

冻融循环恢复土壤压实过程中大孔隙作用研究

贺亭峰^{1,2} 张慧清³ 张冬梅^{1,4} 刘化涛^{1,4} 孔猛^{1,4} 丁启朔⁵

(1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 太原 030031; 2. 农业农村部有机旱作农业重点实验室(省部共建), 太原 030031;
3. 泰国经贸大学管理学院, 巴吞他尼 12160; 4. 有机旱作山西省重点实验室, 太原 030031;
5. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 农机压实土壤的问题很难避免,而农田压实土壤的结构恢复至关重要,冻融循环是恢复压实土壤的有效方法。为了研究冻融循环+大孔隙对恢复压实土壤的作用,通过室内试验重塑压实土壤及人工孔隙措施模拟大孔隙,在不同土壤含水率条件下设计不同的冻融循环次数,利用温度传感器监测土壤温度波动,同时对冻融循环前后压实土壤孔隙与团聚体参数的变化。结果表明,冻融循环过程中,有人工孔隙压实土壤在高、低两种含水率条件下,分别在第3次和第2次冻融循环时开始大幅温度波动,相同含水率条件下无人工孔隙的压实土壤温度大幅波动则出现在第7次和第4次冻融循环,经历多次冻融循环后,有人工孔隙压实土壤的团聚体平均尺度、结构系数等参数均优于无人工孔隙的压实土壤。人工孔隙可通过调节土壤温度波动改变冻融循环在土壤中的作用强度,加速压实土壤结构恢复进程,冻融循环+大孔隙策略是改善土壤孔隙及团聚体结构的有效措施。

关键词: 土壤压实; 结构恢复; 冻融循环; 人工孔隙; 土壤温度

中图分类号: S152; S23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0340-08 OSID: 

Role of Macropores for Soil Compaction Restoring during Freeze-thaw Cycles

HE Tingfeng^{1,2} ZHANG Huiqing³ ZHANG Dongmei^{1,4} LIU Huatao^{1,4} KONG Meng^{1,4} DING Qishuo⁵

(1. Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China
2. Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture (Co-construction by Ministry of Agriculture and Rural Affairs and Shanxi Province), Taiyuan 030031, China
3. School of Management, Metharath University, Pathum Thani 12160, Thailand
4. Shanxi Province Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture, Taiyuan 030031, China
5. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: The problem of soil compaction by agricultural machinery is almost unavoidable, so structural restoration of compacted soils is essential and the freeze-thaw cycle is an effective method for restoring compacted soil. In order to study the role of freeze-thaw cycle + macropore on the recovery of compacted soil, the indoor experiments were carried out to remodel the compacted soil and simulate the macropore by artificial pore measures, the number of freeze-thaw cycles was designed to be different under two soil water contents, the temperature fluctuation of the soil temperature was monitored by using temperature sensors, and at the same time, the changes of the pore and aggregate parameters of the compacted soil before and after the freeze-thaw cycle were compared. The results showed that during the freeze-thaw cycle, the temperature fluctuation of the compacted soil with artificial pores started at three and two cycles under the conditions of high and low water contents, respectively, while the temperature fluctuation of the compacted soil without artificial pores under the same water content conditions appeared at seven and four cycles, and the average scale of the aggregate and the structure coefficient of the compacted soil with artificial pores were all better than those of the compacted soil without artificial pores after freeze-thaw

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2023-07-30
基金项目: 山西省重点研发计划项目(2022ZDYF120、2022ZDYF115)、中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2022C017)和山西省现代农业产业技术体系项目(2023CYJSTX05-19)
作者简介: 贺亭峰(1992—),男,助理研究员,博士,主要从事农田土壤压实与管理研究,E-mail: hetingfeng_543364@126.com
通信作者: 丁启朔(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤耕作力学和压实力学研究,E-mail: qsding@njau.edu.cn

cycles. Artificial pores can change the intensity of freeze-thaw cycles in soil by adjusting the soil temperature fluctuation, and accelerate the process of structural recovery of compacted soil, i. e., the strategy of freeze-thaw cycles + macropores was an effective measure to improve the pore and aggregate structure of soil.

Key words: soil compaction; structural restoration; freeze-thaw cycles; artificial macropore; soil temperature

0 引言

快速的农机化进程引起大面积农田土壤压实,破坏了土壤结构,导致土壤物理肥力损失,空气、水分、营养物质在土壤中存储、运移效率降低,造成了作物大幅减产^[1-2]。从经济发展和社会效益层面,农机压实土壤的问题几乎无法避免^[3-4]。因此,研究压实土壤结构的恢复问题,对改善农田土壤质量、保证作物产量并保障农业机械化可持续发展具有重要的生产实践意义^[5]。

