

DOI: 10.11766/trxb202412230501

CSTR: 32215.14.trxb202412230501

吴勤玉, 张晨阳, 杨伟, 刘芮彤, 王军光. 基于稀土元素示踪法定量分析冻融作用下黑土团聚体周转和有机碳的变化[J]. 土壤学报, 2025, 62 (6): 1766–1779.

WU Qinyu, ZHANG Chenyang, YANG Wei, LIU Ruitong, WANG Junguang. Quantitative Analysis of Changes in Black Soil Aggregate Turnover and Soil Organic Carbon Under Freeze-thaw Action Based on Rare Earth Element Tracer Method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (6): 1766–1779.

基于稀土元素示踪法定量分析冻融作用下黑土团聚体周转和有机碳的变化*

吴勤玉¹, 张晨阳¹, 杨伟², 刘芮彤¹, 王军光^{1†}

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

摘要: 土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 土壤有机碳 (SOC) 是土壤肥力的核心。为探究在冻融作用下土壤团聚体的周转路径和有机碳的定量表征, 利用稀土元素示踪技术, 以黑龙江省嫩江市鹤山农场耕地和林地黑土为研究对象, 通过室内培养, 分别设置 0、3、6、10、15、25 次冻融循环次数, 采用干湿循环法标记不同粒径土壤团聚体 (5~2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm), 通过 Na_2O_2 碱熔法测定稀土元素浓度, 量化团聚体周转过程, 探究冻融循环作用下土壤团聚体稳定性 (平均重量直径, MWD)、粒径分布、团聚体周转路径以及 SOC 的变化情况。研究结果显示, 冻融循环加速相邻团聚体之间的转换, 促使各粒径团聚体向 2~0.053 mm 团聚体粒径转化更加剧烈。MWD 和 5~2 mm 团聚体含量随冻融循环次数的增加而逐渐降低, 而 2~0.053 mm 团聚体含量逐渐增加。土壤团聚体周转时间随着冻融循环次数的增加而增加, 且 0.25~0.053 mm 团聚体增加最显著。经冻融处理后全土有机碳含量无显著变化, 但随冻融次数的增加 5~2 mm 团聚体有机碳含量上升, 其他粒径团聚体有机碳含量下降。所以, 冻融作用通过加剧土壤团聚体周转过程中的破坏和形成进而影响土壤结构动态变化的内在过程, 降低土壤团聚体稳定性, 改变土壤有机碳含量。研究结果进一步揭示了冻融作用下黑土微观结构演变特征及其有机碳的定量表征, 为冻融侵蚀下黑土各粒径土壤结构变化和团聚体周转过程深入研究提供理论依据。

关键词: 稀土元素 (REE); 黑土; 团聚体稳定性; 有机碳; 冻融循环; 周转路径

中图分类号: S157 文献标志码: A

Quantitative Analysis of Changes in Black Soil Aggregate Turnover and Soil Organic Carbon Under Freeze-thaw Action Based on Rare Earth Element Tracer Method

WU Qinyu¹, ZHANG Chenyang¹, YANG Wei², LIU Ruitong¹, WANG Junguang^{1†}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Water Resources

* 国家自然科学基金项目(42177317)和湖北省大别山区典型小流域次降雨水土流失预报模型研究项目(HBSKY202304)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42177317) and the Study on Sub-rainfall Erosion Forecasting Model for Typical Sub-watersheds in Dabie Mountainous Area of Hubei Province, China (No. HBSKY202304)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 吴勤玉 (2001—), 女, 湖北恩施人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。E-mail: qy-w-1@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2024-12-23; 收到修改稿日期: 2025-04-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-26

and Hydropower Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objective】Soil aggregates are the basic units of soil structure, and soil organic carbon (SOC) is the core of soil fertility. However, the effect of freeze-thaw on soil aggregate stability and SOC characteristics in black soils and the influencing factors remain timidly understood. Thus, this study utilized the rare earth element tracer technology to investigate the turnover path of soil aggregates and the quantitative characterization of SOC under freeze-thaw action through indoor experiments. 【Method】Black soils of cultivated and forest lands of Heshan Farm, Nenjiang City, Heilongjiang Province were used for this study. The experiments were set up considering several freeze-thaw cycles of 0, 3, 6, 10, 15, and 25 through indoor cultivation. Also, the dry and wet cycle method was used to label the soil aggregates with different grain sizes (5-2 mm, 2-0.25 mm, 0.25-0.053 mm, and < 0.053 mm) while the rare earth element concentration was determined by Na_2O_2 alkali fusion method. In addition, the aggregate turnover processes, the changes in soil aggregate stability (Mean weight diameter, MWD), particle size distribution, aggregate turnover paths, and SOC under freeze-thaw cycling were evaluated at the different cycles. 【Result】The results showed that the freeze-thaw cycle accelerated the transition between neighboring aggregates, which led to a more drastic transition from aggregates of various particle sizes to those of 2-0.053 mm. With the increase in the number of freeze-thaw cycles, the MWD and 5-2 mm aggregate content decreased gradually while the 2-0.053 mm aggregate content increased gradually. The turnover time of soil aggregates increased with the increase in the number of freeze-thaw cycles, and the increase of 0.25-0.053 mm aggregates was the most significant. There was no significant change in the SOC content of the whole soil after freeze-thaw treatment. However, as the number of freeze-thaw cycles increased, the SOC content of 5-2 mm aggregates increased, and the SOC content of aggregates of other particle sizes decreased. 【Conclusion】Therefore, the freezing and thawing effect affects the intrinsic process of soil structure dynamics by intensifying the destruction and formation of soil aggregates in the turnover process, reducing the stability of soil structure and changing the SOC content. The results of the study further revealed the microstructural evolution characteristics of the black soil under freeze-thaw action and its quantitative characterization of SOC, thus, providing a theoretical basis for the in-depth study of the turnover of black soil aggregates of various grain sizes and soil structure changes under freeze-thaw erosion.

Key words: Rare earth element(REE); Black soil; Aggregate stability; Soil organic carbon(SOC); Freeze-thaw cycles; Turnover pathways

冻融侵蚀是中国第三大土壤侵蚀类型, 主要分布在我国青藏高原地区、东北地区和西北高原, 主要通过季节性和昼夜气温差异使土壤冻胀破坏以及融雪水形成径流侵蚀等方式剥蚀表土、损坏耕地、降低土地生产力, 进而危害可持续农业的发展^[1]。东北黑土区纬度较高, 冻融循环现象明显, 加之土壤结构在长期高强度的农业利用方式下进一步变差^[2], 耕层土壤有机质流失, 土地生产力下降, 对地区发展产生了极大影响^[3]。土壤团聚体是土壤颗粒自然形成的粒状或小块状结构, 参与土壤剥蚀、搬运、水分入渗和结皮等土壤侵蚀的全过程, 是预测土壤抗侵蚀能力和土壤水分流失的重要指标^[3-4]。土壤有机碳 (SOC) 是土壤肥力的核心, 是维持作物产量、保持土地经济可持续发展的决定性因素。土壤团聚体的形成、破碎及周转过程受多种因素影

响, 包括土壤类型、水分条件、温度变化、有机质含量以及微生物活动等。在适宜的条件下, 土壤颗粒通过有机质和矿物质的胶结作用形成团聚体, 该过程有助于提高土壤的稳定性和抗侵蚀能力。然而, 在冻融循环等极端条件下, 团聚体容易因冰晶的膨胀和收缩作用而破碎, 导致土壤结构破坏和有机碳的流失。大量研究表明, 团聚体的形成破碎过程与有机碳的固存密切相关^[5-6]。例如, Six 等^[6]认为, 土壤团聚体形成需要很多胶结物质, 而有机碳在其中占重要地位。土壤团聚体的形成与稳定可通过改变团聚体粒径分布和有机碳类型来实现。因此, 土壤团聚体的周转和有机碳的定量研究对阻控土地退化、提升耕地质量具有重要意义。目前学者们对冻融侵蚀的研究多聚焦在侵蚀对土壤理化性质^[7-8]、团聚体微观结构与稳定性^[9-11]、微生物^[12-14]等方面

