

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.040

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.040

曹家仪, 李金卓, 胡亚鲜, 等. 冻融扰动对土壤孔隙水可溶性物质分布及紫外-荧光特性的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3): 119-129.

CAO Jiayi, LI Jinzhuo, HU Yaxian, et al. Effects of freeze-thaw disturbance on distribution and UV-fluorescence characteristics of dissolved substances in soil pore water[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 119-129.

冻融扰动对土壤孔隙水可溶性物质分布及 紫外-荧光特性的影响

曹家仪^{1,2,3}, 李金卓^{1,2,3}, 胡亚鲜^{1,2,3}, 栗现文⁴

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌, 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌, 712100; 3. 中国科学院大学, 北京, 100049; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌, 712100)

摘要: [目的] 季节性冻融可深刻改变土壤孔隙结构, 但目前对孔隙水中可溶性物质含量与组分的变化了解非常有限。[方法] 选取典型季节性冻融区东北黑土为研究对象, 通过室内冻融控制性模拟试验, 借助高速冷冻离心机和紫外分光光度计, 对比分析3种不同粒径(细粒径 $<0.5\text{ mm}$ 、中粒径 $0.5\sim 2.0\text{ mm}$ 和粗粒径 $2.0\sim 5.0\text{ mm}$)回填环刀土样, 分别在冻融前、后5个不同基质吸力水平下收集测定所得土壤孔隙水的电导率(EC)、可溶性有机碳含量(DOC), 以及可溶性有机物紫外-荧光特性(HIX、FI、SUVA₂₅₄)。[结果] 1) 冻融后, 各粒径土样 $\geq 34.0\text{ }\mu\text{m}$ 大孔隙占比均显著下降(4.84%), 而 $0.4\sim 3.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $<0.4\text{ }\mu\text{m}$ 的微孔隙占比增加(5.45%、2.78%)。2) 随着当量孔径缩小, DOC、EC和HIX均降低, 且冻融后均有增高趋势。3) 细粒径组成土样在 $0.4\sim 3.0\text{ }\mu\text{m}$ 微孔径的孔隙水SUVA₂₅₄在冻融后显著增强, 而粗粒径几乎所有孔径孔隙水的SUVA₂₅₄均显著下降。[结论] 冻融作用不仅可显著改变土壤孔隙结构, 还可深刻影响土壤孔隙水分布及可溶性有机物组分, 强调北方季节性冻融扰动对来年春季土壤物理结构和生物化学特性的深远影响。

关键词: 冻融; 孔隙结构; 孔隙水; DOM

中图分类号: S154.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0119-11

Effects of Freeze-Thaw Disturbance on Distribution and UV-Fluorescence Characteristics of Dissolved Substances in Soil Pore Water

CAO Jiayi^{1,2,3}, LI Jinzhuo^{1,2,3}, HU Yaxian^{1,2,3}, LI Xianwen⁴

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Seasonal freeze-thaw can profoundly alter soil pore structure, but current understanding of the changes in the content and composition of dissolved substances in pore water remains very limited. [Methods] This study selected the black soil of Northeast China from a typical seasonal freeze-thaw region as the research subject. Through controlled laboratory freeze-thaw simulation experiments, utilizing a high-speed refrigerated centrifuge and UV spectrophotometer, this study conducted a comparative analysis of three different particle sizes (fine particles $< 0.5\text{ mm}$, medium particles $0.5\sim 2.0\text{ mm}$, and coarse particles $2.0\sim 5.0\text{ mm}$) repacked in cutting rings. Soil pore water was collected and measured at five different matric suction levels to determine its electrical conductivity (EC), dissolved organic carbon (DOC) content, and UV-fluorescence characteristics of

收稿日期: 2025-12-23 修回日期: 2026-01-20 录用日期: 2026-02-16 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-20

资助项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFD1502000); 国家自然科学基金项目(52279049, 42477373)

第一作者: 曹家仪(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤冻融研究。E-mail: caojiayi23@mailsucas.ac.cn

通信作者: 胡亚鲜(1986—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与碳循环研究。E-mail: huyaxian@nwfafu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

dissolved organic matter (HIX, FI, SUVA₂₅₄) before and after freeze-thaw. [Results] 1) After freeze-thaw, the proportion of macropores $\geq 34.0 \mu\text{m}$ significantly decreased (4.84%) in soil samples of all particle size fractions, while the proportions of micropores (0.4–3.0 μm and $< 0.4 \mu\text{m}$) increased (5.45% and 2.78%, respectively). 2) As the equivalent pore diameter decreased, DOC, EC, and HIX all decreased, exhibiting an increasing trend after freeze-thaw. 3) For fine-grained soil samples, the SUVA₂₅₄ of pore water in the micropores of 0.4–3.0 μm increased significantly after freeze-thaw, whereas for coarse-grained samples, the SUVA₂₅₄ of pore water in almost all pore sizes decreased significantly. [Conclusion] Freeze-thaw action can not only significantly alter soil pore structure but also profoundly influence the distribution of soil pore water and the composition of dissolved organic matter. It underscores the far-reaching impact of seasonal freeze-thaw disturbance in northern regions on soil physical structure and biogeochemical properties in the following spring.

Keywords: freeze-thaw; pore structure; pore water; dissolved organic matter

Received: 2025-12-23

Revised: 2026-01-20

Accepted: 2026-02-16

Online(www.cnki.net): 2026-03-20

季节性冻融是影响中、高纬度及高海拔地区土壤理化特性的重要过程之一^[1-2]。季节性冻融过程中温度变化、水-冰两相转化等过程中体积膨胀、冰晶斥盐等物理现象,可改变土壤孔隙结构,重塑孔隙水分布格局,进而影响孔隙水对植物的有效性^[3-5]。低温和冰晶生长季节性破坏还可大量杀灭微生物^[6],进而通过微生物残体补给改变土壤溶液中可溶性有机物质含量^[7]。尤其在未气候条件下,季节性冻土区冻融深度、强度和循环次数等均将发生深刻变化^[8],因此,急需定量研究孔隙尺度下土壤水分和可溶性物质对冻融扰动的响应。

已有研究^[9]认为,在土壤冻结过程中,孔隙水从液态到冻结成固态冰晶,体积膨胀约9%,推挤土壤颗粒和团聚体,发生位移或形变。升温后冰晶融化,但已经发生的土壤颗粒位移和形变却无法复原,从而改变土壤孔径大小和空间分布^[3]。由于土壤水势在空间是不均匀的^[10],导致土壤水-冰相变是不均匀的,而是受到含水量、外部荷载及盐浓度等的影响^[11]。孔径越小,孔隙水压力越大,冻结冰点降低越明显^[10,12],致使大孔隙先冻结,小孔隙则需要温度降至更低才能冻结,而微小孔隙则可能持续处于未冻状态^[13]。因此,在东北黑土区或青藏高原地区等土壤孔隙和结构具有较强空间变异性的区域^[14-16],不同颗粒组成或孔隙组成对冻融时间、强度和溶质迁移等方面的变异性^[17]将进一步影响坡面尺度水文连通性和土壤剖面水分纵向分布格局。多个研究均发现,一次冻融可杀灭大量微生物^[18],释放其内部有机碳和氮^[19-20]。不仅增加土壤可溶性有机物质含量^[7],也改变孔隙水中可溶性物质的组成及其紫外-荧光特征。吴松洋^[21]研究发现,类富里酸和类腐殖酸物质的荧光强度随冷冻时长的增加而显著增加;XUE