孔隙和团聚体是表征土壤结构的两个重要方面,当前恢复压实土壤结构的非生物(耕作)或生物(生物耕作、冻融循环等)措施中,耕作最常见^[5],通过旋耕或深松可快速破碎压实土壤^[1,6],但重构的土体结构松散^[2],分解后的块状土仍结构致密并缺乏孔隙^[1],只是暂时创造了适合作物生长的物理环境,极易被重新压实^[7];生物耕作则秉承“大孔隙优先”原则,依靠覆盖作物根系在密实土壤中穿插,获得有利于后续作物生长的生物孔隙^[2,8-9],优先恢复了与大孔隙结构直接相关的土壤通气与渗透性,但与孔隙相关性不大的结构与功能则恢复较慢,如团聚体,且该方式对覆盖作物类型和土壤水分条件要求严^[8];冻融循环等土壤结构自然恢复方式^[10],是利用土壤冻结时孔隙中水分发生相变形成冰晶体积膨胀对周围施加的应力^[11-12],挤压土壤颗粒和团聚体至变形、开裂^[13]。JABRO 等^[14]针对表土层的研究证明,冻融循环可以降低压实土壤的渗透阻力,改善土壤结构,是修复土壤压实的有效方法。且冻融循环依赖气候变化,无需投入,修复压实土壤时不造成土壤结构二次损失,但周期长、作用深度浅^[5,14-15]。王一菲等^[16]认为土壤温度波动是土壤冻结、融化的直接动力,因此如何通过调节土壤温度波动增强冻融循环在压实土壤中的作用效果,是高效利用冻融循环等自然恢复力的关键。

压实土壤中,自然恢复力发挥作用的方式分为两大类^[7]:自上而下和从局部到整体。自上而下,是单纯利用土壤的自然恢复力(冻融循环等),优先恢复表面土壤,然后逐步向底层发展。从局部到整体,是通过微扰动土壤的操作(如生物耕作),首先创建部分大孔隙或裂缝,使之成为后续自然恢复力

扩张孔隙空间、分裂大尺度土壤团聚体的基础。SPOOR 等^[17]曾建议,利用小尺度刀具在结构受损区制造裂缝,然后依靠土壤冻融作用完成压实土壤修复。由于缺乏压实土壤恢复数据及相应机制研究,该方法一直没有得到有效的评估。但有学者提出土壤初始结构是冻融作用的主要影响因素之一^[10]。MUNKHOLM 等^[18]的研究显示,冻融作用下孔隙和裂纹优先沿着长且直的大孔隙空间传播。根据 KELLER 等^[7]“从局部到整体”的思想,以及生物耕作提倡的“大孔隙优先”理念^[2,8],本文提出冻融循环 + 大孔隙策略,通过优先在压实土壤中创建大孔隙,为冻融循环扩充孔隙空间、分裂压实团聚体奠定基础,达到调节土壤温度波动,增强土壤冻融作用的目的。

研究冻融循环 + 大孔隙策略作用时,很难直接利用生物耕作控制根系直径、长度、数量及其生长方向等,在压实土壤中制造大孔隙。众多研究曾利用人工孔隙微扰动土壤的特点,模拟大孔隙,研究生物耕作对后续作物生长的影响^[8,19-20]。本研究拟采用人工孔隙措施实现生物耕作目的,在尝试健全压实土壤动态恢复认识的同时,探讨促进冻融循环高效恢复压实土壤结构的策略及其可行性,明确人工孔隙在冻融循环过程中对调节土壤温度的作用,以及冻融循环 + 大孔隙策略对恢复压实土壤孔隙及团聚体等的作用,为压实土壤恢复提供新的思路与方法。

1 材料与方法

选择沙质壤土作为研究对象,其中沙粒(粒径 0.02 ~ 2 mm)质量分数 62.1%、粉粒(粒径 0.002 ~ 0.02 mm)质量分数 26.0%、粘粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)质量分数 11.9%、有机质质量分数 2.852%,重塑压实土壤并基于人工孔隙措施创建大孔隙后,开展冻融循环试验,同时利用温度传感器监测土壤温度波动,并通过对比冻融循环前后压实土壤通气孔隙与团聚体分布情况,明确大孔隙在冻融循环过程中调节压实土壤结构恢复的作用。针对压实土壤样品,试验设计了 3 方面因素:①有无人工孔隙。②样品土壤含水率,包括 80% 田间持水率(80% W_h)和 30% 田间持水率(30% W_h)。③冻融循环次数,分别

为 3、7、10 次。同时设置无人工孔隙的压实土壤样品为对照组,不参与冻融循环。

1.1 土样准备

试验所用土壤取自山西省阳泉市郊区河底镇五架山万丽农场,玉米收获后从田间将耕作层土壤(0~15 cm)取回实验室,剔除根系和石头后,风干、筛分,使土壤团聚体粒径小于 2 mm^[11]。按照汪攀峰等^[21]的方法调配含水率为 15% 的土壤,在导热性较差的 PVC 样筒(外径 160 mm,内径 150 mm,高度 100 mm)中重塑密度为 1.6 g/cm³ 的土壤,代表压实土壤^[19]。试验重复 3 次,共制备 39 个土壤样品。