影响与变化,而冻融作用下土壤团聚体的周转过程以及有机碳的定量表征方面尚需深入研究。

稀土元素 (Rare earth element, REE) 是指镧系元素和钪、钇这 17 种元素的总称,具有惰性,它们的低背景浓度和高可探测性使它们易于跟踪^[15-16],而且在迁移能力弱的前提下对生态环境无危害,常用来研究土壤侵蚀过程侵蚀特征的时空变化等^[17-19],并取得许多重要成果,为揭示土壤侵蚀机制和团聚体动态变化提供了新的视角。例如,研究^[19-23]表明,稀土元素可有效标记不同粒径的土壤团聚体,从而追踪其在降雨侵蚀、细沟侵蚀和溅蚀等过程中的迁移和破碎行为。通过示踪技术,揭示了坡面侵蚀过程中团聚体的动态变化规律^[17],发现细沟侵蚀中坡面不同坡位的侵蚀量存在显著差异,且团聚体的破碎和迁移主要集中在水流集中的区域^[18]。此外,室内培养和干湿循环实验表明,REE 示踪技术能够定量表征原位土壤团聚体的周转率变化趋势,为理解团聚体稳定性及其与有机碳的关系提供了重要依据^[20-23]。在溅蚀研究中,REE 示踪技术揭示了团聚体破碎与泥沙迁移之间的内在联系,表明团聚体的破碎是泥沙迁移的重要驱动力之一^[22-23]。然而,尽管 REE 示踪技术在团聚体研究中取得了诸多成果,但仍存在一些问题和挑战,如土壤因素影响示踪准确性、单一技术难以全面揭示团聚体动态机制、大尺度田间研究应用有限等。

综上,本文利用 REE 示踪技术,通过室内模拟冻融侵蚀过程中土壤团聚体变化,定量分析各粒径团聚体之间的形成和破碎,研究其周转路径,同时测定土壤团聚体中有机碳的变化,分析侵蚀对有机碳指标含量的影响。通过探究黑土土壤团聚体粒径分布和土壤有机碳含量在不同冻融循环次数下的变化,明确团聚体迁移规律及其对土壤结构稳定性的影响,探索团聚体周转与土壤侵蚀强度的定量关系,解析土壤结构动态变化的内在过程,量化各粒径团聚体周转路径,为深入研究冻融作用下黑土土壤内在结构的动态变化以及黑土区土地退化机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验所用土样采自黑龙江省嫩江市鹤山农场

(49°00'50"N, 125°19'05"E),研究区海拔 310~390 m,地表起伏不大,坡长坡缓,平原面积较小,地貌以冲积湖积平原丘陵和山前洪积台地为主。区域气候为寒温带大陆性季风气候,年均降水量在 500~600 mm,集中在夏季。全年最高温度 36 ℃左右,最低温度-38 ℃左右,无霜期约 115 d。每年 11 月初至次年 5 月中下旬常发生季节性冻层,发育深度约为 160~230 cm。

东北黑土区是典型的旱地农作物生产区,种植作物主要包括大豆、小麦、玉米等,实验选用耕地和自然林地两种土地利用方式的黑土为研究对象,野外采样时用环刀采集表层 0~20 cm 原状土。土样采集完成后在实验室进行土壤容重和田间持水量的测定。所有散土样剔去石块、根系等杂质后于室温下风干,将所有松散的土壤样品通过 5 mm 的筛子,分析土壤的基本物理和化学性质。采用土壤基本物理化学性质的常规测定方法^[24]:环刀法测量土壤容重;吸管法测定土壤机械组成;重铬酸钾—外加热法测定土壤有机碳;电位法测定按照土水质量比为 1:2.5 的 pH 计测定土壤 pH。采用干筛法分析土壤团聚体。在土样干筛分级时,按照土壤团聚体粒径大小分为大团聚体 (5~2 mm, A)、小团聚体 (2~0.25 mm, B)、微团聚体 (0.25~0.053 mm, C) 以及粉黏粒部分 (<0.053 mm, D) 共 4 个部分,并获得耕地和林地各粒径团聚体所占比例,耕地为 254.4 g·kg⁻¹、639.4 g·kg⁻¹、91.8 g·kg⁻¹ 和 14.4 g·kg⁻¹,林地为 90.9 g·kg⁻¹、750.2 g·kg⁻¹、138.2 g·kg⁻¹ 和 20.7 g·kg⁻¹。

1.2 室内冻融循环实验

室内冻融循环实验在华中农业大学环工基地降雨大厅进行。结合研究区域冻融期温度数据,设置冻结温度为-20 ℃,解冻温度为 6 ℃。根据聚氯乙烯 (PVC) 环刀的直径和高度计算出需称量的土壤质量,按照原土壤粒径占比称取标记后的各粒径,将各粒径混匀,装入底部有滤纸的 PVC 环刀 (直径 5 cm, 高 5 cm),滴管加入水分使含水量保持为田间持水量的 60%,随后用保鲜膜覆盖,用针头在保鲜膜上扎小孔保持通气。将 PVC 土柱静置以平衡水分 2 h 后,先模拟冻结条件,将样品放置于-20 ℃冰柜 12 h,然后放置在 6 ℃下 12 h 模拟解冻条件,24 h 为一次冻融循环。进行培养的 PVC 土柱共 12 个,代表 6 组不同冻融循环处理重复两次,循环次

表 1 实验土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of experimental soil

| 土地利用方式 Land use patterns | 平均重量直径 MWD/mm | 容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³) | 田间持水量 Field moisture capacity/% | 机械组成 | | | 有机碳 SOC / (g·kg ⁻¹) | pH | | |
|-----------------------------|------------------|---|---------------------------------------|---|------------|------------|-------------------------------------|-----------|--|--|
| | | | | Soil particle composition/ (g·kg ⁻¹) | | | | | | |
| | | | | 砂粒 Sand | 粉粒 Silt | 黏粒 Clay | | | | |
| 耕地 ^① | 2.52±0.16 | 1.31±0.05 | 28.53±1.68 | 55.4±1.20 | 593.4±1.00 | 351.2±0.80 | 29.72±0.89 | 5.56±0.10 | | |
| 林地 ^② | 2.95±0.03 | 1.17±0.10 | 31.31±3.74 | 101.4±1.00 | 617.8±1.50 | 280.8±1.00 | 35.27±1.21 | 5.49±0.04 | | |

注: 表中数据为均值±标准偏差。Note: Values are mean ± Standard deviation. ①Cultivated land, ②Forest land.

数分别为 0 次、3 次、6 次、10 次、15 次和 25 次(记为 FC0、FC3、FC6、FC10、FC15 和 FC25)。分别在样品循环次数对应天数时取样, 取样过程中每个土柱取 3 次重复样, 然后将所取土样转移至铝盒中放入 45 ℃烘箱烘干, 最后筛分粒径。

1.3 REE 的标记与测定方法

采用干湿循环标记法对土壤进行标记, 各粒径团聚体稀土氧化物的添加浓度均为 500 mg·kg⁻¹。先将土样干筛为四个粒径 (5~2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm) 团聚体, 记为 A、B、C、D, 分别用不同稀土元素对不同粒径进行标记, A、B、C、D 分别对应元素钕 (Nd)、钐 (Sm)、镧 (La)、钆 (Gd)。分别将各粒径团聚体均匀分布在塑料盆上, 用蒸馏水喷雾至含水量为 150 g·kg⁻¹, 然

后将定量称取的稀土元素氧化物粉末撒在潮湿的土壤上, 使用抹刀与团聚体轻轻混匀后将 REE 标记的团聚体在室温下风干 24 h, 并重复该湿-干程序 5 次, 将培养后土样置于 60 ℃烘箱烘干 24 h, 分别过对应粒径的筛, 得到标记试验土样, 保存约 15 g 的子样本, 每个子样本取两个重复样, 通过碱熔法处理后在等离子体质谱仪 (ICP-MS, Flexar LC-NexION 350X, 美国) 上测定, 以确定各标记粒径团聚体组分的初始 REE 浓度。按照原始土壤粒径分布配比土样进行实验。本研究选用四种稀土元素 Sm、La、Nd 和 Gd 的氧化物进行标记, 氧化物纯度均大于 99.99%。稀土氧化物的颗粒密度为 6.5~7.6 mg·m⁻³, 平均直径 (D50) 为 3.2~5.2 μm。稀土元素标记的背景浓度如表 2。

表 2 稀土元素 (REE) 的背景浓度及标记浓度

Table 2 Background concentration and labeling concentration of rare earth element (REE)

| 土地利用方式 Land use patterns | REE 背景浓度 | | | | REE 标记浓度 | | | |
|--------------------------------|--|------------|-----------|------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | Background concentration / (mg·kg ⁻¹) | | | | Labeling concentration / (mg·kg ⁻¹) | | | |
| | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 耕地 ^① | 5.77±0.48 | 26.25±0.03 | 6.33±0.67 | 28.94±0.41 | 335.50±1.22 | 424.43±2.01 | 422.89±0.99 | 336.59±0.83 |
| 林地 ^② | 21.55±0.22 | 8.38±1.00 | 5.67±0.88 | 29.93±0.77 | 317.43±1.03 | 367.15±1.77 | 243.60±1.45 | 408.64±1.25 |

注: 表中 A、B、C 和 D 分别表示大团聚体 (5~2 mm)、小团聚体 (2~0.25 mm)、微团聚体 (0.25~0.053 mm) 和黏粉粒 (<0.053 mm)。稀土元素的测定采用 Na₂O₂ 碱熔法^[25], 每个样品分别取 2 次土样进行测样配制, 作为重复。表中数据为均值±标准偏差。Note: In the table, A, B, C and D denote large aggregates (5~2 mm), small aggregates (2~0.25 mm), microaggregates (0.25~0.053 mm) and sticky powder particles (<0.053 mm), respectively. Rare earth elements were determined by the Na₂O₂ alkali fusion method^[25], and each sample was prepared by taking 2 soil samples for measurement as replicates, respectively. Data in the table are mean ± standard deviation. ①Cultivated land, ②Forest land.

