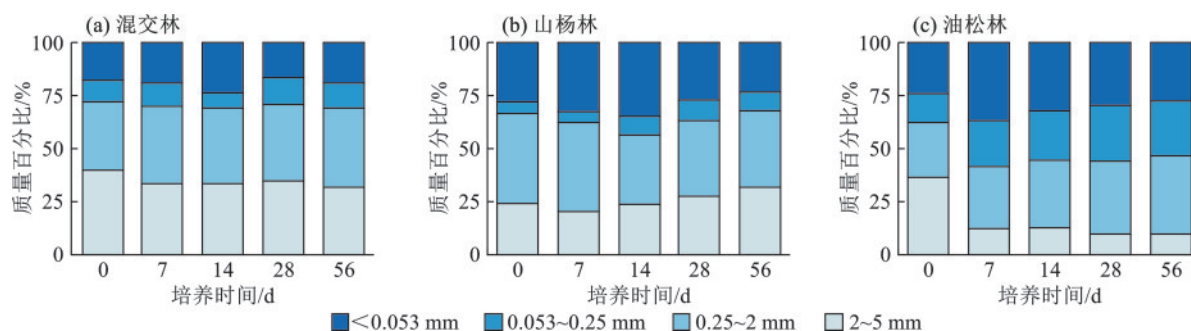
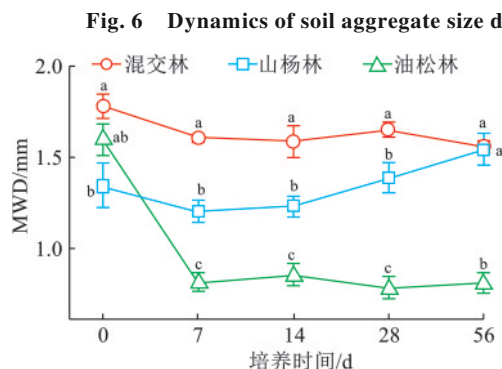


图6 3种林型土壤团聚体周转过程中粒径分布的动态变化



注:图中不同小写字母表示同一培养时间不同林型间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图7 3种林型土壤团聚体周转过程中平均重量直径(MWD)的动态变化

Fig. 7 Dynamics of mean weight diameter (MWD) of soil aggregates during turnover process under three forest types

2.3 不同林型对土壤团聚体相对变化量及周转路径的影响

2.3.1 土壤团聚体的形成与破碎特征 3种林型土壤团聚体的相对破碎量与相对形成量随着培养时间呈明显波动变化,且林型间的变化模式存在显著差异(图8)。从粒级与时间规律来看,所有林型的破碎率总体随团聚体粒级增大呈上升趋势,且培养初期的相对破碎程度显著高于后期;而相对形成率未随粒级变化表现出规律性特征。2~5 mm大团聚体作为土壤结构的核心组分,其相对变化量在培养初期的动态响应最为剧烈。在该粒级,油松林破碎率在培养第7 d达峰值(19%),形成率则

降至谷值(-55%),团聚体周转呈净破碎特征,结构快速崩解;混交林与山杨林初期虽表现为净破碎(破碎率15%、8%),但培养第14 d破碎率转负,形成率回正,周转过程由净破碎向净形成转变,后期进入动态平衡。

总体来看,油松林团聚体的整体破碎率显著高于山杨林与混交林的整体破碎率,而形成率则显著低于后二者,体现出林型对团聚体相对变化量的调控差异,其中油松林在培养扰动下更容易表现为破碎主导,且破碎后重组能力较弱;混交林和山杨林在第14 d前后形成过程逐渐增强,说明其具有更强的结构恢复潜力。尤其是混交林,由于前期破碎程度相对较低,而后期形成过程较快恢复,因此更容易由快速失稳转向相对平衡。