等^[22]和 YANG 等^[23]进一步研究发现,冻融可显著降低可溶性有机质的芳香性和可溶性微生物代谢产物等荧光物质,而提高多糖和脂肪酸甲酯类的丰度,增加微生物源有机质的积累;WU 等^[24]则研究发现,随着初始含水率增高,冻融作用将可溶性有机质从腐殖酸向富里酸转变,增强土壤有机溶质的生物有效性。而且土壤孔隙的生物功能至关重要,控制微生物的水、有机物和营养物的供应和吸收^[25]。但是目前的研究对冻融扰动如何影响孔隙尺度的可溶性物质紫外荧光特性的研究不够深入,因此,亟需定量刻画冻融扰动对不同孔径中土壤水冻结过程及可溶性物质组分的影响。

本研究以中国东北典型季节性冻土区黑土为对象,针对冻融扰动对土壤孔隙水及可溶性物质组分影响等问题,对比研究3种不同粒径黑土环刀在冻融与非冻融条件下,5个不同孔径土壤水含量、可溶性物质含量及光学特性,旨在验证不同孔径孔隙水对冻融扰动的敏感性,定量刻画冻融扰动对孔隙尺度可溶性有机物光学特性的影响。1)定量刻画冻融对不同粒径土壤孔隙结构变化的影响;2)明确冻融对不同粒径土壤孔隙水中可溶性有机物荧光特性的变化特征;3)揭示冻融作用下孔隙结构变化对孔隙水再分布和 DOM 紫外-荧光特性响应的机理。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与土样采集

本研究选取黑龙江省嫩江市鹤北小流域(48°43'N, 124°56'E)农耕地为研究对象。研究区所在流域面积为2.8 km²,坡长一般800~1 500 m,平均坡度为6°^[26]。采样点典型作物有春小麦、大豆和玉米。该区属寒温带半湿润大陆性气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥。年平均降水量为534 mm^[27],年平均气温0.4℃。

最暖月(7月)平均气温 22.5 °C,最冷月(1月)平均气温 -20.8 °C^[28]。研究区为典型的季节性冻土区,冬季持续性低温导致土壤冻结深度达 1.5~2.0 m,从第 1 次冻结到最后 1 次解冻的冻融持续时间长达 170~200 d。每年 10 月中旬至 11 月中旬、3 月中旬至 4 月中旬土壤剖面经历多次冻融循环过程。土壤温度的最低值出现在 1—2 月,其中 0~10 cm 土层低至 -8.89 °C,而翌年 4 月气温迅速回升,土壤开始自而上而下单向解冻,融化期持续约 30 d,呈现昼融夜冻交替特征^[29]。

本研究于 2024 年入冬前在研究区典型坡耕地上坡位弱侵蚀区采集表层黑土(0~20 cm),土壤颗粒组成为:砂粒 6.10%,粉粒 56.92%、黏粒 36.97%。平均有机碳质量分数为 25.32 g/kg,平均 pH 为 5.75,平均总氮质量分数为 2.27 g/kg。在东北漫川漫岗地区,由于侵蚀和耕作扰动,坡背处粗骨化,而坡脚处细颗粒沉积富集,可显著改变不同坡位土壤质地,重塑孔隙结构^[30],形成较强的空间异质性,因此亟需针对不同土壤颗粒孔隙结构进行冻融扰动对比研究。

1.2 冻融模拟与孔隙水采集

将采集表层 0~20 cm 黑土,避光风干,为对比不同粒径形成孔隙结构下孔隙水对冻融扰动的响应,过 0.5、2.0、5.0 mm 筛,并去除可见植物根系等杂物,后分别回填环刀(体积 100 cm³),形成细粒径(<0.5 mm)、中粒径(0.5~2.0 mm)和粗粒径(2.0~5.0 mm),3 种粒径组成土柱。回填过程中,为避免土壤

颗粒被破坏,仅通过土壤颗粒自重自由沉降,没有进行外部压实,使其体积质量分别为 1.00、0.98、0.95 g/cm³。然后将细、中、粗粒径组成的环刀土样润湿至饱和含水量,此时其质量含水率分别为 58.0%、53.42% 和 45.60%。为模拟冻融过程土壤温度变化,将润湿后环刀土样包裹多层塑料薄膜后,直接放入冰箱,于 -10 °C 冷冻 12 h 后,在 10 °C 恒温箱解冻 12 h,即一次完整的冻融,每种处理重复设置 6 个环刀土样(图 1)。根据预试验结果,多次冻融循环对土壤孔隙结构和孔隙水特性的影响较为复杂,且可能存在非线性变化趋势,需进一步深入系统研究,故暂不在本研究讨论范围。

将未冻融和经历冻融扰动的环刀样品分别使用高速离心机进行离心,并分阶段收集离心水。将不同粒径土壤装入环刀后使用高速离心机离心,可保证同一吸力段土壤孔隙水样可比性,进而保证试验中孔隙结构数据的准确。具体而言,共设置 5 个离心转速,分别持续 5 个离心时间,对应土壤水吸力(表 1)。在各个离心阶段结束后,从转子中取出环刀,收集并测定各吸力下离心的孔隙水重量,并计算出对应的体积含水率。将收集的孔隙水储存在样品瓶中,培养箱 4 °C 保存。5 个阶段离心全部结束后,记录环刀和内部土壤的总质量,将环刀土风干后,记录环刀和内部干土的总质量,计算残余水。离心后,土壤总孔隙水回收率 >96%。

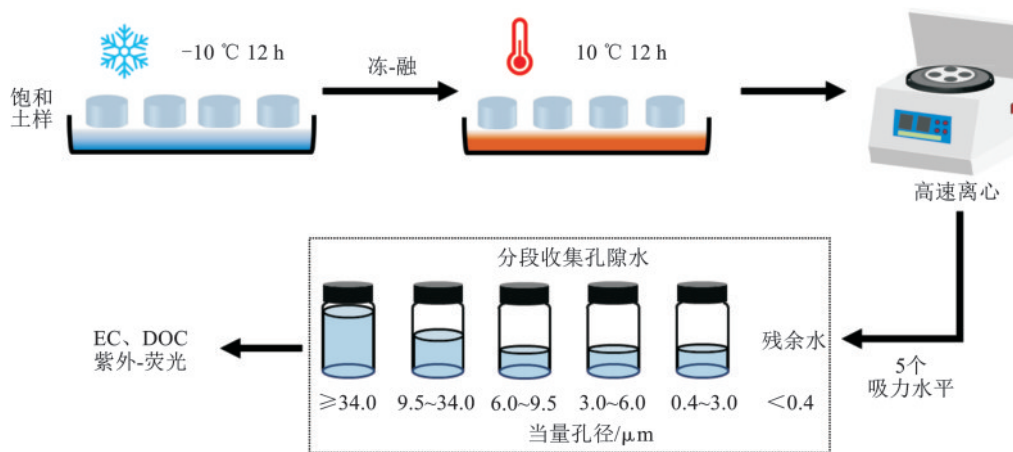


图 1 冻融模拟与孔隙水采集

Fig.1 Freeze-thaw simulation and pore water collection

1.3 土壤当量孔径计算

根据 5 个不同离心吸力下的含水率,以及公式(1)和公式(2)计算得出冻融前后各当量孔径。具体而言,假定土壤中的孔隙为圆形毛管,即假定土壤水吸力和毛管直径的关系^[31]为:

$$d = 300/S \quad (1)$$

式中:S为土壤水吸力,Pa;d为毛管直径,mm。

若土壤含水率 θ_1 、 θ_2 对应的当量孔径分别为 d_1 、 d_2 ,则 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比(k)为:

$$k = (\theta_1 - \theta_2) / \theta_s \quad (2)$$

式中: θ_s 为饱和含水率,cm³/cm³; $\theta_1 > \theta_2$ 。

基于以上计算公式,5 个基质吸力水平对应的孔径当量见表 1。

表 1 转速、平衡的时间、吸力、当量孔隙参数
Table 1 Rotation speed, duration, suction, equivalent pore size, and pore size classification