1.4 基础参数计算

团聚体稳定性评价的指标选取平均重量直径 (MWD), MWD 值越大, 代表土壤团聚体越稳定。

$$MWD = \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times w_i \quad (1)$$

式中, MWD 为平均重量直径, mm; w_i 为第 i 个筛

子的破碎团聚体质量百分比, %; r_i 为第 i 个筛子孔径, mm; $r_0=r_1$, $r_n=r_{n+1}$ 。

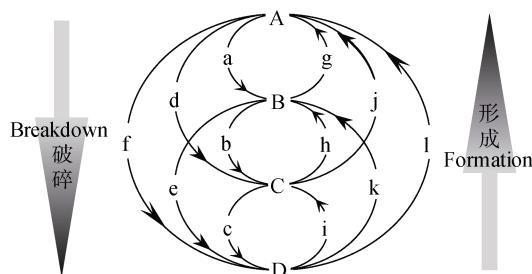
$$\text{土壤有机碳/} \frac{c \times 5}{V_0} \times (V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1000 \quad (2)$$

$$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad m \times k$$

式中, c 代表 $0.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($1/6\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 标准溶液的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V_0 指代空白样品滴定时消耗的 FeSO_4 体积, mL; k 为风干土换算成烘干土的系数; V 为样品滴定时消耗的 FeSO_4 体积, mL; m 为风干土样质量, g。

1.5 土壤团聚体周转路径参数计算

对于团聚体周转路径及其周转时间的计算, 本研究采用的方法涉及离散变换矩阵, 主要参照 Peng 等^[16]关于 REE 示踪计算团聚体周转速率的方法, 干筛得到的 4 种示踪粒径的团聚体分别为大团聚体、小团聚体、微团聚体和粉黏粒, 记作 A ($5 \sim 2 \text{ mm}$)、B ($2 \sim 0.25 \text{ mm}$)、C ($0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$) 和 D ($< 0.053 \text{ mm}$) 粒级。如图 1 所示, A、B、C、D 四种团聚体存在 a~f 的 6 种破碎路径和 g~l 的 6 种形成路径。5~2 mm 团聚体破碎形成 2~0.25 mm 团聚体记为 A→B。



注: A、B、C 和 D 分别表示大团聚体 ($5 \sim 2 \text{ mm}$)、小团聚体 ($2 \sim 0.25 \text{ mm}$)、微团聚体 ($0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$) 和黏粉粒 ($< 0.053 \text{ mm}$), 字母 a~l 的分别表示团聚体的周转路径。下同。Note: A, B, C and D denote large aggregates ($5 \sim 2 \text{ mm}$), small aggregates ($2 \sim 0.25 \text{ mm}$), microaggregates ($0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$) and sticky powder particles ($< 0.053 \text{ mm}$), respectively, and the letters a-l denote the turnover paths of the aggregates, respectively. The same below.

图 1 团聚体周转示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aggregate turnover

离散变换矩阵 $\mathbf{K}(t_2-t_1)$ 是时间 t_1 至时间 t_2 各团聚体之间的周转变化, 代表 A、B、C 或 D 从 t_1 至 t_2 时间内的质量百分比的变化:

$$\mathbf{K}(t_2-t_1) = \begin{bmatrix} 1-a-d-f & g & j & l \\ a & 1-g-b-e & h & k \\ d & b & 1-j-h-k & i \\ f & e & c & 1-l-k-i \end{bmatrix} \quad (3)$$

t_1 至 t_2 培养期间在团聚体破碎 (B) 或形成 (F) 上, 可用下列公式计算各粒径组分的质量百分比变化:

$$B_A = a_{t_2} - a_{t_1} + d_{t_2} - d_{t_1} + (f_{t_2} - f_{t_1}) \quad (4)$$

$$B_B = b_{t_2} - b_{t_1} + e_{t_2} - e_{t_1} \quad (5)$$

$$B_C = c_{t_2} - c_{t_1} \quad (6)$$

$$F_A = \frac{g_{t_2} - g_{t_1} \times m_B + j_{t_2} - j_{t_1} \times m_C + l_{t_2} - l_{t_1} \times m_D}{m_A} \quad (7)$$

$$F_B = \frac{h_{t_2} - h_{t_1} \times m_C + k_{t_2} - k_{t_1} \times m_D}{m_B} \quad (8)$$

$$F_C = \frac{i_{t_2} - i_{t_1} \times m_D}{m_C} \quad (9)$$

式中, A、B、C 和 D 的初始质量分别用 m_A 、 m_B 、 m_C 和 m_D 表示。根据图 1 和离散变换矩阵 \mathbf{K} , t 培养时期团聚体的周转率用字母 $a_t \sim l_t$ 表示。相对于初始条件, 正值 ($F > 0$) 表示在形成方向上团聚体累积量更多, 负值 ($B < 0$) 表示在破碎方向上团聚体破碎量更多。

各粒径团聚体从 t_1 至 t_2 时间内的周转时间分别用 T_{iA} 、 T_{iB} 、 T_{iC} 和 T_{iD} 表示, 对应的周转速率分别用 T_{rA} 、 T_{rB} 、 T_{rC} 和 T_{rD} 表示, 通过计算周转量与时间的差值求得, 周转时间为周转率的倒数, 以 A 为例:

$$T_{rA} = \frac{|a_{t_1} + d_{t_1} + f_{t_1} - (a_{t_2} + d_{t_2} + f_{t_2})|}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

$$T_{iA} = 1/T_{rA} \quad (11)$$

1.6 数据处理

使用 Excel 2018 进行数据整理和初步计算, 用

单因素方差分析和邓肯 (Duncan) 法进行数据的显著性检验。绘图软件为 Origin 2025, 分析软件为 SPSS 27.0。图表数据为平均值±标准偏差。

2 结 果

2.1 REE 标记可行性

土壤团聚体预测值即各时段各粒径团聚体的理论值, 实测值则为实验过程中土样烘干称重后得到的数据。REE 示踪效果通过实测值与预测值之间的线性相关程度反映, 两者越接近则该示踪方法在试验中的准确性和可行性越高。如图 2 所示, 决定系数 $R^2=0.994>0.9$, 可知实验数据准确度高, 预测值与实测值间的线性相关关系很好, 说明通过 REE 示踪法能够准确预测土壤团聚体的含量变化, REE 示踪技术在本实验的可行性非常高。

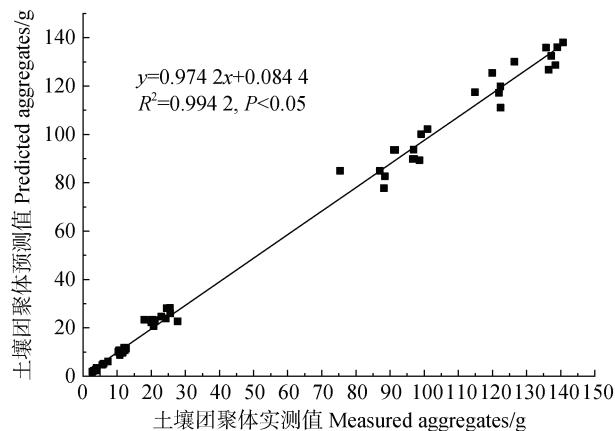


图 2 冻融作用后土壤团聚体预测值与实测值的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of predicted and measured soil aggregates after freeze-thaw action

2.2 不同冻融循环下土壤团聚体的 MWD 和粒径分布

由表 3 可知, 随着冻融次数的增加, 耕地和林地的 MWD 均先减少后增加的趋势, 但在整体上逐渐减少 ($P<0.05$)。耕地在 FC3、FC6、FC10 和 FC15 时 MWD 分别降低了 2.4%、1.0%、8.2% 和 5.2%, 林地在 FC3、FC6 和 FC10 时 MWD 分别降低了 3.2%、2.0% 和 1.8%, 耕地在 FC15 后 MWD 开始增加, 林地则是 FC10 后。耕地的 MWD 均高于林地, 且减小趋势较林地更显著 ($P<0.05$)。