2.3.2 土壤团聚体的周转路径 全培养期内,3种林型土壤团聚体的破碎量大于形成量,整体表现为净崩解的周转特征,且周转路径的核心为2~5 mm大团聚体(A)向小粒径团聚体(B、C)及粉黏粒(D)的转移,林型间转移和保留比例差异显著(图9)。油松林平均破碎率最高(74%),形成率最低(19%);混交林平均破碎率最低(44%),形成率居中(27%);山杨林平均破碎率(58%)与形成率(51%)均处于中间水平,且二者数值接近。

培养初期(第7 d),油松林大团聚体向小团聚体(B)转移比例达 $(38 \pm 1)\%$,向粉黏粒直接崩解比例为 $(24 \pm 3)\%$,大团聚体保留率仅27%,结构破碎程

度最为显著;混交林大团聚体保留率最高(约 50%),且向粉黏粒的转移比例仅(9±1)%,为各林型最低;

山杨林大团聚体保留率为 42%,但其微团聚体(C)向粉黏粒的转化比例达(59±4)%,为各林型最高。

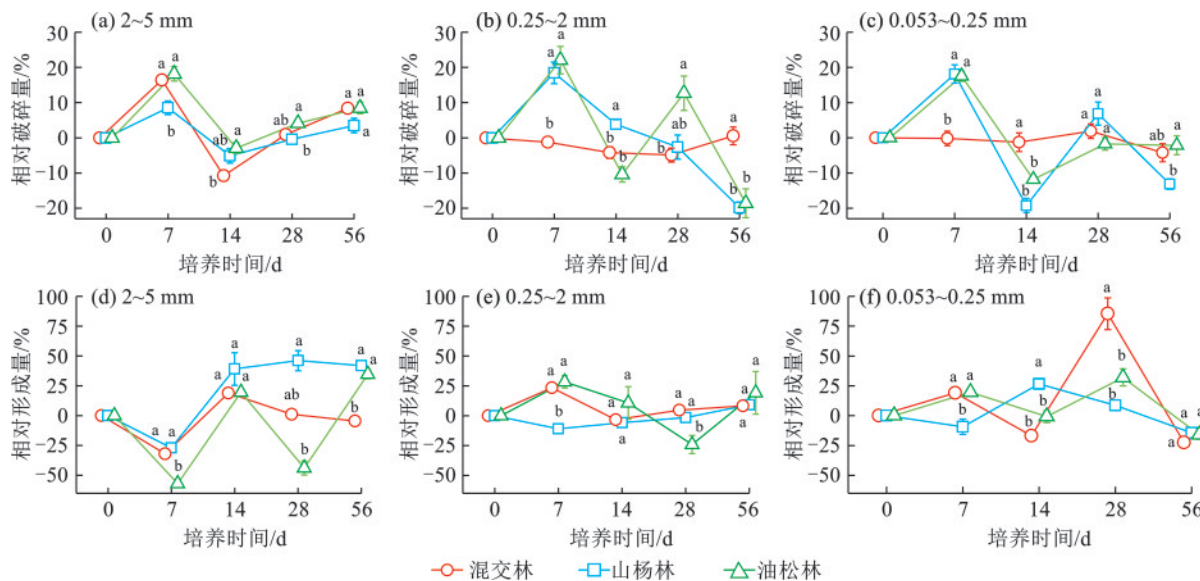
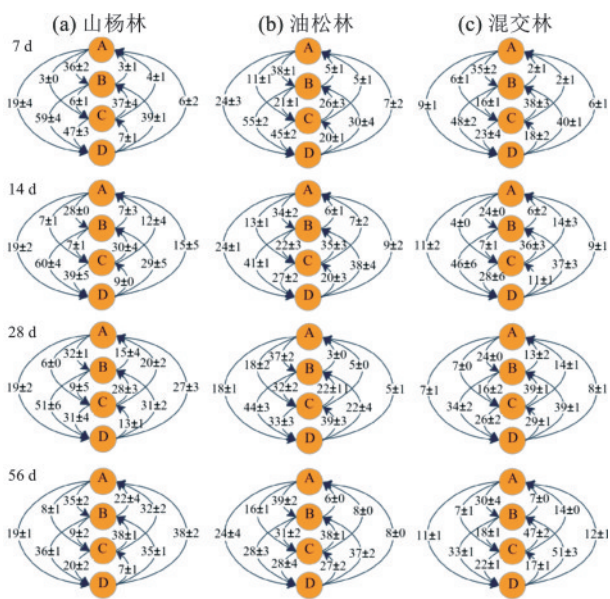