转速/(r·min ⁻¹)	平衡时间/min	吸力/cm	当量孔径/ μm	当量孔径(取整)/ μm	孔径分类
900	30	88.8	33.78	≥ 34.0	大孔隙
1 700	45	316.6	9.48	9.5 ~ 34.0	中孔隙
2 200	60	530.3	5.66	6.0~9.5	小孔隙
3 100	60	1 053.0	2.85	3.0~6.0	微孔隙
8 100	90	7 189.0	0.42	0.4~3.0	微、极微孔隙
	残余水			<0.4	极微孔隙

注:孔径段分类参考文献[32]。

1.4 土壤孔隙水 DOM 紫外-荧光特性测定与计算

土壤孔隙水 DOM 紫外-可见吸收光谱采用紫外分光光度计测定,荧光光谱分析采用 F-7000 三维荧光分光光度计。PMT 电压设为 700 V,配以 1 cm 石英比色皿;激发光谱波长范围 $\lambda_{\text{ex}}=200\sim 500$ nm,间隔 5 nm;发射光谱波长范围 $\lambda_{\text{em}}=250\sim 550$ nm,间隔 5 nm;扫描速度为 12 000 nm/min,狭缝宽度为 10 nm。采用超纯水作空白,系统自动校正拉曼散射。

计算土壤孔隙水 DOM 紫外-可见吸收光谱荧光光谱特征参数^[33]:荧光指数 (fluorescence index, FI)、腐殖化指数 (humification index, HIX) 及 SUVA₂₅₄。荧光指数 (fluorescence index, FI) 是反映芳香与非芳香氨基酸对 DOM 荧光强度的相对贡献率,作为衡量 DOM 来源及降解程度的指标^[34]。FI ≤ 1.4 ,表示 DOM 主要为外生源(有机物质转化等);FI ≥ 1.9 ,表示 DOM 主要为自生源(微生物分解所产生);1.4 \leq FI ≤ 1.9 ,表示 DOM 为混合源^[35]。腐殖化指数 (humification index, HIX) 表征 DOM 的腐殖化程度, HIX 越高表明腐殖化程度高, DOM 越稳定^[36]。SUVA₂₅₄ 定义为在 254 nm 处的紫外吸收除以溶解性有机碳 (DOC) 浓度所得的比值 [L/(mg·m)]。SUVA₂₅₄ 值越高,表明 DOM 中含有更多的共轭双键结构和芳香环化合物,较低的 SUVA₂₅₄ 值则指示 DOM 以脂肪族、蛋白质类或微生物代谢产物为主^[37]。参照荧光激发-发射矩阵区域积分定量溶解有机物光谱^[38]。根据土壤 DOM 三维荧光光谱特征,一般将激发波长和发射波长所形成的二维荧光区域划分为 5 个特征峰区域,通过 MATLAB 2024a 调用 DomFluor 工具箱计算荧光区域积分 (fluorescence regional integration, FRI):区域 I 为类酪氨酸物质;区域 II 为类色氨酸物质,二者均为类芳香蛋白物质;区域 III 是类富里酸物质,区域 IV 为微生物代谢产物;区域 V 为类腐殖酸物质。

1.5 其他指标测定与数据分析

将收集的各孔隙水样品稀释 20 倍后,使用电导率仪测定电导率 (EC)。将稀释后的水样用 0.45 μm 滤膜对离心后的水样抽滤,采用总有机碳分析仪测定滤液中的 DOC 含量。各指标数据采用 Excel 2019 软件处理,采用 Origin 2021 软件绘图,采用 SPSS 23 软件进行差异显著性分析 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 冻融前后不同粒径土壤孔隙结构及孔隙水分布

未冻融时, ≥ 34.0 μm 大孔隙在中粒径土样 (0.5~2.0 mm) 中占比为 45.66%,显著高于其他粒径中的占比(表 2),而 9.5~34.0 μm 中孔隙在细粒径土样中占比为 16.04%,显著高于粗粒径 (8.07%) 和中粒径 (8.95%)。6.0~9.5 μm 小孔隙在细、中、粗粒径土样的占比分别为 4.76%、3.57%、3.88%。 < 0.4 μm 的极微孔隙在粗粒径土样中占比最高为 35.21%(表 2)。

冻融扰动后,各粒径土样 ≥ 34.0 μm 大孔隙占比均显著下降(平均为 4.84%),而 0.4~3.0、 < 0.4 μm 的极微孔隙占比增加(平均为 5.45%、2.78%)(表 2)。就不同粒径而言,细粒径土样 ≥ 34.0 μm 大孔隙占比下降最为显著,从未冻融时的 37.29% 下降至冻融后的 34.50%。同时,细粒径土样 < 0.4 μm 的极微孔隙占比也从未冻融时的 31.46% 增加至冻融后的 33.39%(表 2)。冻融后,中、粗粒径土样也大致表现为大孔隙减少,小孔隙和微孔隙占比增加,但总体趋势不太显著(表 2)。

2.2 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机碳和电导率分布差异

由图 2 可知,未冻融时,随着土壤粒径增大,孔隙水 DOC 和 EC 均有下降趋势。细粒径土样中各孔隙 DOC 平均值为 23.96 mg/L,而粗粒径中仅为 19.09 mg/L。孔隙水 EC 随着土壤粒径的变化更为敏感,粗粒径土样孔隙水 EC 仅为细粒径的 73%(图 2)。随着孔径缩小,孔隙水 DOC 和 EC 也有所下降,0.4~

3.0 μm 微孔径孔隙水 DOC 和 EC 平均值是 ≥34.0 μm 大孔径孔隙水的 78.73%~100.55%。

冻融可显著增加土壤孔隙水 DOC 和 EC。冻融后,DOC 和 EC 的平均值约为未冻融初始值的 1.10、

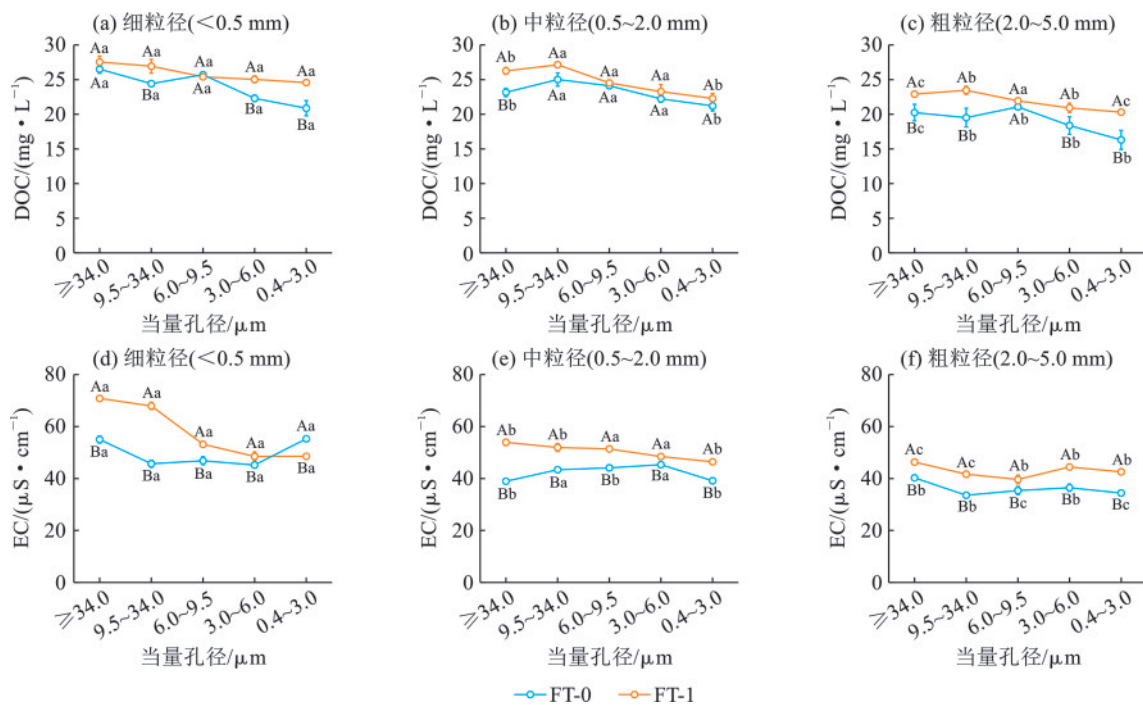
1.18 倍。冻融后 DOC 的增幅在粗粒径土样中最为显著,平均约为 14.71%,而 EC 的增加则在细粒径土样中较为明显,尤其 ≥34.0、9.5~34 μm 的大中孔隙中最为显著,平均增幅可达 38.74%。