观察图 3 各粒径分布的变化可以发现随着冻融循环次数的增加, 不同粒径团聚体的质量百分比呈现出显著的变化规律。总体而言, 5~2 mm 和小于 0.053 mm 团聚体质量百分比表现为先减小后增加的趋势, 而 2~0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体则呈现先增加后减小的趋势 ($P<0.05$)。其中, 小于 0.053 mm 团聚体的变化最为显著 ($P<0.05$), 其次是 5~2 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体, 而 2~0.25 mm 团聚体的变化相对较小。具体而言, 小于 0.053 mm 团聚体的变化趋势更为显著 ($P<0.05$), 耕地和林地随着冻融循环次数的增加团聚体质量百分比含量显著降低, 耕地在 FC15 时降幅最大 (降低了 34.0%), 林地在 FC10 时降幅最大 (降低了 47.9%), 两种土壤在最大降幅后团聚体百分比含量均有所增加; 5~2 mm 团聚体在冻融循环过程中表现出明显的降低趋势 ($P<0.05$), 耕地和林地在 FC10 时降低幅度最大, 分别减少了 17.1% 和 30.0%, 耕地在 FC15 时达到最小值 (17.8%), 林地在 FC10 时达到最小值 (50.0%); 对于 2~0.25 mm 团聚体, 耕地和林地在冻融循环初期均开始增加, 耕地在 FC10

表 3 不同冻融循环下土壤的平均重量直径

Table 3 Mean weight diameter of soil under different freeze-thaw cycles/mm

| 土地利用方式 Land use patterns | FC0 | FC3 | FC6 | FC10 | FC15 | FC25 |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 耕地 ^① | 1.63±0.00Aa | 1.59±0.01Ab | 1.58±0.01Ac | 1.45±0.00Ad | 1.37±0.01Af | 1.39±0.02Ae |
| 林地 ^② | 1.21±0.02Ba | 1.17±0.00Bb | 1.15±0.09Bc | 1.13±0.00Be | 1.14±0.01Bd | 1.12±0.00Be |

注: FC0、FC3、FC6、FC10、FC15 和 FC25 分别表示冻融循环次数 0、3、6、10、15 和 25 次。同列不同大写字母表示同一冻融循环次数下不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$), 同行不同小写字母表示同一土地利用方式下不同冻融循环次数间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: FC0, FC3, FC6, FC10, FC15, and FC25 denote the number of freeze-thaw cycles 0, 3, 6, 10, 15, and 25, respectively. Different capital letters in the same column indicate significant ($P<0.05$) differences between different land uses for the same number of freeze-thaw cycles, and different lowercase letters in the same line indicate significant ($P<0.05$) differences between different numbers of freeze-thaw cycles for the same land use. The same below. ①Cultivated land, ②Forest land.

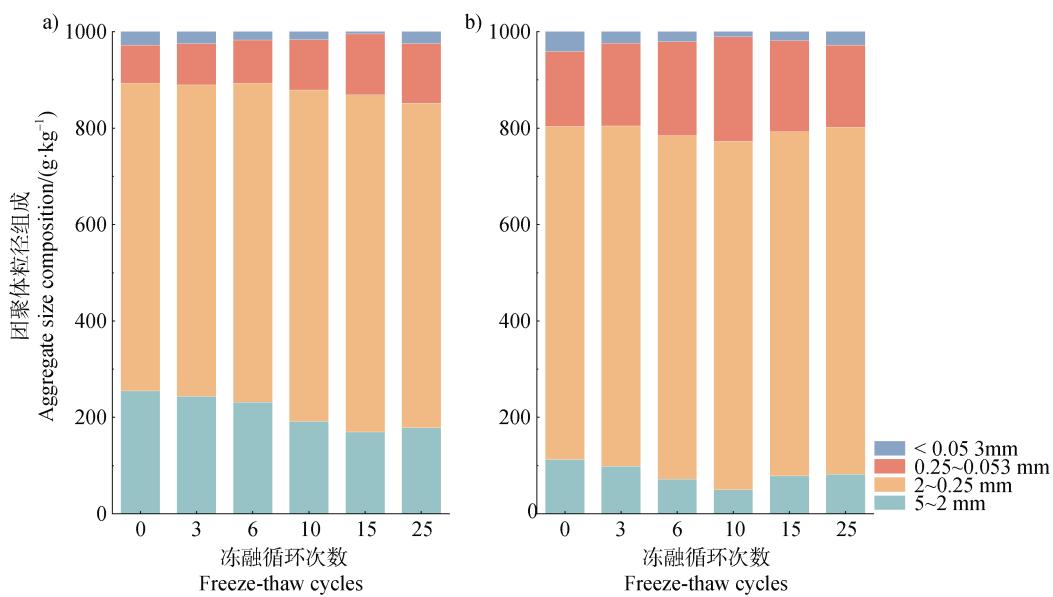


图3 不同冻融循环下土壤团聚体粒径分布 (a.耕地, b.林地)

Fig. 3 Particle size distribution of soil aggregates under different freeze-thaw cycles (a. Cultivated land b. Forest land)

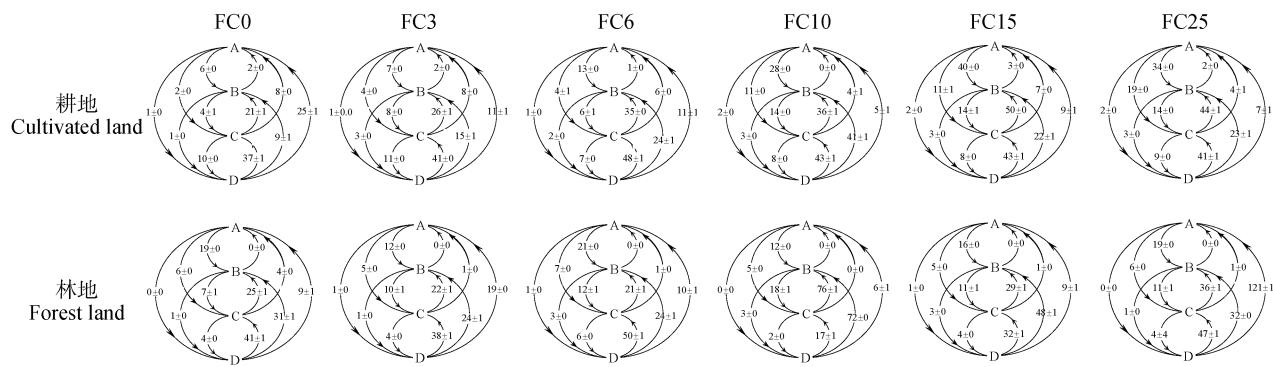
时增幅最大(增加了4.0%),林地在FC3时增幅最大(增加了2.1%),然而,随着冻融循环次数的进一步增加,2~0.25 mm团聚体的质量百分比逐渐下降;0.25~0.053 mm团聚体在冻融循环过程中呈现先增加后减小的趋势,耕地在FC15时降幅最大(降低了21.1%),林地在FC6降幅最大(降低了13.3%);在不同粒径团聚体质量百分比变化过程中耕地和林地均存在一个拐点(耕地为FC15,林地为FC10)。此外,在土壤粒径组成方面,耕地团聚体粒径从大到小所占比例分别为17.0%~25.5%、63.8%~70.0%、8.0%~12.6%和1.6%~2.7%,林地为5.0%~11.2%、69.2%~72.3%、15.5%~21.7%和1.1%~4.1%。综上,冻融循环显著降低了5~2 mm团聚体和小于0.053 mm团聚体的质量百分比,增加了2~0.053 mm团聚体的质量百分比,同时,随冻融循环次数的增加MWD逐渐降低。对于同一冻融循环时,林地的粒径分布和MWD的变化更剧烈。

2.3 不同冻融循环下土壤团聚体的周转路径与周转率

分析图4可知,冻融循环作用加剧了多数处理中相邻团聚体之间的转换。冻融循环促进了2~0.053 mm团聚体的团聚,有利于小团聚体的形成以及加剧了5~2 mm团聚体的破碎。随着冻融循环次数的增加,5~2 mm团聚体的破碎率缓慢增加,而形成率逐渐降低($P<0.05$);2~0.25 mm团聚体的

破碎率和形成率均增加,但其形成率的增幅更大、更显著($P<0.05$),且形成率远大于破碎率;0.25~0.053 mm团聚体形成率和破碎率均逐渐增加,但形成率的增幅和数值均大于破碎率($P<0.05$);小于0.053 mm团聚体转化为大团聚体的速率在数值上远大于该团聚体形成率的数值,而小于0.053 mm团聚体的形成率变化不显著。在冻融循环过程中,各粒径形成率和破碎率的大小分别为:B>C>A>D、D>C>A>B,且2~0.25 mm和0.25~0.053 mm团聚体的形成率远大于破碎率,因此,在冻融循环过程中各粒径团聚体有向2~0.053 mm团聚体粒径转化的趋势,尤其是向2~0.25 mm团聚体的转化。对于不同土地利用类型而言,耕地5~2 mm团聚体的破碎率高于林地,而形成率略低于林地;林地0.25~0.053 mm团聚体的形成率和破碎量均高于耕地。例如,林地小于0.053 mm团聚体转化形成0.25~0.053 mm团聚体(D→C)最高可达77.6%,最低为54.3%,而耕地D→C最高为52.8%,低于林地的最低值。

结合不同粒径团聚体周转率(表4),随着冻融循环次数的增加,各粒径团聚体的周转率逐渐减小,周转时间逐渐增大($P<0.01$)。同时,对比分析得知,小于0.053 mm团聚体周转率最小,周转时间最长,2~0.25 mm团聚体周转率最大,周转时间最短。此外,由表中数据可以明显看出,对于0.25~0.053 mm团聚体,耕地的周转率高于林地的周转率。



注: 箭头表示团聚体迁移方向, 数值代表团聚体变化率, 单位为%。Note: The arrows indicate the direction of aggregate migration and the values represent the rate of aggregate change in %.