1.2 人工孔隙

参照李笑吟等^[22]的方法,将土壤样品置于盛水的容器中充分吸水饱和后称量,将饱和土壤置于铺有滤纸的干沙上去重力水后称量,并利用两者的质量差值计算土壤通气孔隙度。需要创建人工孔隙的 18 个土样,按照图 1 所示方法,根据 XIONG 等^[23]设置的人工孔隙密度(3 500 个/m²),按照 STIRZAKER 等^[24]提出的大型生物孔隙平均直径(3.2 mm)选用直径 3 mm 的不锈钢针,完成人工孔隙创建,孔隙长度为 90 mm,数量为 61 个。人工孔隙创建需在土壤完成去重力水称量后,既避免了人工孔隙在土壤饱和过程中坍塌,也减少了饱和状态流动土壤对人工孔隙的堵塞^[25]。随后,通过控制质量保证所有参与冻融循环试验的土壤达到目标含水率(80% W_h 和 30% W_h)后^[20],用保鲜膜包裹并置于冷藏环境保存。人工孔隙的创建只新增了土壤的大孔隙体积,并没有改变土壤的体积及总孔隙度^[7],且通过计算可知,新增人工孔隙的大孔隙度仅为 0.56%,可忽略不计。

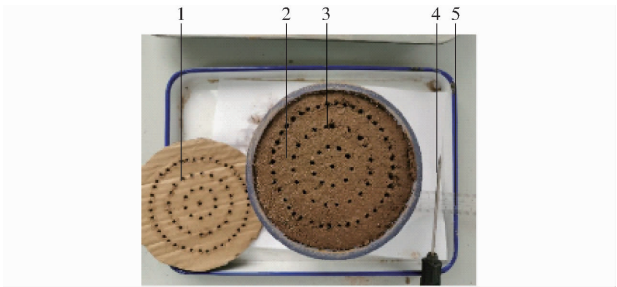


图 1 人工孔隙创建示意图

Fig. 1 Artificial macropore creating

1. 人工孔隙模板 2. 土壤样品 3. 人工孔隙 4. 直径 3 mm 不锈钢针 5. 标尺

1.3 土壤温度监测与冻融循环

开始冻融循环前,首先将制备好的土壤样品置于直径 160 mm 的圆形保温板上,同时按图 2a 所示方式,将温度传感器内嵌于保温板,使传感器与样品

下表面充分接触。土壤温度传感器型号为 PT100,尺寸 7 mm×24 mm×3 mm,量程 -60~270℃,保温板型号 S510,尺寸 ϕ 160 mm×30 mm,导热系数 0.049 W/(m·K)。随后,样品及保温板整体内置于保温绝热桶内(图 2b),只保留土壤上表面与空气直接接触。保温绝热桶由双层铝箔隔热膜及保温棉(保温棉导热系数 0.032 W/(m·K))自制而成,以保证冻融循环试验阶段土壤温度变化均从上表面开始。最后将土样置于温度可调的封闭设备中进行冻融循环试验^[13],根据中国气象局 2000—2023 年山西省阳泉市冬春季的平均昼夜温度(图 3),试验采用 -9℃ 冻结 15 h、5℃ 融化 9 h 的方式完成冻融循环,利用温度传感器及测试系统记录土壤温度波动,同时参考 LIU 等^[13]的试验对相同参数的试验组样品分别设置 3、7、10 次周期的冻融循环。

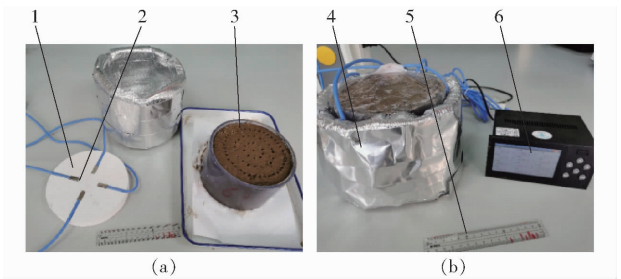


图 2 土壤样品及温度测试系统

Fig. 2 Soil samples and temperature testing system

1. 保温板 2. 温度传感器 3. 土壤样品 4. 置样保温桶 5. 标尺 6. 温控仪

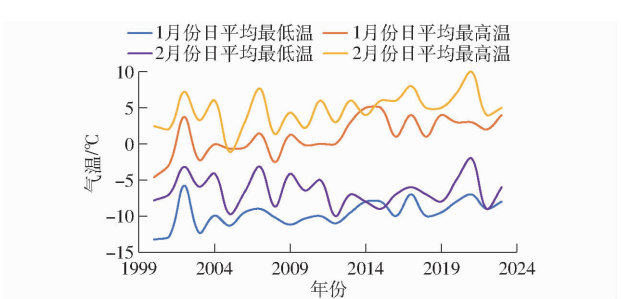


图 3 阳泉市 2000—2023 年 1、2 月份日平均温度

Fig. 3 Average daily temperature in January and February, 2000—2023, in Yangquan City

1.4 土壤通气孔隙与团聚体尺度分布

重复 1.2 节测量土壤饱和和含水率和田间持水率的操作,计算土壤样品的通气孔隙度(有人工孔隙的样品需减去人工孔隙度)。随后将每个样品完整地 从 样 筒 中 顶 出,在 潮 湿 的 状 态 下 沿 着 土 壤 结 构 面 轻轻地掰开、破碎,然后风干。破碎过程中,注意避免造成土壤团聚体的压实。为了减少团聚体的损失,采用干筛法对土壤进行筛分,筛分尺度分别为 >7 mm、5~7 mm、3~5 mm、1~3 mm、0.25~1 mm、0~0.25 mm^[26]。对各级团聚体称量后,计算平均团