表 2 未冻融和冻融后不同粒径土样在各基质吸力下的当量孔径占比

Table 2 Distribution of equivalent pore size proportions under various suction levels for soil samples of different particle sizes before and after freeze-thaw %

当量孔径/μm	未冻融 (FT-0)			冻融 (FT-1)		
	细粒径	中粒径	粗粒径	细粒径	中粒径	粗粒径
≥34.0	37.29±0.51Ac	45.66±0.43Aa	43.19±1.13Ab	34.50±0.57Bc	43.46±0.23Ba	42.23±0.23Bb
9.5~34.0	16.04±1.03Aa	8.95±0.55Ab	8.07±0.29Bb	16.50±0.40Aa	9.18±0.17Ab	9.59±0.17Ab
6.0~9.5	4.76±0.21Ba	3.57±0.20Ab	3.88±0.26Ab	5.24±0.17Aa	3.68±0.17Ab	3.48±0.10Ab
3.0~6.0	4.07±0.22Aa	3.30±0.08Ab	3.47±0.18Ab	3.60±0.36Aa	3.41±0.03Ab	3.40±0.08Ab
0.4~3.0	6.38±0.39Aa	5.45±0.17Ab	6.18±0.34Aa	6.79±0.18Aa	5.69±0.43Ab	6.52±0.10Aa
<0.4	31.46±0.40Bc	33.05±0.56Ab	35.21±1.04Aa	33.39±0.20Ab	34.18±0.51Aab	34.78±0.32Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示 3 种粒径间差异显著,不同大写字母表示未冻融与冻融差异显著(p<0.05)。



注:图中 FT-0 为未冻融,FT-1 为冻融;不同小写字母表示 3 种粒径间差异显著,不同大写字母表示未冻融与冻融差异显著(p<0.05)。下同。

图 2 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机碳和电导率分布差异

Fig.2 Differences in dissolved organic carbon and electrical conductivity of pore water from soils of different particle sizes before and after freeze-thaw

2.3 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机物紫外-荧光特性

由图 3 可知,未冻融时,HIX 主要在 0.71~0.77 变化,说明孔隙水 DOM 腐殖化程度普遍较低,且中、粗粒径土样 HIX 显著高于细粒径,前者平均值是后者的 1.04、1.05 倍。不同孔径间,≥34.0 μm 大孔隙 HIX 的平均值为 0.77,显著高于 0.4~3.0 μm 小孔隙 (0.73)。冻融后,各粒径土样的 HIX 均有提升,尤其

是细粒径土样的 HIX 平均值由冻融前的 0.72 提升至冻融后的 0.76。总体上 HIX 随孔径减小而减小。

未冻融时,FI 主要在 1.77~1.87 变化,说明孔隙水 DOM 为混合源,但自生源(微生物分解所产生)相对较多。粗粒径土样的 FI(1.79)显著低于细粒径(1.83),但 ≥34.0 μm 大孔径孔隙水的 FI 平均值为 1.79,显著低于 0.4~3.0 μm 小孔隙水 FI 平均值(1.84)。冻融后,FI 均有上升趋势,但仅粗粒径土样各孔径孔隙水冻融

前后 FI 差异较为显著,细、中粒径分别是 9.5~34.0、 $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 的孔隙水冻融后 FI 增幅较大。

未冻融时,细粒径土样 SUVA_{254} 平均值为 0.60,在 9.5~34.0 μm 的 SUVA_{254} 最高为 0.73,之后随孔径减小, SUVA_{254} 减小,显著低于粗粒径平均值(1.00)。但冻融后,孔隙水 SUVA_{254} 在细、粗粒径土样中的表

现截然相反。细粒径土样除 $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 的大孔隙水 SUVA_{254} 冻融前后无显著差异外,其他孔隙水的 SUVA_{254} 均显著增大。0.4~3.0 μm 的微孔隙冻融后 SUVA_{254} 为冻融前的 2.07 倍。然而,粗粒径土样所有孔径的孔隙水 SUVA_{254} 均在冻融后显著下降,平均降幅为 19.53%。