图 4 不同冻融循环下的土壤团聚体周转示意图

Fig. 4 Schematic diagram of soil aggregate turnover under different freeze-thaw cycles

表 4 各粒径团聚体周转率和周转时间

Table 4 Turnover rate and turnover time of aggregates by particle size

| 土地利用方式 Land use patterns | 粒径 Particle size | 周转率 Turnover rate / % | | | | | 周转时间 Turnover times / d | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | | FC3 | FC6 | FC10 | FC15 | FC25 | FC3 | FC6 | FC10 | FC15 | FC25 |
| 耕地 Cultivated land | 5~2 mm | 1.279Ca | 1.695Bd | 2.718Ae | 3.076Ab | 1.552Ac | 78Be | 59Cb | 37Da | 33Dd | 64Cc |
| | 2~0.25 mm | 1.991Ba | 0.408Dd | 0.335De | 0.915Cb | 0.524Cc | 50Ce | 245Ab | 299Aa | 109Bd | 191Bc |
| | 0.25~0.053 mm | 4.321Aa | 3.185Ab | 1.550Cd | 2.433Bc | 1.099Be | 23Db | 31Bb | 65Ba | 41Ca | 91Ca |
| | <0.053 mm | 1.028Db | 0.570Cc | 1.884Ba | 0.202Dd | 0.090De | 97Ad | 175Dc | 53Ce | 495Ab | 1116Aa |
| 林地 Forest land | 5~2 mm | 2.628Ac | 1.041Cb | 0.787Da | 0.556Ad | 0.068De | 38Dc | 96Bd | 127Ab | 180Cb | 1468Aa |
| | 2~0.25 mm | 1.032Dc | 1.155Ab | 1.209Ca | 0.376Cd | 0.151Ce | 97Ac | 87Dd | 83Bd | 266Ba | 662Bb |
| | 0.25~0.053 mm | 1.952Bb | 0.812Dc | 4.677Aa | 0.147De | 0.335Bd | 51Cd | 123Ac | 21De | 683Aa | 299Cb |
| | <0.053 mm | 1.441Ca | 1.056Bc | 1.375Bb | 0.535Bd | 0.378Ae | 69Be | 95Cc | 73Cd | 187Cb | 265Ca |

注: 同列不同大写字母表示同一冻融循环次数下不同粒径间差异显著 ($P<0.05$), 同行不同小写字母表示同一粒径下不同冻融循环次数间差异显著 ($P<0.05$)。Note: Different capital letters in the same column indicate significant ($P<0.05$) differences between different particle size for the same number of freeze-thaw cycles, and different lowercase letters in the same line indicate significant ($P<0.05$) differences between different numbers of freeze-thaw cycles for the same particle size.

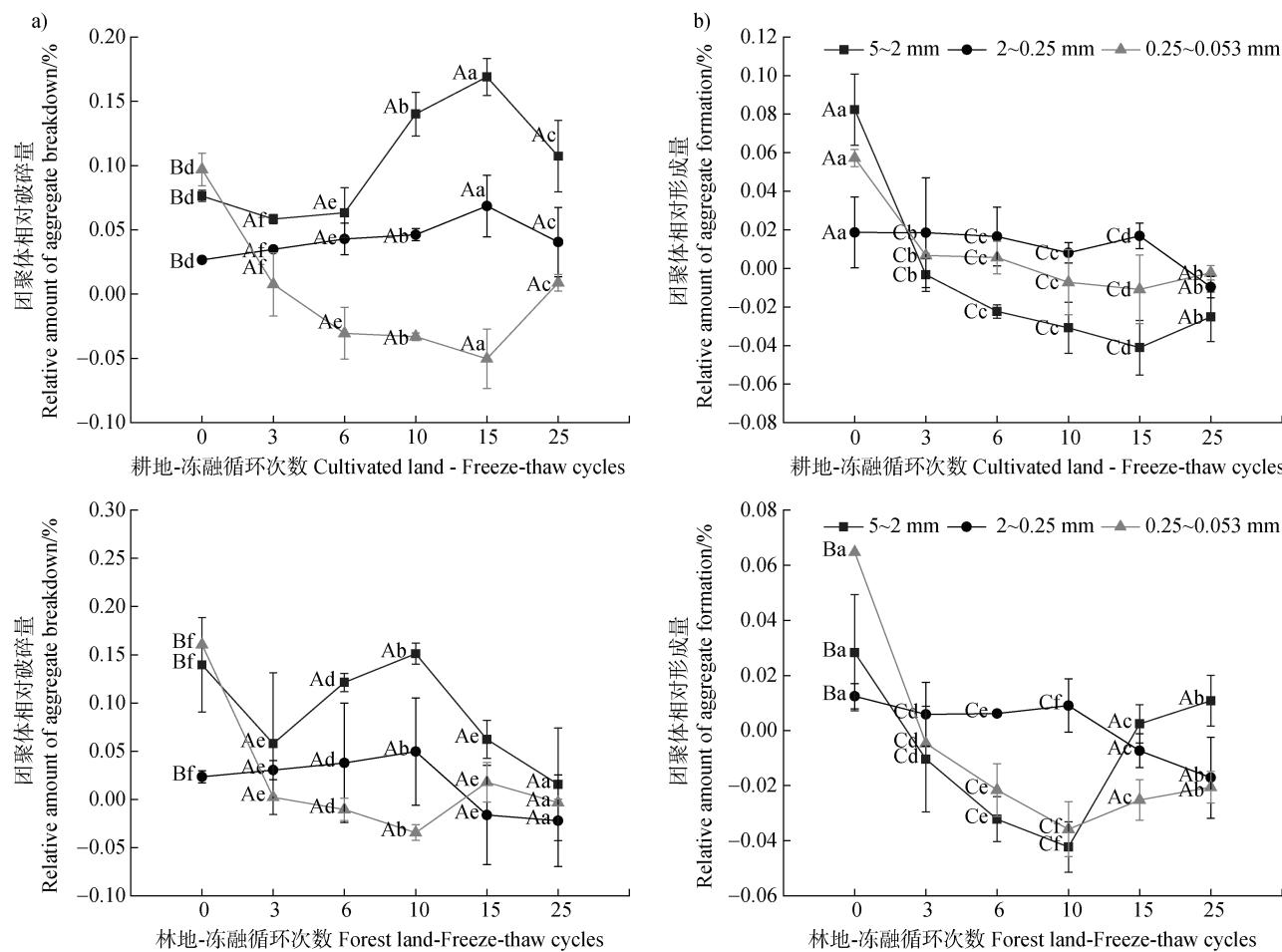
2.4 不同冻融循环下土壤团聚体的相对形成量与相对破碎量

图 5 显示了团聚体在破碎和形成方向上的相对变化量。就破碎方向 (图 5a) 而言, 正值表示与初始状态相比, 团聚体破碎程度更高, 而负值则表明破碎程度较低; 就形成方向 (图 5b) 而言, 正值表示与初始状态相比, 团聚体的形成量增加, 而负值则表明团聚体发生破碎。在破碎方向 (图 5a) 上, 随着循环次数的增加, 5~0.25 mm 团聚体先增加后减小, 整体呈增加趋势, 而 0.25~0.053 mm 团聚体先减小后增加, 整体呈减小趋势 ($P<0.01$)。5~2 mm

团聚体相对破碎量均在正值范围内波动, 除林地 FC25 (0.02%) 外其余均大于 0.05%, 破碎程度较大。2~0.25 mm 团聚体的相对形成量从 FC0 开始在正值范围内缓慢增加, 在冻融后期会显著降低, 林地降至负值 (FC15 为 -0.02%), 数值整体为正值, 耕地则在 FC15 出现最大值 (0.07%)。0.25~0.053 mm 团聚体的相对破碎量在冻融过程中显著减小 ($P<0.01$), 在冻融后期会有小幅度增加, FC3 至 FC15 均为负值, 且最大值的绝对值小于 0.05%, 破碎程度较小。在形成 (图 5b) 上, 随着冻融次数的增加各粒径团聚体相对形成量先减小后增加, 总体呈减