聚体尺度(S, mm)^[27]及团聚体结构系数 K ^[26],其中 $K = A/B$, A 为尺度 $0.25 \sim 7 \text{ mm}$ 团聚体总质量, g ; B 为尺度大于 7 mm 或小于 0.25 mm 团聚体总质量, g 。 K 值越高, 土壤结构越优, 土壤整体的物理性状越好。

2 结果与分析

2.1 土壤温度变化

整个冻融循环试验在 -9°C 冻结 15 h , 5°C 融化 9 h 环境中进行, 冻融循环过程中样品土壤下表面温度变化如图 4 所示。由图 4 可知, 试验初期样品土壤温度随环境温度下降至 0°C 左右后较长时间内相对稳定地维持在 0°C 附近, 且无人工孔隙土壤比有人工孔隙土壤维持 0°C 的时间更长。高、低两种含水率状态下, 有人工孔隙的压实土壤分别在第 3 次和第 2 次冻融循环时, 土壤温度开始大幅度波动; 而无人工孔隙的压实土壤分别到了第 7 次和第 4 次冻融循环时, 才发生温度的大幅波动。图 4a 中第 10 次冻融循环时, 土壤温度波动的幅度才接近图 4b 中第 3 次冻融循环时的土壤温度波动。由于水的比热较大, 土壤孔隙中水分在冻结过程中从液态到固态的相变, 需要释放大热量, 只有土壤中所有水分全部相变, 整体温度才会随环境温度继续下降。因此, 有人工孔隙压实土壤底层温度变化至 -4°C 左右时, 无人工孔隙压实土壤底层还停留在 0°C 附近, 直到第 7 次冻融循环时, 底层温度才降低至 -3°C (图 4a、4b), 实现了样品土壤的完全冻结。对比图 4a 与图 4c、图 4b 与图 4d, 冻融循环过程中无论有、无人工孔隙, 高含水率状态下土壤的温度波动均迟于低含水率土壤, 说明土壤含水率是影响土壤在冻融循环过程中温度变化的关键因素, 土壤含水率越高, 冻结阶段转化冰晶所需释放的热量越多, 同等条件下时间也就越长。

2.2 通气孔隙度变化

图 5 为冻融循环前后, 压实土壤通气孔隙度的变化情况。从图 5 可知, 随着冻融循环次数的增加, 压实土壤的通气孔隙度呈增加趋势, 这说明冻融循环具备改善压实土壤孔隙的能力, 但第 7 次和第 10 次冻融循环之间, 土壤通气孔隙度的差异性并不显著, 这表明冻融循环过程也并非无限制地增加土壤通气孔隙度。图 5 表明, 同等条件下高含水率压实土壤的通气孔隙度显著高于低含水率土壤, 但有人工孔隙的压实土壤经过冻融循环后, 通气孔隙度显著高于无人工孔隙的压实土壤, 且有人工孔隙压实土壤 3 次冻融循环后的通气孔隙度均能达到无人工孔隙 7 次冻融循环的效果。结合图 4 中有人工孔隙样品