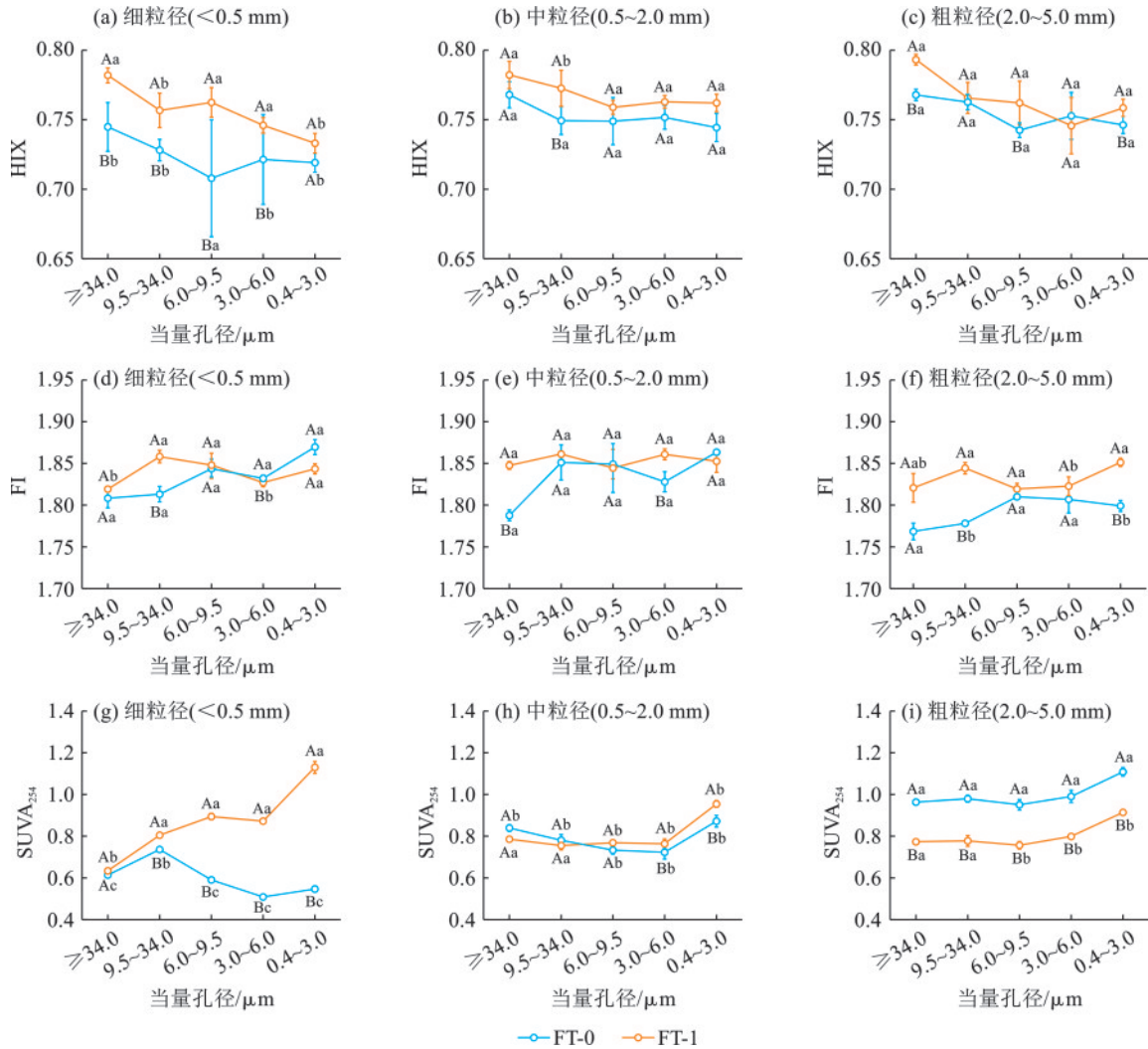


图 3 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机物紫外-荧光特性

Fig.3 UV-fluorescence characteristics of dissolved organic matter in pore water from soils of different particle sizes before and after freeze-thaw

2.4 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机物荧光光谱特性

由图 4 不同孔径孔隙水 DOM 三维荧光图谱可知,峰值出现在 III 区 ($E_x: 240\sim 250 \text{ nm}, E_m: 410\sim 440 \text{ nm}$) 和 V 区 ($E_x: 250\sim 270 \text{ nm}, E_m: 410\sim 440 \text{ nm}$), 分别代表类富里酸物质和类腐殖酸物质。孔隙水 DOM 的荧光峰强度随着孔径当量的减小而减弱;与未冻融相比,冻融后孔隙水荧光峰强度明显增强,细粒径的荧光峰强度明显高于粗粒径。

不同孔径孔隙水 DOM 荧光区域积分比例详见

图 5。未冻融时,区域 II (类色氨酸物质) 占比最高 32.73%, 区域 I (类酪氨酸物质) 占比最低 6.21%, 细粒径在区域 I 积分占比 (7.39%) 显著大于中粒径 (4.52%), 区域 II 各土样差别不大, 区域 V 占比在 6.0~34.0 μm 的中、小孔隙, 细粒径显著小于中粒径。冻融后, 区域 I 的细粒径占比减小 39.89%, 中粒径 $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 大孔隙占比增幅 51.55%, 粗粒径 $> 6.0 \mu\text{m}$ 的孔隙水显著小于未冻融, 区域 II 占比为 32.22%, 区域 II $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 大孔隙的细粒径占比显著小于中粒径, 区域 V 占比细粒径总体增幅为 11.86%。

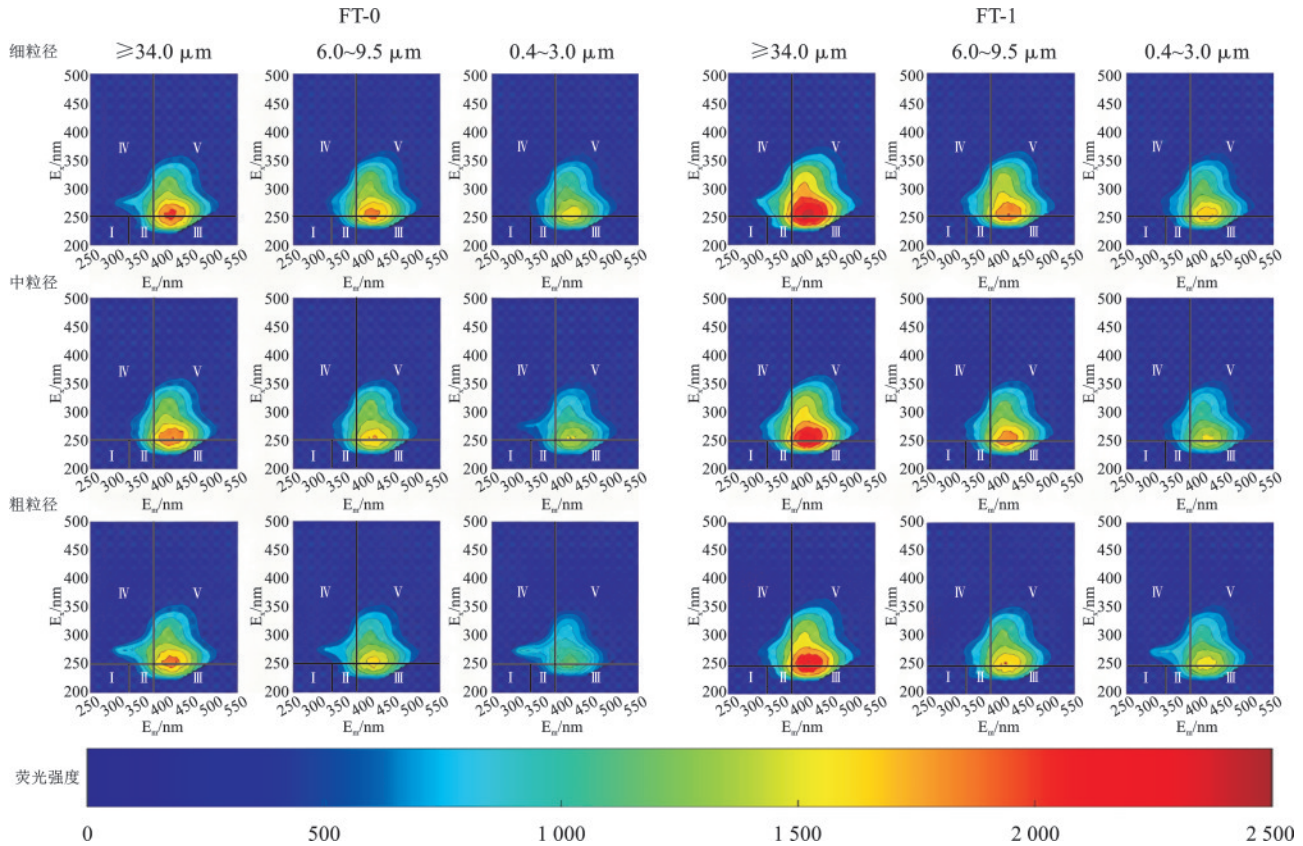


图 4 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机物三维荧光图谱

Fig.4 Three-dimensional fluorescence spectra (EEMs) of dissolved organic matter in pore water from soils of different particle sizes before and after freeze-thaw