小趋势 ($P<0.01$)。5~2 mm 团聚体先减小后增加, 变化极显著 ($P<0.01$), 且团聚体相对形成量除 FC0 外均为负值, 表明该团聚体以破碎为主; 2~0.25 mm 团聚体在冻融循环过程中先减小后增加再减小, 冻融后期降幅较大, 团聚体的相对形成量多为正值, 变化显著 ($P<0.05$); 0.25~0.053 mm 团聚体相对形成量逐渐较小, 随着冻融循环次数增加降幅逐渐减

小。无论是破碎方向还是形成方向, 耕地的转折点在 FC15, 林地为 FC10。综合分析, 冻融循环加剧了大团聚体的破碎, 促进了 2~0.053 mm 团聚体的团聚。此外, 对不同土壤类型而言, 林地各粒径团聚体的相对形成量和相对破碎量的整体变化幅度均大于耕地, 表明林地在冻融循环中团聚体周转过程更剧烈 ($P<0.05$)。



注: 显著性字母标记中大写字母表示同一冻融循环次数下不同粒径的显著性分析 ($P<0.05$), 小写字母表示对同一粒径下不同冻融循环次数的显著性分析 ($P<0.05$)。Note: Upper case letters in the significance letter markers indicate significance analyses for different particle sizes at the same number of freeze-thaw cycles ($P<0.05$), and lower case letters indicate significance analyses for different numbers of freeze-thaw cycles at the same particle size ($P<0.05$)。

图 5 土壤团聚体相对形成量和破碎量 (a. 形成方向, b. 破碎方向)

Fig. 5 Relative formation and fragmentation of soil aggregates (a. Direction of formation, b. Breaking direction)

2.5 不同冻融循环下有机碳的定量表征

由表 5 可知, 全土有机碳的含量随着冻融次数的增加变化不显著。耕地和林地的全土有机碳含量均呈波动式变化, 且每次的变化量很小, 耕地在第 4 次冻融循环时变化量最大, 减小量为 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

林地在 FC3 和 FC10, 变化量均为 $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。林地全土有机碳含量高于耕地, 且变化趋势较耕地更大。

各粒径有机碳含量随着冻融次数的变化不同。对图 6 分析可发现在一定范围内随冻融强度的增加, 5~2 mm 团聚体的有机碳含量整体呈增加趋势,

表 5 不同冻融循环下全土有机碳 (SOC) 含量的变化

Table 5 Changes in soil organic carbon (SOC) content before and after freeze-thaw/ (g·kg⁻¹)

| 土地利用方式 Land use patterns | FC0 | FC3 | FC6 | FC10 | FC15 | FC25 |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 耕地 ^① | 27.03±0.04Ad | 26.24±1.30Af | 27.20±1.88Ac | 27.42±2.28Ab | 26.96±0.96Ae | 27.54±1.70Aa |
| 林地 ^② | 33.55±1.79Bb | 32.13±2.36Bd | 32.72±0.69Bc | 34.14±0.84Ba | 34.12±1.39Ba | 33.68±2.03Ba |

注: 显著性字母标记中同列大写字母表示同一冻融循环次数下不同土地利用方式间的显著性分析 ($P<0.05$)。同行小写字母表示同一土地利用方式下不同冻融循环次数间的显著性分析 ($P<0.05$)。Note: Upper case letters in the same column in the significance letter marker indicate significance analysis between different land use patterns under the same number of freeze-thaw cycles ($P<0.05$) . Lowercase letters in the same line indicate significance analysis between different freeze-thaw cycles in the same land use pattern ($P<0.05$) . ① Cultivated land, ②Forest land.

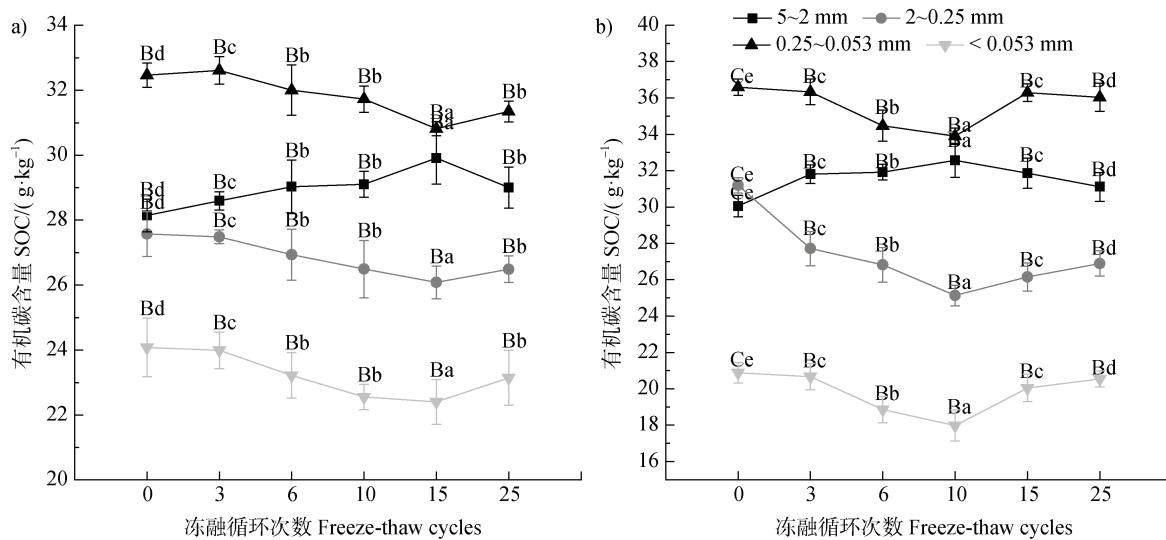


图 6 不同冻融循环下各粒径 SOC 含量的变化 (a.耕地, b.林地)

Fig. 6 Changes in SOC content of different particle sizes under freeze-thaw treatment (a. Cultivated land, b. Forest land)

其余团聚体呈显著减小趋势, 当冻融强度增加到一定程度后有机碳含量会达到最值, 然后其变化趋势发生改变。5~2 mm 团聚体先增加后减小, 耕地在 FC15 达到最高值 $29.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 林地在 FC10 达到最高值 $32.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和小于 0.053 mm 团聚体均先减小后增加, 耕地最小值在 FC15, 依次为 26.08 、 30.81 、 $22.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 林地最小值在 FC10, 依次为 25.13 、 33.90 、 $17.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外, 耕地和林地多数粒径团聚体的变化在第 3 次冻融循环实验变化不太明显。对于同一土地利用方式, 0.25~0.053 mm 团聚体有机碳含量最多, 其次为 5~2 mm 团聚体, 小于 0.053 mm 团聚体有机碳含量最少; 对于不同土地利用方式, 林地除小于 0.053 mm 团聚体外其余粒径有机碳含量均高于耕