图 8 3 种林型下土壤团聚体的相对破碎量与相对形成量的时间动态

Fig. 8 Temporal dynamics of relative breakdown and build-up amounts of soil aggregates under three forest types



注:图中数据为平均值±标准误;n=3;A、B、C、D分别表示5~2、2~0.25、0.25~0.053、<0.053 mm团聚体。

图 9 3 种林型不同培养时间土壤团聚体的周转路径特征

Fig. 9 Turnover pathway characteristics of soil aggregates at different incubation times under three forest types

培养中期(第 14 d),3 种林型的团聚体周转路径进一步分化。油松林的破碎路径持续主导,大团聚体保留率进一步降低;混交林的大团聚体保留率上升至 61%,同时其微团聚体向更大粒级团聚体的重组比例增加;山杨林大团聚体保留率升至 46%,整体周转路径仍处于油松林与混交林之间。

培养末期(第 56 d),油松林大团聚体损失最为严重,且形成路径微弱;混交林在维持较高大团聚体保留率(>50%)的同时,微团聚体向小团聚体的转移

持续增加;山杨林大团聚体则呈高破碎、高形成的动态平衡特征。

不同林型周转路径的分化进一步说明,其结构稳定性差异不仅体现在初始大团聚体比例上,更体现在培养过程中破碎方向和重组能力的不同。由此可见,混交林的大团聚体保留率较高,向粉黏粒的单向崩解较弱,并伴随后期一定程度的重组增强,因此更有利于维持较高 MWD;而油松林则以持续崩解和向细粒级转移为主,形成路径较弱,使其结构脆弱性在培养过程中不断加剧。

2.4 不同林型土壤团聚体周转速率与周转时间

土壤团聚体的周转速率与周转时间在 3 种林型间存在显著差异,且随培养时间呈动态变化趋势(图 10)。3 种林型团聚体周转速率均在培养初期(7~14 d)出现峰值,且林型间差异显著。以 2~5 mm 大团聚体为例,油松林周转速率最高,达 0.026 g/(g·d);混交林次之,为 0.022 g/(g·d);山杨林最低,为 0.013 g/(g·d)。进入培养中后期(28~56 d),除油松林微团聚体仍保持较高的周转速率外,3 种林型团聚体的周转速率显著下降,周转时间明显增加。

培养初期较高的周转速率与大团聚体快速崩解和粒级转移增强相一致,说明该阶段是团聚体结构快速调整最活跃的时期;而中后期周转时间延长,表明团聚体周转逐步由快速破碎转向较低强度的重组与稳定维持阶段。油松林各粒级团聚体周转速率偏高,周转时间偏短;混交林则表现为初期周转速率适中,后期周转时间显著延长;山杨林各粒级团聚体周转速率与时间均处于中间水平,且动态变化相对平缓。