3 讨论

3.1 不同孔径内孔隙水可溶性有机物组成差异

不同孔径间孔隙水可溶性物质含量和组分存在显著差异,可能主要与土壤孔隙非均质结构所导致的孔隙压力和周转速度差异有关。一方面, $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 大孔径孔隙水中 DOC 含量显著高于 $0.4\sim 3.0 \mu\text{m}$ 的小孔隙(图 2);另一方面,随着孔径减小, HIX 指数减小(图 3), 荧光强度也减弱(图 4), 但 FI 指数增大(图 3)。主要是因为,随着土壤孔隙变小,土壤颗粒间距缩短,导致孔隙水压力快速增大^[39],使得土壤颗粒对孔隙水和可溶性物质的吸附力强烈,捕获在大团聚体内的有机物比小规模、局部的有机物活跃得多^[25],导致大孔径孔隙水周转速度快,主要由降雨或灌溉过程进行补给^[40],与土壤矿质表面和有机物质交互时间短。并且大孔径孔隙水中的 DOM 含量和组分除与植物地上凋落物和根系降解有关,也可能与植物叶片被雨水冲刷后剥落的脂类等有机分子输入密切相关^[41],导致大孔径可溶性有机物质含量丰富(图 2)。然而,小孔径因其孔隙压力大,显著延缓水分周转(老水)^[42],尺寸排阻效应更强^[43],主动扩散和被动扩散的营养物质、酶和氧气等更难进入小孔隙^[44],可溶性有机物吸附后更会导致孔隙堵塞,不利于小孔隙吸附 DOM^[45-46], DOC

含量更低。且小孔隙与根系接触时间更长^[42],根系也更倾向于从小孔隙中吸收水分和营养物质^[47],导致小孔隙中 DOC 补给少,消耗多,积累量小(图 2)。DOM 可能主要是根系分泌物与微生物残体等来源的组分^[48],腐殖化程度较低(HIX 低)(图 3)。

3.2 孔隙水可溶性有机物含量与组分对冻融扰动的响应

冻融后, $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 大孔隙占比显著减小,同时 $0.4\sim 3.0 \mu\text{m}$ 微孔径和 $< 0.4 \mu\text{m}$ 极微孔径的占比显著增加(表 2),表明冻融作用可显著影响土壤孔隙结构和孔隙水分布格局。同时,冻融后各孔隙 DOC 和 EC 均有增加趋势(图 2),一方面是因为冻结过程中的冰晶冻胀作用会破坏团聚体,尤其在粗颗粒表面应力集中处产生断裂^[15],不仅减小大孔隙占比(表 1),还暴露新的土壤颗粒表面,更有利于矿物离子释放^[49],提高土壤孔隙水中的 EC(图 2);另一方面,冰晶冻胀对微生物的机械破坏剧烈^[50],导致微生物裂解死亡,释放出小分子糖、氨基酸^[20],补给土壤水中的 DOC。而冻融后土壤孔隙水 FI 普遍提高(图 3), HIX 显著增大(图 3),也说明冻融增强土壤孔隙水中可溶性有机物的腐殖化程度,微生物分解所产生的可溶性有机物也增多。由于孔隙水压力的差异,小孔径孔隙水的冻结冰点大大降低^[10],延缓冻结,或处于未冻状态。

因此, $\geq 34.0 \mu\text{m}$ 大孔径孔隙水冻结时带来机械性冻胀破坏, 矿物质释放(即 EC 增高), 比 $0.4\sim 3.0 \mu\text{m}$ 微孔径孔隙水更显著(图 2)。此外, 冻融作用使蛋白质类荧光组分(区域 I、II)占比下降, 而类富里酸与类腐殖酸组分(区域 III、V)占比上升(图 5), 同样表明冻融扰动可增强孔隙水 DOM 的腐殖化程度, 可能是因

为未冻水膜中小分子有机碳的浓缩可能诱发部分氧化反应, 使简单的有机物结构复杂化, 进一步提升腐殖化程度^[51-52]。由于冰晶斥盐等效应, 腐殖酸样荧光物质更容易从冰相排出, 被冻融作用分解成非荧光结构, 破坏前期不稳定腐殖质结构^[22], 进而提升冻融后各孔径孔隙水 DOM 的腐殖化程度(图 3)。

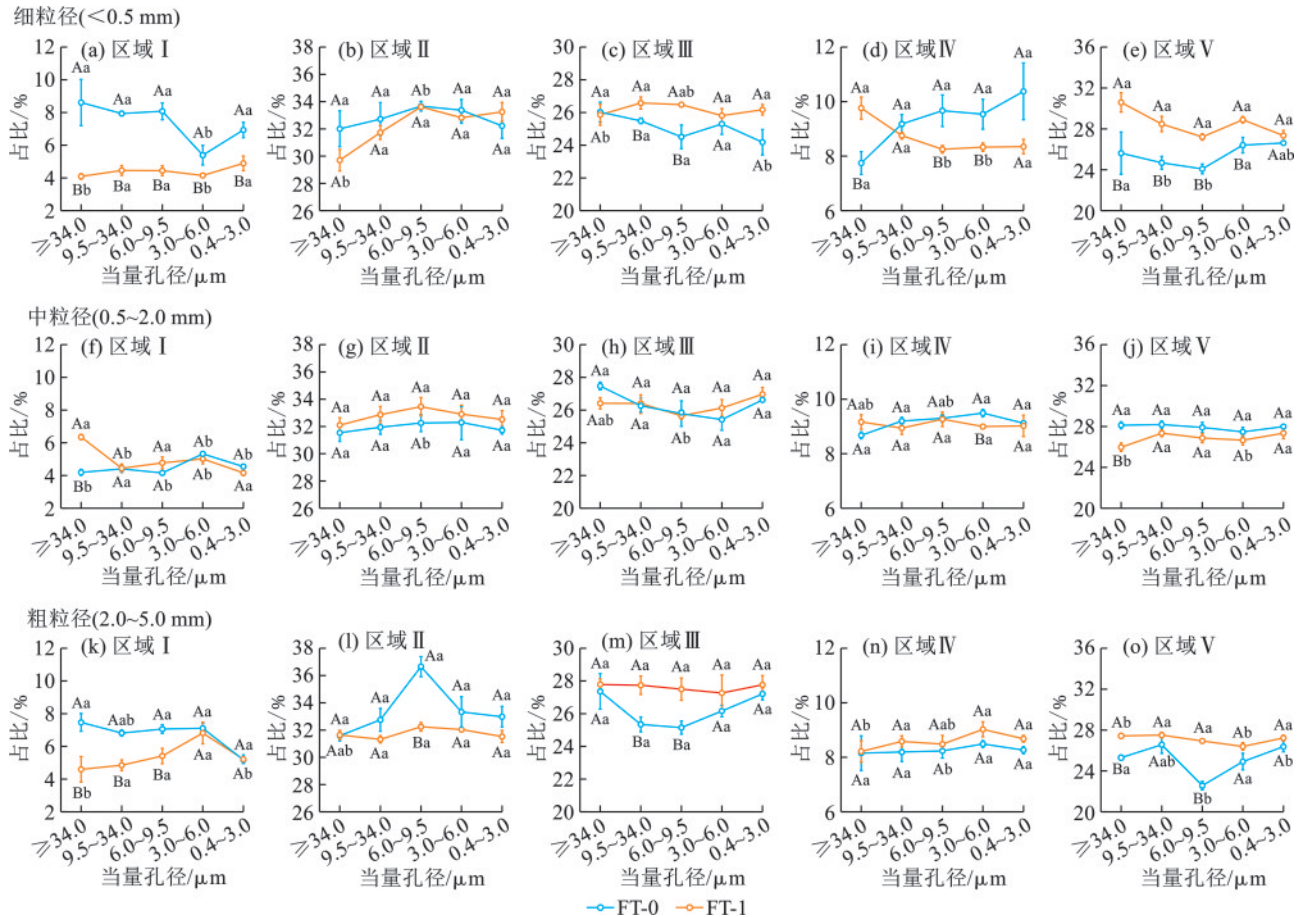


图 5 冻融前后不同粒径孔隙水可溶性有机质 (DOM) 荧光区域积分分布

Fig.5 Fluorescence regional integration (FRI) distribution of dissolved organic matter (DOM) in pore water from soils of different particle sizes before and after freeze-thaw