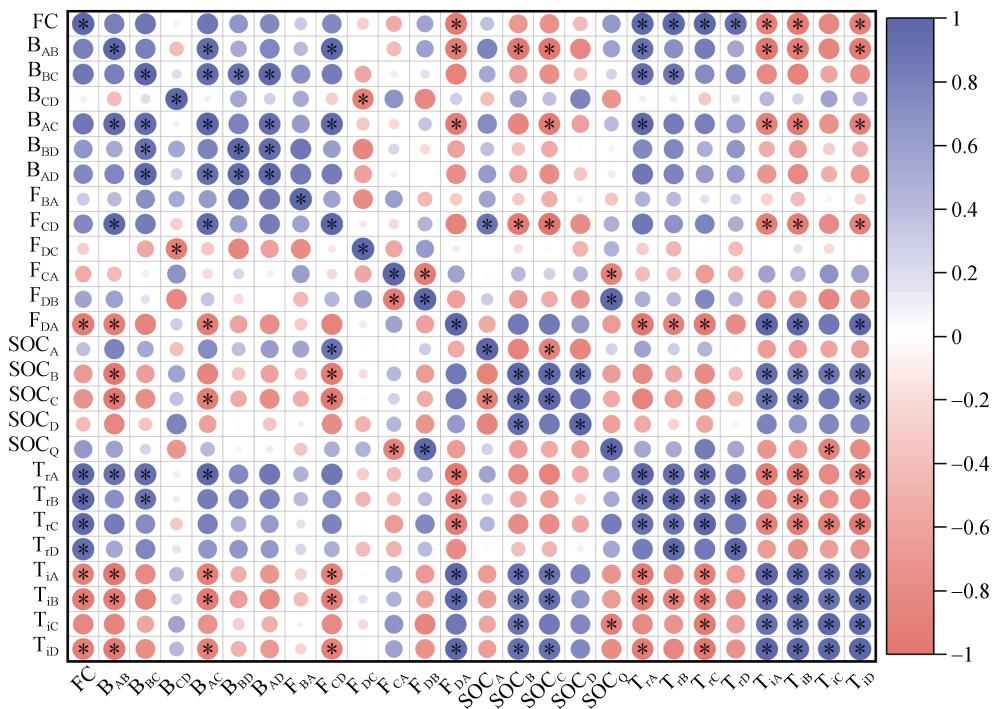
地, 且各粒径有机碳含量变化较耕地更显著。

2.6 不同冻融循环下土壤团聚体周转与有机碳的相关关系

如图 7 所示, 在冻融循环实验中有机碳含量与团聚体周转速率呈负相关 ($P<0.05$), 与团聚体周转时间呈正相关 ($P<0.05$)。5~2 mm 团聚体的有机碳含量与 5~2 mm 团聚体的破碎以及 0.25~0.053 mm 团聚体向 2~0.25 mm 团聚体的形成呈正相关, 尤其是团聚体的形成, 相关系数为 0.890, 与各粒径团聚体的周转时间呈负相关 ($P<0.05$); 2~0.053 mm 团聚体有机碳含量的变化不仅与 5~2 mm 团聚体向 2~0.053 mm 团聚体的破碎呈显著负相关, 还与 0.25~0.053 mm 团聚体向 2~0.25 mm 团聚体的形成呈负相关 ($P<0.05$), 与粉黏粒向大团聚

体的形成和各粒径的周转时间呈正相关 ($P<0.05$)，2~0.25 mm 团聚体对应的负相关系数分别为-0.966、-0.847 和-0.949, 0.25~0.053 mm 团聚体对应的负相关系数分别为-0.966、-0.925 和-0.996, 两者的正相关系数在 0.848~0.932；小于 0.053 mm 团聚体的有机碳含量与 5~2 mm 团聚体向 2~0.25 mm 团聚体的破碎和小于 0.053 mm 团聚体的形成呈负相关

($P<0.05$)，与各粒径的周转时间和 0.25~0.053 mm 向小于 0.053 mm 的破碎呈正相关 ($P<0.05$)；全土的有机碳含量与小团聚体向微团聚体的破碎、微团聚体向大团聚体的形成和微团聚体的周转时间呈负相关 ($P<0.05$)，相关系数在-0.905~-0.703，与微团聚体向小团聚体的形成和微团聚体的周转率呈正相关 ($P<0.05$)，相关系数分别为 0.972 和 0.829。



注： B_{AB} 、 B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{AC} 、 B_{BD} 和 B_{AD} 表示大粒径团聚体转化成小粒径团聚体的破碎量； F_{BA} 、 F_{CD} 、 F_{DC} 、 F_{CA} 、 F_{DB} 和 F_{DA} 表示小粒径团聚体转化成大粒径团聚体的形成量； SOC_A 、 SOC_B 、 SOC_C 、 SOC_D 和 SOC_Q 分别代表各粒径团聚体和全土的有机碳含量； T_{rA} 、 T_{rB} 、 T_{rC} 和 T_{rD} 代表各粒径团聚体的周转速率； T_{iA} 、 T_{iB} 、 T_{iC} 和 T_{iD} 代表各粒径团聚体的周转时间；**和*分别代表 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ ，相关性显著。Note: B_{AB} , B_{BC} , B_{CD} , B_{AC} , B_{BD} and B_{AD} represent the amount of breakage of large-size aggregates into small-size aggregates; F_{BA} , F_{CD} , F_{DC} , F_{CA} , F_{DB} and F_{DA} represent the amount of formation of small-sized aggregates into large-sized aggregates; SOC_A , SOC_B , SOC_C and SOC_D represent the organic carbon content of each size aggregate and whole soil, respectively; T_{rA} , T_{rB} , T_{rC} , and T_{rD} represent the turnover rate of each size aggregate; T_{iA} , T_{iB} , T_{iC} , and T_{iD} represent the turnover time of each size aggregate; and ** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively, and the correlation is significant.

图 7 不同冻融循环下土壤团聚体与有机碳的相关关系

Fig. 7 Correlation between soil aggregates and SOC under different freeze-thaw cycles

3 讨 论

3.1 冻融作用对土壤团聚体周转的影响

冻融循环通过冻结与融化使土壤内水分体积变化进而导致土壤结构的改变，这是冻融作用对土壤结构改变的本质。研究结果表明冻融循环使 2~0.053 mm 团聚体逐渐累积，加剧了 2~0.053 mm 团聚体的团聚与 5~2 mm 团聚体和小于 0.053 mm 的

破碎，同时使 MWD 逐渐降低（表 3），这与顾汪明^[11]关于冻融交替作用促进土壤大团聚体不断分解为小团聚体、MWD 减小等结论相似。5~2 mm 团聚体内部空隙大，在冻结作用下容易破碎成 2~0.053 mm 团聚体，尤其是 2~0.25 mm 团聚体，而小于 0.053 mm 团聚体由于表面能较高而更容易被重新组合或吸附至较大的团聚体上。各粒径团聚体质量百分数的变化趋势在冻融循环次数增大至一定

程度后发生变化(图3),这可能是此时冻融作用对团聚体稳定性的影响达到一定程度后(如耕地冻融15次,林地10次),土壤团聚体的破碎和形成趋于稳定,此时,各粒径团聚体的质量百分数变化趋于稳定。之后冻融作用对土壤团聚体的影响有所减弱。冻融循环过程中,土壤团聚体的周转时间大致在20~500 d之间(表4),高于Wang等^[26]得出的41~168 d,可能是因为本实验将5~2 mm团聚体定义为大团聚体,而Wang等^[26]的实验中大团聚体为大于1 mm的团聚体。

3.2 冻融作用对土壤团聚体有机碳的影响

经过冻融循环实验后,有机碳含量降低了2.43%~14.12%,但总体而言有机碳含量变化相对较小(表5),这与DeLuca等^[27]得出的冻融循环作用对土壤有机碳总量无显著影响、有机碳的总量处于相对稳定状态的结论一致。Martine等^[28]研究发现较大粒径团聚体在冻融过程中有机碳含量显著增加。在本研究中,冻融作用导致土壤团聚体破碎,释放出有机碳,这些有机碳通过水分迁移等被较大粒径团聚体吸附或包裹,从而导致5~2 mm团聚体有机碳含量增加(图6)。有减小趋势的部分粒径团聚体有机碳含量在FC3冻融循环时变化不显著(图6),可能是冻融作用初期土壤水分冻结和融化过程对土壤结构的影响较小,有机碳释放和迁移相对较少,其含量变化不显著。孙建波等^[29]认为冻融作用下有机碳主要分布在大团聚体和微团聚体中。实验结果(图6)表明5~2 mm和0.25~0.053 mm团聚体的有机碳含量较多,尤其是0.25~0.053 mm团聚体,因此本实验有机碳主要以微团聚体o的形式存在。

3.3 冻融作用下土壤团聚体的周转与有机碳变化的联系

实验结果(图7)表明各粒径有机碳变化趋势与团聚体周转过程密切相关,尤其是与大团聚体的破碎和小团聚体的形成以及周转时间紧密联系。Wiesmeier等^[30]发现微团聚体和有机碳物质结合形成大团聚体,而大团聚体破碎成较小团聚体和有机碳。Park等^[31]研究发现在冻融作用下土壤因团聚体破坏而释放出较多的有机物质。土壤有机碳是团聚体形成过程中重要的胶结物质^[6],有机碳通过其胶结作用,促进土壤颗粒的团聚,形成不同粒径的团聚体,这些团聚体通过物理阻隔,保护土壤有机碳

免受微生物的分解,从而增加有机碳的稳定性^[32]。荣慧等^[33]发现土壤团聚体的周转会影响有机碳的分布和稳定性。冻融作用通过改变团聚体的结构和组成,使得团聚体中的有机碳暴露和重新分配。此外,冻融作用还通过改变土壤的水热条件,影响土壤微生物的活性和有机碳的矿化分解速率,进而促进有机碳的迁移转化。这些过程共同决定了有机碳的含量和稳定性。

Gajić等^[34]研究发现土壤团聚体的稳定性受土壤有机碳含量、土壤类型和质地等多种因素影响。分析实验结果(图5,图6和表4)可知林地在冻融过程中周转过程更加剧烈,团聚体粒径分布、相对形成量和相对破碎量的整体变化趋势均较耕地显著。这可能是林地土壤有机质以特定形式存在,如以低分子量腐殖酸为主的有机质,这些有机质的胶结能力可能较弱,导致团聚体的稳定性相对较低^[35]。相比之下,耕地土壤中的有机质可能以更稳定的形式存在,如胡敏酸等高分子量腐殖酸,这些有机质具有更强的胶结能力,有助于维持团聚体的稳定性。