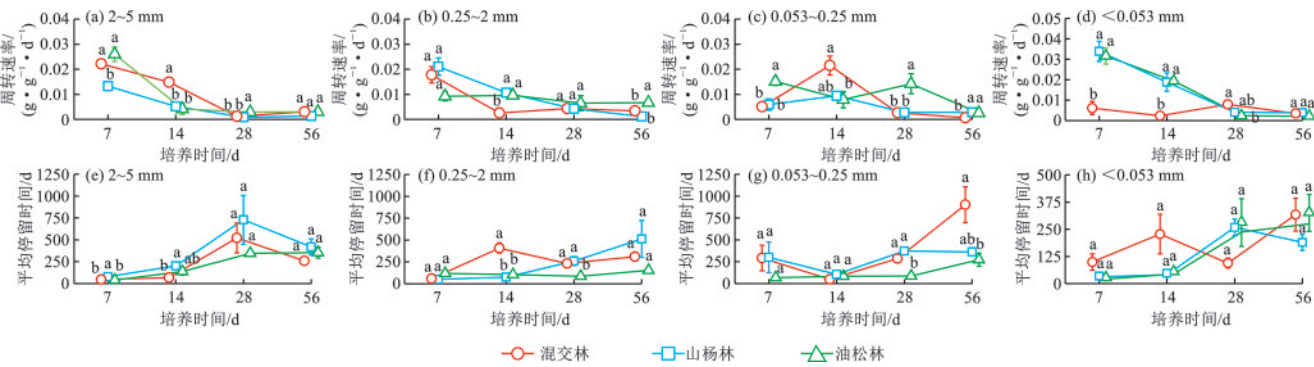


图 10 3 种林型土壤团聚体的周转速率与平均停留时间的时间动态

Fig. 10 Temporal dynamics of turnover rate and mean residence time of soil aggregates under three forest types

2.5 土壤团聚体周转特征的影响因素分析

三因素方差分析结果(表 3)显示,林型、团聚体粒级和培养时间对土壤团聚体周转特征存在显著的复合调控效应。其中,周转速率(TR)和破碎率(BD)受林型×粒级×时间三因素交互作用的显著影响($p<0.05$),表明林型对 TR 和 BD 的影响并非固定不变,而是高度依赖于具体的团聚体粒级和培养时间阶段,呈复杂的时空耦合动态。

表 3 林型、团聚体粒级与培养时间对土壤团聚体周转指标的三因素方差分析

Table 3 Three-way ANOVA of the effects of forest type, aggregate size class and incubation time on soil aggregate turnover indices

指标	因素	F 值	显著性
周转速率 (TR)	林型	2.158	ns
	粒级	10.220	***
	时间	49.090	***
	林型×粒级	4.609	***
	林型×时间	1.003	ns
	粒级×时间	5.481	***
	林型×粒级×时间	3.378	***
	林型	3.832	*
破碎率 (BD)	粒级	8.007	***
	时间	25.121	***
	林型×粒级	0.180	ns
	林型×时间	3.446	**
	粒级×时间	4.127	***
	林型×粒级×时间	2.941	**
	林型	0.548	ns
	粒级	0.405	ns
形成率 (BU)	时间	5.063	**
	林型×粒级	7.977	***
	林型×时间	4.513	***
	粒级×时间	14.119	***
	林型×粒级×时间	1.199	ns

注:***、**和*分别表示在 $p<0.001$ 、 $p<0.01$ 、 $p<0.05$ 水平上差异显著;ns 表示差异不显著。

相比之下,形成率(BU)未检测到显著的三因素交互作用,但受林型×粒级及林型×时间双因素交互效应的显著驱动($p<0.001$),说明林型对 BU 的影响虽独立于三因素的复杂耦合,但仍受到团聚体物理结构或培养时间的单独调节。

3 讨论

在培养过程中,3 种林型土壤团聚体稳定性及其周转特征表现出显著的时间动态变化。总体来看,培养过程中团聚体结构呈净崩解状态。2~5 mm 大团聚体比例随着培养时间渐趋下降,而 0.053~0.25 mm 微团聚体与<0.053 mm 粉黏粒比例相应上升,导致 MWD 整体降低,反映培养扰动下破碎路径的主导作用。此规律与刘雅俊等^[16]在冻融循环对黑土团聚体影响研究结果一致,强调团聚体稳定性并非静态属性,而是由其内部形成与破碎过程的动态平衡共同决定。

从时间维度看,培养初期(0~14 d)是 3 种林型土壤团聚体结构调整最为剧烈的阶段,也是团聚体周转由失稳走向重组的关键时期。该阶段内,大团聚体比例和 MWD 快速下降,周转速率显著升高,说明培养扰动首先打破原有结构平衡,破碎过程占据主导(图 8)。这种快速下降主要与土壤重新润湿和培养扰动下大团聚体优先崩解有关^[33],而团聚体重组及新胶结结构形成具有一定滞后性,因此前期整体表现为净破碎。随着培养的进行,最不稳定的部分破碎,细颗粒再结合,微生物代谢产物积累及有机胶结作用逐渐增强^[34],混交林和山杨林在第 14 d 前后由净破碎逐步转向相对平衡,表现出一定恢复特征,而油松林仍以持续破碎为主,恢复能力较弱。