3.3 不同粒径组成下孔隙水可溶性有机物对冻融扰动的异质性响应

不同粒径组成的土样在相同孔径下, 孔隙水可溶性有机物含量和组分变化对冻融扰动的响应也不尽相同, 尤其是细粒径组成土样在 $0.4\sim 3.0 \mu\text{m}$ 微孔径的孔隙水 SUVA_{254} 在冻融后显著增强, 而粗粒径几乎所有孔径孔隙水的 SUVA_{254} 均显著下降(图 3)。可能是因为细粒径组成土样虽然总含水率高, 但总孔隙度偏小, 可有效减缓孔隙水冻结过程, 冻结冰点更低^[15,48], 使得冰晶生长速度更为缓慢、充分, 加剧微生物体因低温和内外冰晶冻胀带来的机械性破坏^[53], 孔隙水可溶性有机物中微生物残体的输入占比相对更大, 因此, 细粒径组成土样在孔隙水 DOC 增高的前提下(图 2), SUVA_{254} 增幅更明显(图 3)。而

粗粒径组成土样总孔隙度相对较大, 且总含水量低, 致使其孔隙水冻结温度相对较高^[54], 冰晶生长迅速但不充分^[55-56], 存活微生物在冻融后依然活跃, 甚至因冻融应激响应带来的生长与呼吸作用更加剧烈^[20], 导致粗粒径土样微生物自身代谢产物对冻融后孔隙水可溶性有机物的贡献相对增高(即 FI 增高, SUVA_{254} 降低)。本研究中, SUVA_{254} 、HIX 和 FI 3 个指标的耦合变化揭示冻融扰动对不同孔隙微环境中 DOM 性质的差异化重塑机制。

3.4 意义与局限性

本研究表明, 冻融扰动能够破坏土壤结构, 并显著改变 DOM 的组成和流动性, 共同影响其迁移途径和生物活性特征^[57]。冻融扰动对土壤孔隙结构的改变及孔隙水 EC 和 DOC 增加的趋势, 与章泽涛等^[49]在

盐渍土冻融条件下得出的结论一致,共同强调北方季节性冻融扰动对土壤物理结构和生物化学特性的深远影响。不同孔径孔隙水的DOC含量及可溶性有机物紫外-荧光特性差异也进一步说明,冬季冻融作用对来年春季土壤养分可利用性,尤其是出苗期根系对土壤孔隙水的利用,存活微生物的群落与活性,甚至温室气体排放等都有很强的联动效应。而同一孔径但不同粒径组成的孔隙水对冻融扰动的异质性响应,与LIU等^[17]和HU等^[58]的结果相似,共同凸显因地形、侵蚀、耕作等因素造成的田间土壤质地差异(如坡位间、层位间),可深刻影响局部土壤水-冰相变过程,进一步加剧来年春季土壤水分和可溶性有机物质活性的空间变异性。本研究采用过筛均质回填土样,虽无法还原田间原位土壤复杂孔隙结构,但3个典型粒径组成孔隙水对冻融扰动的异质性响应已充分说明,粒径组成和孔隙结构差异可深刻影响孔隙水可溶性物质含量、组分和分布对冻融扰动的响应特征。未来研究需结合原状土柱与X-ray和CT等量化技术,验证冻融期间不同坡面位置原位土壤剖面孔隙水迁移特征和时空异质性。在未来气候变化条件下,除关注季节性冻融对土壤总体理化生特性改变外,还应深入辨析不同冻融情景下(如温度、深度、频率和循环次数等),不同冻融阶段(如,正冻、全冻、正融、全融等),田间土壤空间异质性(坡面、剖面、孔隙),如何影响来年土壤水分和养分对作物根系及存活微生物的有效性。

4 结论

1) 冻融前,随着孔径减小,孔隙水中DOC含量和HIX显著降低,荧光强度也减弱,但FI指数和SUVA₂₅₄增大。

2) 冻融后,≥34.0 μm大孔隙占比显著减小(4.84%),同时0.4~3.0 μm微孔隙和<0.4 μm极微孔隙的占比显著增加(5.45%、2.78%),且各孔隙DOC、EC、HIX和FI均有增加趋势,说明冻融显著改变土壤孔隙结构,增强土壤孔隙水中可溶性有机物的腐殖化程度,自生源性更强。

3) 不同粒径组成的土样在相同孔径下,孔隙水可溶性有机物含量和组分变化对冻融扰动的响应也不尽相同,尤其是细粒径土样在0.4~3.0 μm微孔隙的孔隙水SUVA₂₅₄在冻融后显著增强,而粗粒径几乎所有孔径孔隙水的SUVA₂₅₄均显著下降,可能与不同颗粒土样的总含水量和孔隙水冰点差异有关。

可溶性有机物在不同孔径中的非均匀分布,以及不同粒径下孔隙水对冻融的异质性响应,从微观尺度揭示冻融扰动对土壤孔隙水可溶性有机物的固

持与释放过程,共同凸显冬季冻融作用下土壤结构变形与孔隙微生物生存策略,及其对随后生长季碳排放与DOM的生物有效性的深远影响。

参考文献:

- [1] GROGAN P, MICHELSEN A, AMBUS P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641-654.
- [2] 丁慧慧, 陈文盛, 李江荣. 季节性冻融对色季拉森林土壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 120-127.
DING H H, CHEN W S, LI J R. Effect of seasonal freeze-thaw on the stability of soil aggregates in the forest of sergyemla mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 120-127.
- [3] ZHANG Z, MA W, FENG W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2), 167-179.
- [4] ZHANG J, LAI Y M, LI J F, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 146: e118868.
- [5] 王梦琦. 冻融循环对4种地被植物生长及土壤养分的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
WANG M Q. The effects of freeze-thaw cycles on the growth of 4 ground cover plants and soil nutrients [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025.
- [6] LIU W H, LI R, WU T H, et al. Spatiotemporal patterns and regional differences in soil thermal conductivity on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): e1168.
- [7] MORGALEV S Y, LIM A G, MORGALEVA T G, et al. Fractionation of organic C, nutrients, metals and bacteria in peat porewater and ice after freezing and thawing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(1): 823-836.
- [8] CHEN C, PENG X Q, FRAUENFELD O W, et al. Comprehensive assessment of seasonally frozen ground changes in the northern hemisphere based on observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(20): e2022JD037306.
- [9] LIU B, FAN H M, HAN W, et al. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese mollisol under freeze-thaw effect [J]. *Geoderma*, 2021, 401: e115170.
- [10] ZHANG L H, YANG C S, WANG D Y, et al. Freezing point depression of soil water depending on its non-uniform nature in pore water pressure [J]. *Geoderma*, 2022, 412: e115724.