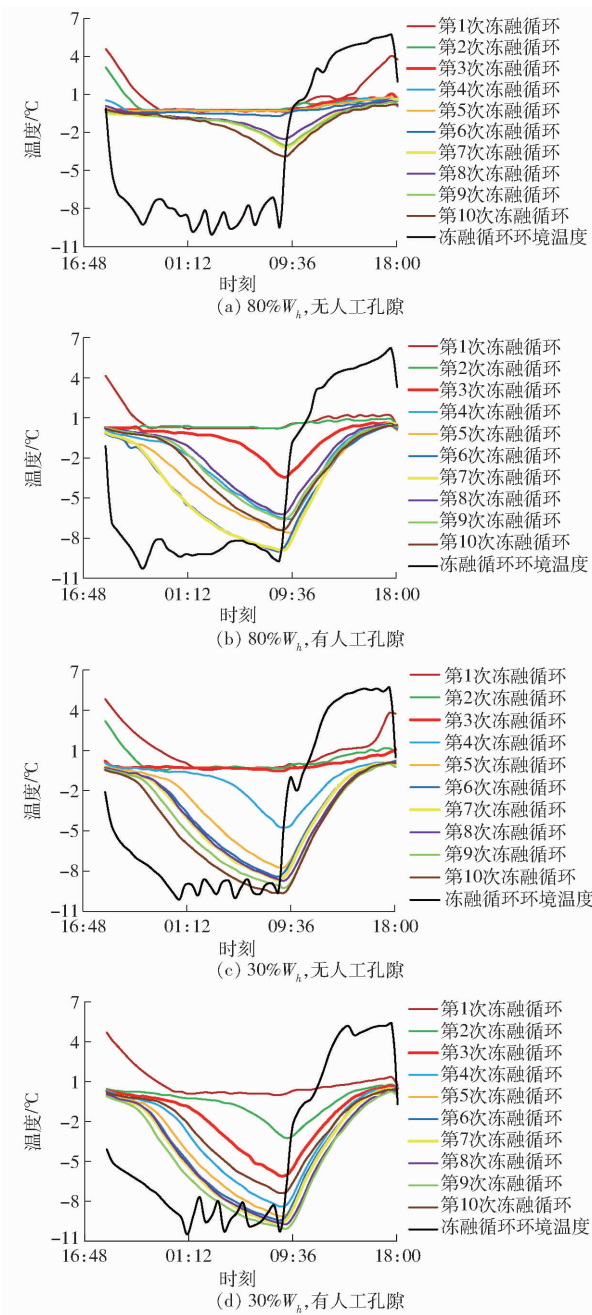


图 4 温度变化曲线

Fig. 4 Temperature change curves

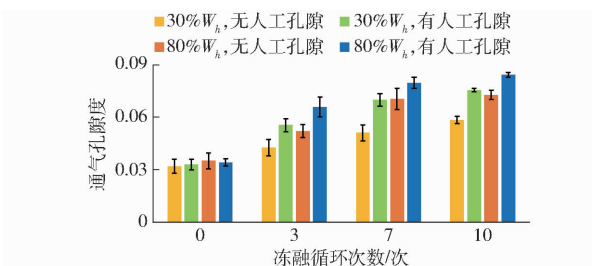


图 5 土壤通气孔隙度

Fig. 5 Soil aeration porosity

土壤温度波动更早、波动幅度更大的现象可知, 压实土壤中的人工孔隙, 调节了冻融循环过程中的土壤温度波动, 加速了土壤水分相变的速度与程度, 更充分地利用冰晶对土壤颗粒和团聚体挤压, 有效扩充

了压实土壤中的孔隙空间。

2.3 团聚体尺度变化

冻融循环前后,两种含水率压实土壤团聚体尺度分布、平均团聚体尺度与结构系数分别如图 6、表 1 所示。未经冻融循环的压实土壤中,尺度大于 7 mm 团聚体质量分数为 84%,平均团聚体尺度达 18.91 mm,结构系数只有 0.16。从图 6、表 1 可知,冻融循环后,压实土壤的团聚体结构得到了有效改善。含水率为 80% W_h 时压实土壤在 3 次冻融循环后,大于 7 mm 团聚体在无人工孔隙和有人工孔隙的压实土壤中,均得到了有效分裂,但不同孔隙条件压实土壤的团聚体尺度分布变化存在较大差异,有人工孔隙状态下的质量分数为 51%,明显低于无人工孔隙状态的 60%,7 次和 10 次冻融循环后,有人工孔隙压实土壤中大于 7 mm 团聚体的质量分数趋近于 20%,而无人工孔隙该级团聚体的质量分数分别为 30% 和 35%。在低含水率条件下,也存在同样的情况。

图 6 显示,多次冻融循环后低含水率压实土壤内 0 ~ 0.25 mm 团聚体的质量分数较高含水率高,且有人工孔隙土壤比无人工孔隙土壤变化更明显。非饱和土壤中水分分布的主要场所是毛细孔隙与非活性孔隙^[28-30],高含水率土壤中占据毛细孔隙的自由水比例较大,低含水率土壤非活性孔隙中束缚水比例较大,基于图 4 中低含水率土壤比高含水率土壤在冻融循环过程中更早出现温度大幅波动的现象可知,低含水率土壤中土壤水分经历的冻结、融化次数更多,因此非活性孔隙等较小孔隙中水分相变对小尺度土壤团聚体的分裂作用更为明显。且低含水率状态下,有人工孔隙压实土壤比无人工孔隙压实

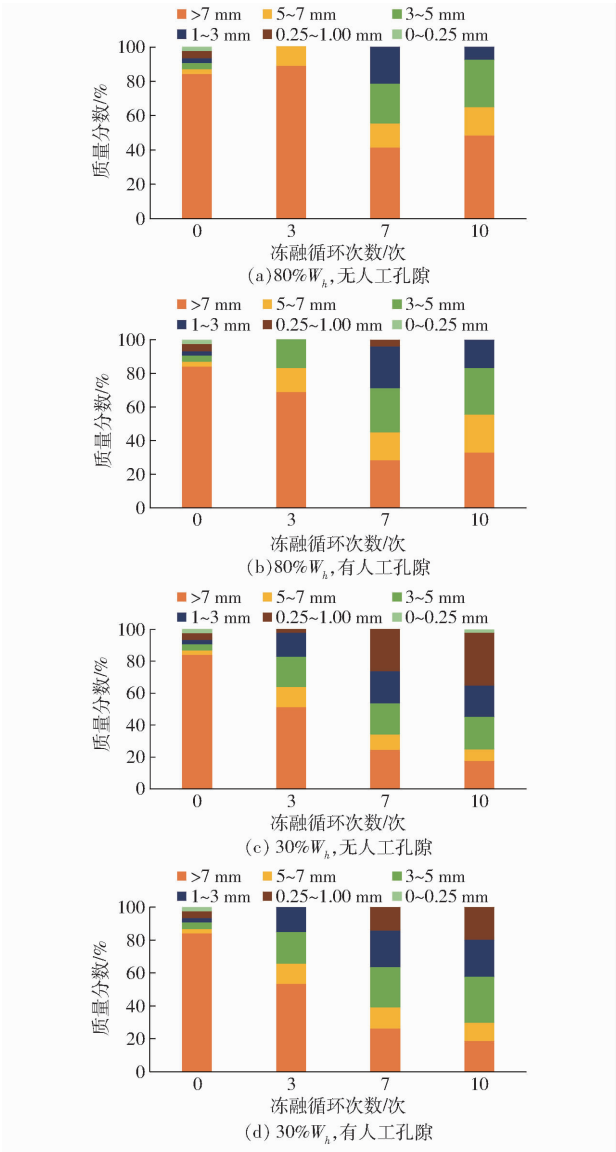


图 6 冻融循环前后压实土壤团聚体尺度分布
Fig.6 Scale distributions of compacted soil aggregates before and after freeze-thaw cycles