林型作为关键生物因子,通过改变有机质输入特征与土壤微环境,对团聚体形成-破碎平衡及周转过程产生显著调控作用^[35]。本研究发现,混交林土壤初始 MWD 最高,且在培养过程中始终高于 2 种纯林。从周转动力学来看,混交林大团聚体平均破

碎率最低,但形成过程活跃,使其能在培养初期(第14 d)迅速从净破碎转向净形成,实现动态平衡(图8、图9)。后期微团聚体(0.053~0.25 mm)的周转时间显著延长(图10),表明微团聚体获得更强的物理保护,有利于土壤结构的长期稳定^[34],这种优势可能源于混交林生态系统的多重协同机制。一方面,混交林多样化的有机质输入提供从易分解到难分解的碳源梯度,持续刺激微生物活性并促进胶结物质(如微生物衍生多糖和真菌菌丝)的生成^[16];另一方面,针阔叶树种互补的根系系统增强根系对土壤结构的穿插与缠结^[24]。优化的土壤微环境(如缓解针叶林土壤酸化)也有利于微生物群落功能与团聚体形成^[36]。这些因素共同作用,不仅降低团聚体的破碎倾向,更关键的是强化并加速其重组过程,从而实现高稳定性。

相较之下,油松林土壤团聚体表现出明显的结构脆弱性。其MWD在培养初期快速下降并持续处于低位,大团聚体平均破碎率最高,而平均形成率最低(图9)。其大团聚体在初期即快速地向小团聚体及粉黏粒转移,保留率最低,各粒级周转时间最短(图10)。这种“高破碎、低形成、快周转”的模式,导致油松林土壤团聚体在扰动下迅速崩解且缺乏恢复能力。主要归因于油松凋落物富含难分解的木质素和多酚类物质,分解缓慢,导致土壤中可供微生物利用的有效碳源及由此产生的胶结物质长期匮乏^[37-38]。总之,油松林土壤胶结物质的缺乏削弱团聚体内部的黏结力和对外部扰动的抵抗能力,使得破碎过程极易发生,而重组过程难以启动,最终表现为结构稳定性差。而山杨林作为纯阔叶林,其凋落物分解速率快,养分释放率高,土壤团聚体的稳定性与周转动态介于混交林与油松林之间。

林型、粒级与时间的显著交互作用表明,林型效应具有明显的阶段性和粒级依赖性(表3)。培养初期,大团聚体是林型差异最敏感的反应对象,油松林表现出更高的破碎率和周转速率,而混交林则通过较高的大团聚体保留率缓冲扰动;培养中后期,不同林型间差异则更多体现在微团聚体重组及停留时间变化上,尤其混交林微团聚体周转时间延长,说明其形成更稳定的微结构保护体系。因此,不同林型对团聚体周转的调控并非固定不变,而是随着培养阶段和粒级的变化而动态分化。

需要注意的是,本研究为室内培养试验,虽能精准控制环境条件,定量解析团聚体周转过程,但与自然生境相比,缺乏降水、温度和生物活动等自然因素的动态影响,因此研究结果在野外的适用性仍需进

一步验证。后续研究可结合野外定位观测与室内培养试验,探究自然条件下不同林型土壤团聚体的周转规律,并深入分析土壤微生物群落、酶活性与团聚体周转的耦合关系,以更全面、深入地阐明森林植被驱动土壤结构发育与稳定性维持的内在机制。

4 结论

1)黄土高原山杨林、油松林及二者混交林的土壤团聚体稳定性差异显著,混交林的土壤团聚体平均重量直径及2~5 mm大团聚体占比均最高,稳定性最强;油松林二者指标均为最低,稳定性最弱;山杨林介于2种林型之间。

