

DOI: 10.11766/trxb201805230516

# 冻融条件下黑土大孔隙结构特征研究\*

姜 宇 刘 博 范昊明 马仁明<sup>†</sup>

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

**摘 要** 冻融作用会改变土壤微观结构, 孔隙特征的变化是其结构性改变的重要体现。研究冻融作用对开展黑土区侵蚀机理研究及合理利用黑土资源具有重要意义。本研究旨在对冻融条件下原状土样的三维结构进行分析, 获取孔隙特征的定量指标, 进而分析冻融循环对土壤大孔隙的影响, 为进一步揭示黑土区季节性冻融对黑土结构的影响提供证据。通过室内冻融循环试验结合CT扫描技术研究黑土原状土体大孔隙在7种冻融循环次数以及两组含水率下的变化规律, 探讨在冻融循环作用下原状土体大于1.25 mm的孔隙变化特征。结果表明: 在15次冻融循环内, 随着冻融循环次数的增多, 土壤孔隙度不断增大, 在7次冻融循环后增长尤为显著; 孔隙数量随冻融循环次数的增多而减小; 规则孔隙度(RP)持续减小, 不规则孔隙度(IRP)呈减小趋势而加长孔隙度(EP)呈增大趋势; 孔径随冻融循环次数的增多而增大, 孔径大于3 mm的孔隙孔隙度不断增大; 冻融作用使孔隙出现大量分支, 冻融循环次数越多分支占比越大。在冻融温差一定时, 冻融循环后高含水率土壤比低含水率土壤的上述孔隙特征变化更为显著。研究成果为阐明冻融侵蚀机理、合理评价及利用寒区农田提供理论依据。

**关键词** 冻融循环; 黑土; 原状土; CT; 大孔隙

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

冻融循环作为一种温度变化的具体形式, 可以被理解作为一种特殊的强风化作用形式, 对土的物理力学性质有着强烈的影响<sup>[1-4]</sup>。地球上中纬度大部分地区经受季节性冻融作用, 在我国的东北、西北及西南的高海拔地区, 土壤均不同程度地受到冻融作用的影响。黑土在我国东北地区分布广泛, 对工农业生产的作用也极为重要<sup>[5]</sup>。因此, 研究冻融作用对开展黑土区侵蚀机理研究及合理利用黑土资源具有重要意义。

国内外关于冻融作用对土体影响的研究起步较早, 早在1989年Konrad<sup>[6]</sup>提出反复冻融破坏了

土壤颗粒间的联结力, 使土壤颗粒重新排列, 从而改变土的力学性质<sup>[7]</sup>。最初关于冻融作用的研究多是倾向其对工程的影响, 而对于冻融作用对寒区耕地的土壤性质以及冻融侵蚀的影响研究较少。近年来很多研究采用不同的试验方法, 表明冻融作用可以显著降低土壤容重、增加孔隙度、提高饱和导水率, 并且容重的变化与冻土温度和土壤含水率密切相关。邓西民等<sup>[8]</sup>认为由于负温低时会有更多的土壤毛管水和吸附水冻结, 还会引起水分由暖端向冷端迁移聚集冻结, 使容重和孔隙度发生更大的变化。Lawrence<sup>[9]</sup>与Taskin和Ferhan<sup>[10]</sup>

\* 国家自然科学基金项目(41601284)、国家重点研发计划项目(2016YFE0202900)和辽宁省教育厅科学研究项目(LSNYB201610)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41601284), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFE0202900), and the Science Research Project of Education Department of Liaoning (No. LSNYB201610)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: marenming521@hotmail.com

作者简介: 姜宇(1994—), 女, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要研究领域冻融机理、土壤结构。E-mail: 1397133342@qq.com

收稿日期: 2018-05-23; 收到修改稿日期: 2018-07-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-12-30

提出冻融作用会改变土壤性质, 如土壤结构、土壤导水性、容重、团聚体水稳性以及土壤强度等, 进而影响土壤可蚀性因子<sup>[11]</sup>。王恩姮等<sup>[12]</sup>表示, 通常认为反复的冻融作用会使土壤容重减小, 低容重和高含水条件会使土壤表面更易遭受分散和输移, 土壤黏结力减小, 土壤分散力增大, 抗蚀性降低。冻融循环使原状土的结构性得到显著的弱化, 这表现在冻融循环可以使原状土的先期固结压力减小<sup>[13]</sup>、三轴不排水剪切应力应变曲线上的峰值强度逐渐消失<sup>[14]</sup>。

CT扫描技术从医学到土壤学的转移应用, 实现了土壤原状土体孔隙结构的非破坏性研究<sup>[15]</sup>。CT无损扫描结合图像计算机处理技术的发展, 使得土壤孔隙结构的研究更加直接和定量化。近年来, 很多研究利用CT扫描技术对冻土的微细观结构进行研究, 研究主要集中在冻融作用后冻胀裂隙、孔隙率、结构特征变化等方面<sup>[16]</sup>, 但对于黑土区冻融作用下孔隙特征的研究并不多见。王恩姮等<sup>[12]</sup>对不同深度黑土剖面在冻融前后孔隙特征变化进行研究, 研究表明冻融作用对表层黑土结构无显著性影响。夏祥友等<sup>[17]</sup>的研究表明不同冻融循环次数没有对黏化层原状土孔隙特征产生显著影