表 1 冻融循环前后压实土壤的平均团聚体尺度与结构系数

循环次数/次	压实未冻融		80% 田间持水率				30% 田间持水率			
			无人工孔隙		有人工孔隙		无人工孔隙		有人工孔隙	
	S/mm	K	S/mm	K	S/mm	K	S/mm	K	S/mm	K
0	18.91	0.16								
3			8.58 ^b	0.69 ^b	7.66 ^b	0.77 ^b	8.54 ^b	0.76 ^b	6.49 ^b	1.18 ^b
7			5.35 ^a	1.89 ^a	4.26 ^a	2.79 ^{ab}	7.34 ^{ab}	1.04 ^a	5.62 ^a	1.45 ^a
10			5.97 ^a	1.67 ^a	4.92 ^a	2.53 ^a	6.67 ^a	1.11 ^a	5.26 ^a	1.56 ^a

注:同列数据不同小写字母表示不同冻融循环次数后差异显著($P < 0.05$)。

土壤多经历了 2 次冻融循环(图 4),故图 6d 中尺度 0 ~ 0.25 mm 团聚体的质量分数 3 次冻融循环后就达到 6%,图 6c 中 7 次冻融循环后该尺度团聚体的质量分数仅为 7%。

表 1 显示,冻融循环后有人工孔隙的压实土壤结构总体优于无人工孔隙的压实土壤,且团聚体结

构的显著改善主要出现在 3 次和 7 次冻融循环后,7 次和 10 次冻融循环后团聚体参数间的变化并不显著。冻融循环改善土壤团聚体结构,主要依靠冰晶挤压土壤颗粒或团聚体形成的新孔隙及裂缝,分裂大尺度团聚体。图 5 中通气孔隙度随冻融循环次数的变化趋势表明,两种土壤含水率条件下,有、无人

工孔隙压实土壤在 7 次至 10 次冻融循环间,土壤通气孔隙并无显著性变化,这意味着,该阶段压实土壤内部通过冰晶反复相变对团聚体内或团聚体间的空间扩充作用并不明显,相应团聚体的分裂也不显著。KELLER 等^[7]认为,土壤体积不增加,土壤总孔隙度不会变化,即有限次数的冻融循环只能通过减小更小尺度孔隙的体积,增加土壤通气孔隙度、分裂团聚体。所以,压实土壤中的人工孔隙,可通过调节土壤温度变化、加速土壤水分相变,强化冰晶对周围的挤压作用,并通过扩充土壤团聚体内或团聚体间空间、分裂压实团聚体,达到改善压实土壤结构及其功能的效果。

表 1 中的结构系数变化表明,低含水率压实土壤 3 次冻融循环后的团聚体结构,优于高含水率压实土壤冻融循环 3 次后的团聚体结构,但 7 次和 10 次冻融循环后高含水率土壤结构明显优于低含水率土壤。结合图 4 可知,低含水率状态下,有人工孔隙的压实土壤在第 2 次冻融循环时就发生了大幅度的温度波动,而同等条件下高含水率压实土壤的大幅温度波动则出现在第 3 次。土壤温度波动是土壤冻结、融化的直接动力^[16],当高含水率土壤第 1 次完全被冻结时,低含水率土壤已经在土壤水分与冰晶间相互变化的过程中完成了 2 次对土壤结构的改善。但是,土壤含水率是影响冻融循环恢复压实土壤结构的主要因素之一,高含水率压实土壤经多次冻融循环后的土壤团聚体参数较优。

3 讨论

冻融循环具备恢复压实土壤结构的作用,且土壤含水率是影响冻融循环改善压实土壤结构的主要因素之一,这与文献[5,13-15]的观点一致。土壤温度波动是冻融循环发挥恢复压实土壤作用的关键环节,因为温度是影响土壤中水分相变的直接因素,冻融循环对压实土壤的恢复是利用了土壤水分相变形成冰晶对周围的应力作用^[11],大幅土壤温度波动出现越早,越有利于对压实土壤结构的恢复。压实土壤中的人工孔隙可实现调节土壤温度波动的效果,有人工孔隙的压实土壤只经历较少的冻融循环次数,就可达到较优的土壤孔隙及团聚体状态,因此冻融循环+大孔隙策略首先具备了克服冻融循环恢复压实土壤周期长的能力。

压实土壤中的人工孔隙,有助于调节更深层土壤的温度波动。有人工孔隙的压实土壤下表面更早地开始了大幅土壤温度波动,这意味着这种温度波动完全可以沿着土壤剖面继续向下传递,影响更深层土壤的温度变化,进而通过土壤水分相变改善底