4 结 论

利用稀土元素示踪法和室内冻融循环试验,对冻融作用下土壤团聚体的周转过程和有机碳含量变化分析:(1)冻融侵蚀降低了土壤团聚体的稳定性,随着冻融作用的加强,团聚体平均重量直径减小。同时冻融作用使土壤团聚体周转过程更加剧烈,促进了5~2 mm团聚体的破碎和小于0.053 mm团聚体的聚集,主要表现为5~2 mm和小于0.053 mm团聚体逐渐向2~0.053 mm团聚体转化。此外土壤团聚体周转率与冻融时间和强度呈显著负相关。(2)冻融侵蚀对全土有机碳的影响不显著,但显著影响不同粒径团聚体的有机碳含量。随着冻融作用的增强,除5~2 mm团聚体有机碳逐渐增加外其余粒径团聚体有机碳含量减少。同时团聚体有机碳含量的变化与团聚体周转路径和周转时间显著相关。(3)与耕地相比,冻融作用对林地的影响更大。在冻融侵蚀下林地土壤团聚体的周转过程更剧烈,土壤有机碳含量变化的显著性更高。冻融侵蚀下土壤结构的研究对进一步解析土壤结构动态变化的内在过程,量化各粒径团聚体的周转路径具有重要意义,

为提升耕地质量和深入研究冻融侵蚀下土壤结构变化提供理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Progress and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (2): 1—12. [张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (2): 1—12.]
- [2] Wang J K, Xu X R, Pei J B, et al. Current status of arable land quality in the black soil region of Northeast China and the opportunities and challenges facing it[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (3): 695—701. [汪景宽, 徐香菇, 裴久渤, 等. 东北黑土地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52 (3): 695—701.]
- [3] Rahman M T, Liu S, Guo Z C, et al. Impacts of residue quality and N input on aggregate turnover using the combined ^{13}C natural abundance and rare earth oxides as tracers[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 110—122.
- [4] Li J Y, Yuan X L, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fan W, Wu J G, Li J M, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of Chernozem in Northeast China and maize yield therein [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 835—846. [范, 吴景贵, 李建明, 等. 稻秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 835—846.]
- [8] Zhang H O. Progress of research on the effects of alternating freezing and thawing on soil physicochemical properties[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41 (4): 33—36. [张海欧. 冻融交替作用对土壤理化性质的影响研究进展[J]. 农业与技术, 2021, 41 (4): 33—36.]
- [9] Zhang Z W, Zhao W J, Li Q, et al. Effects of top soil structure on runoff and sediment yield of red soil slope cropland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (2): 434—444. [张紫薇, 赵文俊, 李奇, 等. 表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61 (2): 434—444.]
- [10] Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1226—1230. [周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用X射线CT研究多尺度土壤结构[J]. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1226—1230.]
- [11] Gu W M. Study on the influence mechanism of freeze-thaw cycle on the stability of black soil agglomerate in Northeast China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. [顾汪明. 冻融循环对东北黑土团聚体稳定性影响机制的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.]
- [12] An X B, Zheng F L, Wang X S, et al. Effects of freezing and thawing on soil microbial nutrient limitation in sloping cropland in the black soil zone of Northeast China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 35 (10): 2744—2754. [安小兵, 郑粉莉, 王雪松, 等. 冻融作用对东北黑土区坡耕地土壤微生物养分限制的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (10): 2744—2754.]
- [13] Yang Q S, Yang W, Peng J, et al. Response of soil microbial diversity and community structure to erosion-deposition in slope farmland in typical black soil area of Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (6): 1741—1754. [杨青松, 杨伟, 彭珏, 等. 典型黑土区坡耕地土壤微生物多样性及群落结构对侵蚀-沉积的响应[J]. 土壤学报, 2024, 61 (6): 1741—1754.]
- [14] Hao Z Y, Shao Y X, Liu T, et al. Progress of carbon sequestering microorganisms in black soil of northeastern farmland[J]. *Microbiology Bulletin*, 2024, 51 (6): 1873—1886. [郝紫玉, 邵亚旭, 刘涛, 等. 东北农田黑土固碳微生物研究进展[J]. 微生物学通报, 2024, 51 (6): 1873—1886.]
- [15] Liu K, Ge Z, Xu Y D, et al. Response of black soil microbial communities to wet-dry alternation under different tillage practices[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 206—216. [刘奎, 葛壮, 徐英德, 等. 不同耕作方式下黑土微生物群落对干湿交替的响应[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 206—216.]
- [16] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, 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.
- [17] Ju T J, Liu P L. A REE tracer method to study the dynamics of slope erosion distribution[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2005, 19 (1): 58—61. [琚彤军, 刘普灵. 坡面侵蚀分布特征动态变化过程的REE示踪法研究[J]. 核农学报, 2005, 19 (1): 58—61.]
- [18] Li M, Li Z B, Ding W F, et al. REE tracing of fine channel erosion on loess slopes[J]. *Journal of Geography*, 2002, 57 (2): 218—223. [李勉, 李占斌, 等. 细颗粒冲刷对黄土坡面侵蚀的影响[J]. 地理学报, 2002, 57 (2): 218—223.]

- 丁文峰,等. 黄土坡面细沟侵蚀过程的REE示踪[J]. 地理学报, 2002, 57 (2): 218—223.]
- [19] Wu Q Y. Applications of REEs tracer method used in soil erosion study[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45 (32): 124—126, 155. [吴倩云. REEs示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 安徽农业科学, 2017, 45 (32): 124—126, 155.]
- [20] Zhou S N, Wilson C G, Hathaway J M, et al. Tracking *in situ* soil aggregate turnover under raindrop impact and wetting-drying cycles using rare earth elements[J]. Catena, 2022, 213: 106227.
- [21] Zhang C Y, Yang W, Wang L, et al. Characteristics of aggregate turnover and sediment transport by interrill erosion using rare earth elements in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (6): 1492—1505. [张晨阳, 杨伟, 汪零, 等. 基于REE示踪对红壤细沟间侵蚀团聚体周转和泥沙迁移特征的研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (6): 1492—1505.]
- [22] Wang L, Wu W X, Ni S M, 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. [汪零, 吴文枭, 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.]
- [23] Liu Y J, Liu S, Gan L, 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. [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.]
- [24] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [25] Yang X L, Cui S, Yang M, et al. Determination of trace rare earth elements in polymetallic ores by inductively coupled plasma mass spectrometry coupled with alkali fusion ion exchange[J]. Metallurgical Analysis, 2011, 31 (3): 11—16. [杨小丽, 崔森, 杨梅, 等. 碱熔离子交换-电感耦合等离子体质谱法测定多金属矿中痕量稀土元素[J]. 冶金分析, 2011, 31 (3): 11—16.]
- [26] Wang X H, Yin L M, Dijkstra F A, et al. Rhizosphere priming is tightly associated with root-driven aggregate turnover[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107964.
- [27] DeLuca T H, Keeney D R, McCarty G W. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992, 14 (2): 116—120.
- [28] Hoogsteen M J J, Breure A M, van Ittersum M K. Monitoring soil organic matter on grassland farms: An exploratory analysis[J]. Geoderma, 2022, 405: 115456.
- [29] Sun J B, Li C Y, Lai C M, et al. Response of soil aggregate carbon, nitrogen and phosphorus to degradation in alpine meadows and its influencing factors[J]. Journal of Grassland Science, 2023, 31 (4): 1106—1114. [孙建波, 李成阳, 赖炽敏, 等. 高寒草甸土壤团聚体碳氮磷对退化的响应及其影响因素[J]. 草地学报, 2023, 31 (4): 1106—1114.]
- [30] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149—162.
- [31] Park E J, Sul W J, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (11): 2758—2768.
- [32] Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (5): 1297—1308. [谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报, 2023, 60 (5): 1297—1308.]
- [33] Rong H, Fang H, Zhang Z B, et al. Effects of aggregate size distribution on soil pore structure and soil organic carbon mineralization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 476—485. [荣慧, 房焕, 张中彬, 等. 团聚体大小分布对孔隙结构和土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 476—485.]
- [34] Gajić B, Đurović N, Dugalić G. Composition and stability of soil aggregates in Fluvisols under forest, meadows, and 100 years of conventional tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173 (4): 502—509.
- [35] Geng R, Zhang G H, Hong D L, et al. Variation characteristics of aggregate stability of cropland, grassland and woodland along precipitation gradient in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (3): 141—148. [耿韧, 张光辉, 洪大林, 等. 黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (3): 141—148.]

(责任编辑: 陈荣府)