2)3种林型土壤团聚体破碎量均大于形成量,整体表现为净崩解趋势,但周转路径的林型差异显著。油松林呈“高破碎、弱重组、低保留”的单向崩解路径,混交林为“低破碎、强重组、高保留”的稳定恢复路径,山杨林则处于二者之间的动态平衡状态。

3)土壤团聚体周转速率峰值均出现在培养初期,其中,2~5 mm大团聚体平均周转速率为油松林 $[0.026 \text{ g}/(\text{g}\cdot\text{d})]$ >混交林 $[0.022 \text{ g}/(\text{g}\cdot\text{d})]$ >山杨林 $[0.013 \text{ g}/(\text{g}\cdot\text{d})]$ 。培养中后期,相较于其他林型,混交林的0.053~0.25 mm微团聚体周转时间显著延长,表明其对土壤的物理保护作用进一步增强。

4)林型对土壤团聚体周转的调控作用受团聚体粒级与培养时间的共同制约,且调控效应因指标不同呈现明显分化;与纯林相比,混交林通过降低大团聚体周转速率,延长中后期微团聚体周转时间,增强土壤结构的稳定性。

参考文献:

- [1] Zhou Zhenghu, Ren Chengjie, Wang Chuankuan, et al. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: e5329.
- [2] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [3] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [4] Ren Shuai, Wang Tao, Guenet B, et al. Projected soil carbon loss with warming in constrained earth system models[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: e102.
- [5] Yuan Zaixiang, Guan Qingwei, Chen Xinli, et al. Tree diversity increases soil C and N stocks of secondary forests in subtropical China[J]. *Catena*, 2023, 222: e106812.
- [6] 赵利祥, 李东耀, 宋艳曦, 等. 丹江口小流域水土保持造林碳储量及空间分异特征[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(3): 278-287.

- Zhao Lixiang, Li Dongyao, Song Yantun, et al. Carbon storage and spatial differentiation of soil and water conservation afforestation in Danjiangkou small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(3): 278-287.
- [7] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [8] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: A4-A9.
- [9] 徐英德. 基于保护性农业的土壤固碳过程研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 658-670.
- Xu Yingde. Conservation agriculture-mediated soil carbon sequestration: A review [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 658-670.
- [10] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. *中国科学(地球科学)*, 2021, 51(5): 680-695.
- Liang Chao, Zhu Xuefeng. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(5): 680-695.
- [11] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 426-445.
- [12] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994.
- [13] 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 and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [14] 汪零, 吴文泉, 倪世民, 等. 溅蚀过程中红壤团聚体周转路径的定量表征 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 115-123.
- Wang Ling, Wu Wenxiao, Ni Shimin, et al. Quantitative characterization of the turnover path of red soil aggregate in the splash process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8): 115-123.
- [15] Asano M, Wagai R. Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic andisol [J]. *Geoderma*, 2014, 216: 62-74.
- [16] 刘雅俊, 刘帅, 甘磊, 等. 基于稀土氧化物示踪法探究冻融循环对黑土团聚体周转的影响 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 964-977.
- Liu Yajun, Liu Shuai, Gan Lei, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil aggregates turnover in mollisols using rare earth oxides as tracers [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 964-977.
- [17] De Gryze S, Six J, Merckx R. Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(5): 693-707.
- [18] 雷涵喆, 徐金忠, 杨庆楠, 等. 间歇性降雨条件对黑土表层孔隙结构和团聚体周转的影响 [J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3): 61-69.
- Lei Hanzhe, Xu Jinzhong, Yang Qingnan, et al. Influence of intermittent rainfall conditions on the pore structure and aggregate turnover of black soil topsoil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3): 61-69.
- [19] Peng Xinhua, Zhu Qiaohong, Zhang Zhongbin, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 81-94.
- [20] Liu S, Guo Z C, Pan Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure [J]. *Geoderma*, 2019, 351: 36-48.
- [21] Halder M, Liu S, Zhang Z B, et al. Effects of organic matter characteristics on soil aggregate turnover using rare earth oxides as tracers in a red clay soil [J]. *Geoderma*, 2022, 421: e115908.
- [22] 云慧雅, 毕华兴, 王珊珊, 等. 不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 183-189.
- Yun Huiya, Bi Huaxing, Wang Shanshan, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 183-189.
- [23] Prescott C E, Grayston S J. Tree species influence on microbial communities in litter and soil: Current knowledge and research needs [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 309: 19-27.
- [24] Li Ming, Ding Xinli, Chen Meng, et al. Mixed plantations enhance soil aggregation and carbon storage: A global meta-analysis [J]. *Catena*, 2025, 254: e109013.
- [25] Zheng Yonglin, Wang Yunqi, Zhang Yuxuan, et al. Broadleaf trees increase soil aggregate stability in mixed forest stands of southwest China [J]. *Forests*, 2023, 14(12): e2402.
- [26] Yang Yi, Tilman D, Furey G, et al. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: e718.
- [27] He Yaqin, Zhang Qianchun, Jiang Chenyang, et al.