层土壤结构。这与 MIRANDA-VÉLEZ 等^[10]关于土壤初始结构是冻融作用强弱的主要影响因素之一的说法相符,冻融循环+大孔隙策略也具备了克服冻融循环恢复压实土壤作用深度浅的能力。

人工孔隙在冻融循环恢复压实土壤的过程中,只是起到了调节作用,土壤含水率等才是决定结构恢复效果的关键因素。图 4 显示,低含水率条件下,有人工孔隙的压实土壤出现温度大幅波动的时间最早,但经历多次冻融循环作用后,高含水率条件下压实土壤孔隙及团聚体恢复更优。因为冻融循环过程中土壤水分相变的体积膨胀,是恢复压实土壤结构的真正动力^[13],含水率是影响冻融循环恢复压实土壤结构的决定因素,人工孔隙只是通过调节土壤温度波动改变冻融循环在土壤中的作用强度,加速了压实土壤结构恢复的进程。

此外,压实将土壤颗粒从上向下移动,但土壤结构的恢复并不意味着必须沿着同样的路径将土壤颗粒从下往上运输^[7]。孔隙和团聚体是土壤结构最重要的两方面,冻融循环增大了压实土壤的通气孔隙度,减小了其团聚体平均尺度,但土壤的总孔隙度变化却不大,因为冻融循环过程中压实土壤的体积并没有变化,即土壤颗粒与团聚体没有发生从下往上的运动。生物耕作过程中根系对压实土壤的穿插,也与此类似。但耕作利用刀具破碎土壤增加了土壤体积,改变了压实土壤的孔隙与团聚体分布情况^[1-2,6-7]。

本研究还存在以下不足:①为避免田间原状土孔隙及团聚体结构各向异性对冻融循环+大孔隙策略理论基础研究的影响,选择使用重塑土进行试验,后期有必要基于原状土及田间原位土壤继续开展研究。②为便于研究,试验只选择了一种人工孔隙参数,关于人工孔隙直径、长度、密度等参数对冻融循环过程中土壤温度及孔隙、团聚体变化的影响,还有待进一步明确。③冻融循环+大孔隙策略为冻融循环在压实土壤中扩充孔隙空间、分裂大尺度团聚体建立了基础,但该策略调节土壤温度波动、强化冻融循环作用的机制仍不明确,亟待探索。

4 结论

(1)冻融循环过程中,有人工孔隙压实土壤在高、低两种含水率条件下,分别在第 3 次和第 2 次冻融循环时就开始了大幅温度波动,相同含水率条件下无人工孔隙的压实土壤温度大幅波动则出现在第 7 次和第 4 次冻融循环时,人工孔隙在冻融循环过程中起到了调节压实土壤温度波动的作用,提前了土壤温度大幅波动的时间。

(2)有人工孔隙的压实土壤经过多次冻融循环后,通气孔隙与团聚体结构的改善显著优于无人工孔隙的压实土壤,甚至有人工孔隙压实土壤 3 次冻融循环后的通气孔隙度即可达到无人工孔隙 7 次冻融循环的效果,冻融循环 + 大孔隙可改善土壤孔隙

及团聚体结构。
(3)土壤含水率是影响冻融循环恢复压实土壤结构的决定因素,人工孔隙通过调节土壤温度波动改变冻融循环在土壤中的作用强度,加速了压实土壤结构恢复进程。

参 考 文 献

[1] SHAHEB M R, VENKATESH R, SHEARER S A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021,46(4):417 – 439.

[2] ZHANG Z, YAN L, WANG Y, et al. Bio-tillage improves soil physical properties and maize growth in a compacted vertisol by cover crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022,86(2):324 – 337.

[3] 杨敏丽,彭健,金剑,等. 不同农用轮胎对东北黑土区土壤压实的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 85 – 93.
YANG Minli, PENG Jian, JIN Jian, et al. Influence of agricultural tire technology innovation on soil compaction in black region Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 85 – 93. (in Chinese)

[4] MCPHEE J E, ANTILLE D L, TULLBERG J N, et al. Managing soil compaction—a choice of low-mass autonomous vehicles or controlled traffic? [J]. *Biosystems Engineering*, 2020,195:227 – 241.

[5] 任利东,王丽,林琳,等. 农田土壤机械压实研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023,60(3):610 – 626.
REN Lidong, WANG Li, LIN Lin, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(3):610 – 626. (in Chinese)

[6] 钱泳其,熊鹏,王玥凯,等. 不同耕作方式对砂姜黑土孔隙结构特征的影响[J/OL]. *土壤学报*, 2022;1 – 14. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20220713.1314.002.html>.
QIAN Yongqi, XIONG Peng, WANG Yuekai, et al. Effect of tillage practices on soil pore structure characteristics in shajiang black soil[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022; 1 – 14. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20220713.1314.002.html>. (in Chinese)

[7] KELLER T, COLOMBI T, RUIZ S, et al. Soil structure recovery following compaction: short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021,85(4):1002 – 1020.

[8] ZHANG Z, PENG X. Bio-tillage: a new perspective for sustainable agriculture[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021,206:104844.