- [11] ZOU Y Y, JIANG H Q, WANG E L, et al. Variation and prediction of unfrozen water content in different soils at extremely low temperature conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: e129900.
- [12] ZHANG L, REN F P, LI H, et al. The influence mechanism of freeze-thaw on soil erosion: A Review [J]. *Water*, 2021, 13(8): e1010.
- [13] WAN X S, YANG Z H. Pore water freezing characteristic in saline soils based on pore size distribution [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 173: e103030.
- [14] WU X T, YANG Y, HE T, et al. Mechanical sowing alters slope-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity in the black soil region of northeast China [J]. *Catena*, 2022, 212: e106115.
- [15] KE X M, WANG W, NIU F J, et al. Investigating soil properties and their effects on freeze-thaw processes in a thermokarst lake region of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Engineering Geology*, 2024, 342: e107734.
- [16] WANG X, SONG K, WANG Z M, et al. Effects of land conversion to cropland on soil organic carbon in montane soils of northeast China from 1985 to 2020 [J]. *Catena*, 2024, 235: e107691.
- [17] LIU H M, HU Y X, HAO Y L, et al. Progressive freeze-thaw redistributes water, solute and CO₂ emissions across soil layers: The role of soil particle size [J]. *Catena*, 2020, 219: e106614.
- [18] HERRMANN A, WITTER E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(10): 1495-1505.
- [19] RISK N, SNIDER D, WAGNER-RIDDLE C. Mechanisms leading to enhanced soil nitrous oxide fluxes induced by freeze-thaw cycles [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(4): 401-414.
- [20] SONG Y, ZOU Y C, WANG G P, et al. Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 35-49.
- [21] 吴松洋. 冻融对土壤中溶解性有机物光谱学及其光化学活性影响的研究 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2024.
- WU S. Study of the effect of freezing and thawing on the spectroscopy of dissolved organic matter and its photochemical activity in soil [D]. Shenyang, Liaoning University, 2024.
- [22] XUE S, WEN Y, HUI X J, et al. The migration and transformation of dissolved organic matter during the freezing processes of water [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27: 168-178.
- [23] YANG Y, CHENG S L, FANG H J, et al. Linkages between the molecular composition of dissolved organic matter and soil microbial community in a boreal forest during freeze-thaw cycles [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13: e1012512.
- [24] WU H H, XU X K, CHENG W G, et al. Antecedent soil moisture prior to freezing can affect quantity, composition and stability of soil dissolved organic matter during thaw [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): e6380.
- [25] YUDINA A, KUZYAKOV Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores [J]. *Geoderma*, 2023, 434: e116478.
- [26] LIU L, ZHANG K L, ZHANG Z, et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in northeast China [J]. *Catena*, 2015, 129: 103-111.
- [27] CHEN S Q, ZHANG G H, ZHU P Z, et al. Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of northeast China [J]. *Catena*, 2022, 217: e106475.
- [28] MA Q H, ZHANG K L, JABRO J D, et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different degraded conditions in northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(10): e321.
- [29] LIU H H, ZHANG T Y, LIU B Y, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6): 1723-1732.
- [30] WANG G P, KE Q H, ZHANG K L, et al. Responses of freeze-thaw process and hydrothermal variations within soil profiles to the cultivation of forest and grassland in northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: e105653.
- [31] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述 [J]. *水科学进展*, 1999(3): 311-318.
- LEI Z D, HU H P, YANG S X. Progress and perspectives in soil water research [J]. *Advances in Water Science*, 1999(3): 311-318.
- [32] CAMERON K C, BUCHAN G D. Porosity and pore size distribution [J]. *Encyclopedia of Soil Science*, 2006: 1782-1785.
- [33] GAO J K, LIANG C L, SHEN G Z, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in various agricultural soils throughout China [J]. *Chemosphere*, 2017, 176: 108-116.
- [34] MLADENOV N, MCKNIGHT D M, MACKO S A, et al. Chemical characterization of DOM in channels of a seasonal wetland [J]. *Aquatic Sciences*, 2007, 69(4): 456-471.
- [35] LI L, WANG Y, ZHANG W J, et al. New advances in fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy for the characterization of dissolved organic matter in drinking water treatment: A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: e122676.

- [36] OHNO T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(4):742-746.
- [37] ERSAN M S, LIU C, AMY G, et al. The interplay between natural organic matter and bromide on bromine substitution[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 646:1172-1181.
- [38] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(24):5701-5710.
- [39] ZHANG C, LU N. Soil sorptive potential: Its determination and predicting soil water density[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(1):e04019118.
- [40] SPRENGER M, LLORENS P, CAYUELA C, et al. Mechanisms of consistently disjunct soil water pools over (pore) space and time[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(6):2751-2762.
- [41] REIFFARTH D G, PETTICREW E L, OWENS P N, et al. Sources of variability in fatty acid (FA) biomarkers in the application of compound-specific stable isotopes (CSSIs) to soil and sediment fingerprinting and tracing: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565:8-27.
- [42] ASANO Y, COMPTON J E, CHURCH M R. Hydrologic flowpaths influence inorganic and organic nutrient leaching in a forest soil[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 81(2):191-204.
- [43] XIAO F, JIN B S, GOLOVKO S A, et al. Sorption and desorption mechanisms of cationic and zwitterionic per- and polyfluoroalkyl substances in natural soils: Thermodynamics and hysteresis [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(20):11818-11827.
- [44] KUKA K, FRANKO U, RÜHLMANN J. Modelling the impact of pore space distribution on carbon turnover [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4):295-306.
- [45] LI Q L, SNOEYINK V L, MARIÅAS B J, et al. Elucidating competitive adsorption mechanisms of atrazine and NOM using model compounds [J]. *Water Research*, 2003, 37(4):773-784.
- [46] LYU X Y, CHEN Y F, XU Z Y. Pore size distribution and Al oxide content significantly regulated the effects of humic acid on perfluorooctanoic acid transport in natural soils[J]. *Chemosphere*, 2024, 352:e141342.
- [47] ALLEN S T, KIRCHNER J W, BRAUN S, et al. Seasonal origins of soil water used by trees [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(2):1199-1210.
- [48] WANG R Z, HU X. Pore structure characteristics and organic carbon distribution of soil aggregates in alpine ecosystems in the Qinghai Lake basin on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2023, 231:e107359.
- [49] 章泽炜, 吴雷, 李泽昕, 等. 冻融循环对盐渍土孔隙水理化性质的影响及 CO₂ 排放响应[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(12):6963-6974.
- ZHANG Z W, WU L, LI Z X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on physicochemical properties of pore water in saline soil and its carbon emission response[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(12):6963-6974.
- [50] 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.
- [51] ZHANG Y C, BI Z T, TIAN W X, et al. Synergistic effect triggered by Fe₂O₃ and oxygen-induced hydroxyl radical enhances formation of amino-phenolic humic-like substance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348:e119312.
- [52] MIN D W, KIM K, LUI K H, et al. Abiotic formation of humic-like substances through freezing-accelerated reaction of phenolic compounds and nitrite[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(13):7410-7418.
- [53] LI W W, YAN D H, WENG B S, et al. Research progress on hydrological effects of permafrost degradation in the northern Hemisphere[J]. *Geoderma*, 2023, 438:e116629.
- [54] SHI Y J, MU Y H, MA W, et al. A novel NMR-based experimental study of the water-heat transfer of coarse-grained soil during the freeze-thaw process[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 165:e109011.
- [55] LIU J P, XU H, TAO Y, et al. Effects of clay content and subfreezing temperature on the freeze-thaw deformation properties of clayey soils[J]. *Catena*, 2024, 239:e107916.
- [56] LIU Q, ZHANG Z, ZHAI J B, et al. Geometric form changes of soil quartz minerals under freeze-thaw weathering[J]. *Engineering Geology*, 2023, 320:e107133.
- [57] WANG J J, ZHANG Q W, CHEN G, et al. Dissolved organic matter dynamics in black soil leachates during infiltration under freeze-thaw regimes: Spectroscopic insights from a laboratory study in high-latitude regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 667:e134884.
- [58] HU Y X, YUAN X H, WANG X Y, et al. Unequal impacts of unidirectional freeze-thaw on different soil layers and aggregate sizes: Evidenced by microbial communities and CO₂ emissions[J]. *Catena*, 2024, 241:e108057.