- Mixed planting improves soil aggregate stability and aggregate-associated C-N-P accumulation in subtropical China[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, 6:e1141953.
- [28] 白芹菲,王艳琪,鲍玉海,等.黑龙滩水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3):168-176.
- Bai Qinfei, Wang Yanqi, Bao Yuhai, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):168-176.
- [29] 赵玉蝶,王兴来,余洁,等.土壤团聚体有机碳矿化对秸秆添加和水分变化的响应[J]. *南方农业学报*, 2025, 56(4):1137-1146.
- Zhao Yudie, Wang Xinglai, Yu Jie, et al. Response of organic carbon mineralization in different soil aggregates to straw addition and moisture variation [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2025, 56(4):1137-1146.
- [30] Hartmann M, Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems [J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2023, 4(1):4-18.
- [31] 刘冲,朱运,邓健,等.黄土高原次生林演替过程土壤氮矿化特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(14):6346-6356.
- Liu Chong, Zhu Yun, Deng Jian, et al. The soil nitrogen mineralization and its influencing factors during secondary forest succession in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14):6346-6356.
- [32] 张韫.土壤·水·植物理化分析教程[M].北京:中国林业出版社,2011.
- Zhang Yun. Tutorial for physical and chemical analysis of soil, water and plants [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.
- [33] 梁春林,王彬,张文龙.东北黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与结构特征[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(6):43-52.
- Liang Chunlin, Wang Bin, Zhang Wenlong. Stability and structural characteristics of soil aggregates on sloping farmland in black soil region, Northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6):43-52.
- [34] 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 Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3):627-643.
- [35] 潘明巧,陈晓燕,冯滔,等.紫色土区典型土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其结构稳定性[J]. *中国水土保持科学*, 2026, 24(1):188-197.
- Pan Mingqiao, Chen Xiaoyan, Feng Tao, et al. Soil aggregate-associated organic carbon content and structural stability under typical land use types in purple soil region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2026, 24(1):188-197.
- [36] 黄荣珍,朱丽琴,邹显花,等.红壤恢复林地微团聚体形成与稳定的影响机制研究进展[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4):14-22.
- Huang Rongzhen, Zhu Liqin, Zou Xianhua, et al. Review on the mechanism of microaggregate formation and stabilization of restoration forest in red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4):14-22.
- [37] 魏志聪,罗晓敏,石福习,等.武夷山西坡退耕还林对土壤溶解性有机质含量和生物降解性的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2):52-59.
- Wei Zhicong, Luo Xiaomin, Shi Fuxi, et al. Effects of returning farmland to forest on concentration and biodegradability of soil dissolved organic matter in the western slope of Wuyi Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2):52-59.
- [38] 张晓曦,周雯星,李佳佳,等.早期分解中油松与阔叶树种凋落叶混合分解效应及其相互影响[J]. *植物科学学报*, 2019, 37(3):303-311.
- Zhang Xiaoxi, Zhou Wenxing, Li Jiajia, et al. Mixed decomposition and interspecific effects during early decomposition of litter mixtures of *Pinus tabulaeformis* Carrière and broadleaved species [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3):303-311.