[9] PULIDO-MONCADA M, KATUWAL S, MUNKHOLM L J. Characterisation of soil pore structure anisotropy caused by the growth of bio-subsoilers[J]. *Geoderma*, 2022,409:115571.

[10] MIRANDA-VÉLEZ J F, LEUTHER F, KÖHNE J M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant cover management practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023,225:105540.

[11] LIU B, MA R, FAN H. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021,206:104810.

[12] LEUTHER F, SCHLUETER S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties[J]. *Soil*, 2021, 7(1):179 – 191.

[13] LIU B, FAN H, JIANG Y, et al. Evaluation of soil macro-aggregate characteristics in response to soil macropore characteristics investigated by X-ray computed tomography under freeze-thaw effects[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225:105559.

[14] JABRO J D, IVERSEN W M, EVANS R G, et al. Repeated freeze-thaw cycle effects on soil compaction in a clay loam in northeastern Montana[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014,78(3):737 – 744.

[15] BESSON A, SÉGER M, GIOT G, et al. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring[J]. *Geoderma*, 2013,204 – 205:130 – 139.

[16] 王一菲,郑粉莉,周秀杰,等. 黑土农田冻结-融化期土壤剖面温度变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019,39(3):57 – 64.
WANG Yifei, ZHEN Fenli, ZHOU Xiujie, et al. Soil profile temperatuer variation in farmlands during freeze-thaw period in mollisol region[J]. *Bullention of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 57 – 64. (in Chinese)

[17] SPOOR G, TIJINK F G J, WEISSKOPF P. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003,73(1):175 – 182.

[18] MUNKHOLM L J, SCHJØNNING P, KAY B D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002,64(1):125 – 135.

[19] COLOMBI T, BRAUN S, KELLER T, et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,574:1283 – 1293.

[20] XIONG P, ZHANG Z, GUO Z, et al. Macropores in a compacted soil impact maize growth at the seedling stage: effects of pore diameter and density[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022,220:105370.

[21] 汪攀峰, 丁启朔. 黏土单层击实试验与制样因子研究[J]. 岩土力学, 2010,31(6):1797–1802.
WANG Panfeng, DING Qishuo. Study of dynamic compaction of monolayer cohesive soil and factors for remolded soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6):1797–1802. (in Chinese)

[22] 李笑吟, 毕华兴, 张志, 等. 晋西黄土区土壤水分有效性分析的克立格法[J]. 土壤学报, 2006, 43(6):1004–1010.
LI Xiaoyin, BI Huaxing, ZHANG Zhi, et al. Kriging theory on the research of soil moisture validation in the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6):1004–1010. (in Chinese)

[23] XIONG P, ZHANG Z, WANG Y, et al. Variable responses of maize roots at the seedling stage to artificial biopores in noncompacted and compacted soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022,22(4):1155–1164.

[24] STIRZAKER R J, PASSIOURA J B, WILMS Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores[J]. Plant and Soil, 1996,185:151–162.

[25] ATKINSON J A, HAWKESFORD M J, WHALLEY W R, et al. Soil strength influences wheat root interactions with soil macropores[J]. Plant Cell and Environment, 2020,43(1):235–245.

[26] ŠIMANSKY V. Soil structure as a significant indirect factor affecting crop yields[J]. Acta Fytotechnica et Zootechnica, 2021, 24:129–136.

[27] 葛双洋. 水稻土深松对土壤物理性质及小麦生长影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
GE Shuangyang. Effect of subsoiling on paddy soil physical properties and growth of wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[28] 曾健, 费良军, 陈琳, 等. 添加 γ -聚谷氨酸对土壤结构及持水特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018,32(1):217–224.
ZENG Jian, FEI Liangjun, CHEN Lin, et al. Effect of γ -PGA on soil structure and water-holding characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(1):217–224. (in Chinese)

[29] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015,46(1):233–238.
SUN Mei, HUANG Yunxiang, SUN Nan, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015,46(1):233–238. (in Chinese)

[30] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019,50(7):333–339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):333–339. (in Chinese)

(上接第 274 页)

[20] LI H, LI J, WEI H, et al. Slim-neck by GSConv: a better design paradigm of detector architectures for autonomous vehicles [EB/OL]. [2022–08–17]. <https://arxiv.org/abs/2206.02424>.

[21] YU Z, HUANG H, CHEN W, et al. YOLO–FaceV2: a scale and occlusion aware face detector[EB/OL]. [2022–08–03]. <https://arxiv.org/abs/2208.01944>.

[22] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904–1916.

[23] LI C, LI L, JIANG H, et al. YOLOv6: a single-stage object detection framework for industrial applications[EB/OL]. [2022–09–07]. <https://arxiv.org/abs/2209.02976>.

[24] GE Z, LIU S, WANG F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[EB/OL]. [2021–08–06]. <https://arxiv.org/abs/2107.08430>.

[25] ZHU X, LYU S, WANG X, et al. TPH–YOLOv5: improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios [C] // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), 2021.

[26] FUENTES A, YOON S, PARK J, et al. Deep learning-based hierarchical cattle behavior recognition with spatio-temporal information[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177:105627.