响。冻融作用对土体结构的影响尤为重要, 而孔隙特征决定了土体的结构, 因此相关研究尤为必要。

本研究应用医用CT技术对冻融条件下原状土样的三维结构进行分析, 获取孔隙特征的定量指标, 进而分析冻融条件下不同冻融循环周期以及不同含水率对土壤大孔隙的影响, 为进一步揭示黑土区季节性冻融对黑土结构的影响奠定基础, 为阐明冻融侵蚀机理以及合理评价、利用寒区农田提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

取土地点为黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县, 地理坐标为126° 18' 43.7796" E, 47° 27' 42.0726" N。土壤理化性质采用常规方法测定<sup>[18]</sup>, 土壤机械组成采用吸管法测定, 土壤质地划分根据美国制划分标准, 土壤容重、饱和持水量、田间持水量和总孔隙度采用环刀法测定, 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定。供试土样相关理化性质如表1所示。

表1 供试土样理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of studied black soil

土壤 Soil	机械组成 Granulometric composition/%			质地 Soil texture	容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	饱和持水量 Saturation moisture capacity /%		总孔隙 度 Total porosity /%	
	砂粒 Sand (2~0.05 mm)	粉粒 Silt (0.05~0.002mm)	黏粒 Clay (<0.002 mm)				田间持水 量Field capacity/%			
								饱和度 Saturation /%		田间持水 量Field capacity/%
黑土 Black soil	16.08	47.57	36.35	粉质壤土	1.05	32.87	55.40	36.17	60.38	

注: 总孔隙度=1-容重/比重Note: Total porosity = 1-Bulk density / Specific gravity

### 1.2 材料与方法

本试验所用土柱为原状土柱, 设置30%、40%两个含水率, 采用0、1、3、5、7、10、15次冻融循环周期, 每个处理设置五个重复。冻融温度按照拜泉县当地气象资料选取-10~7°C进行试验。

试验采用内径为4.8 cm, 高为15 cm的PVC管采集0~15 cm土层范围的原状土体。采样方式为原位静压法, 土柱的上下两端均用保鲜膜封闭, 防止土壤水分散失后干裂, 在采集、运输和试验过程中注意防止对原状土体结构的扰动。将采回的土柱放

置于4°C下恒温保存, 计算配制指定含水率所需要的水量, 用去离子水慢速湿润至土壤中后进行18 h以上的闷土, 达到所要控制的质量含水率, 误差范围控制在3%以内。在闷土期间用保鲜膜覆盖土样以减少含水率的变化。将装有原状土的PVC管放置于连接温控仪温度可调控的冻融机中, 冻融机中放置温度探头, 用以连续观测温度变化来进行不同冻融循环周期的试验。由于自然界中的土壤夜晚冻结, 白天融化, 有一个冻结融化的缓慢过程, 因此本试验采取的是12 h冻结, 12 h融化的缓慢冻结。

### 1.3 CT扫描与图像重建

利用CT扫描技术扫描冻融循环后15 cm的原状土柱, 试验所用CT为Brightspeed16排螺旋CT, 设定扫描参数如下: 管电压120 kV, 管电流400 mA, 扫描时间7.4 s, 扫描层厚度0.625 mm, 获取二维图像分辨率为1.25 mm。将原状土体水平放置在CT扫描仪的支撑板上, X射线管和探测器列围绕着土体旋转360°的过程中, X射线管发出扇形光束穿过土样, 位于X射线管对面的探测器检测衰减的X射线并形成投影, 最后投影值重新组合形成一个图像。原状土体中不同密度的物质将以不同亮度表示, 土壤孔隙就可以清晰的显示出来。应用Image J软件定量分析冻融循环后原状土体的孔隙结构特征。

由于土壤动物(如蚯蚓、蚂蚁等)形成的孔隙直径可达十几甚至几十厘米<sup>[19-20]</sup>, 因此少量土柱中出现特大孔隙孔洞, 为减少其对实验结果

的干扰, 参考CT扫描出的土体结构影像从5个重复试验的土柱中筛选出3个土柱用于分析。由于土柱上部及下部在取样存放处理过程中不可避免受人为扰动, 因此取土柱中间段70张影像, 即0.625 mm×70进行分析。为了避免边界部分的影响, 用Image J软件将土柱的CT扫描横断面切割成19×19像素的中心方块, 对应实际边长为2.38 cm。为准确提取土壤孔隙结构数据, 需要对图像进行二值分割, 但是不同CT切片图像间亮度差别较大, 需利用Image J软件Enhance Contrast功能中的Normalize命令对图像亮度进行归一化处理, 然后进行黑白二值分割。采用全局阈值法对灰度图像作分割处理以获取孔隙(白色)和固体颗粒(黑色)的黑白二值图像。为避免人工或自动选定分割阈值时的不确定性, 处理中依据实际土壤的孔隙度反复调试以确定全局阈值。图1为40%含水率下不同次数冻融循环后土样的二维切片。

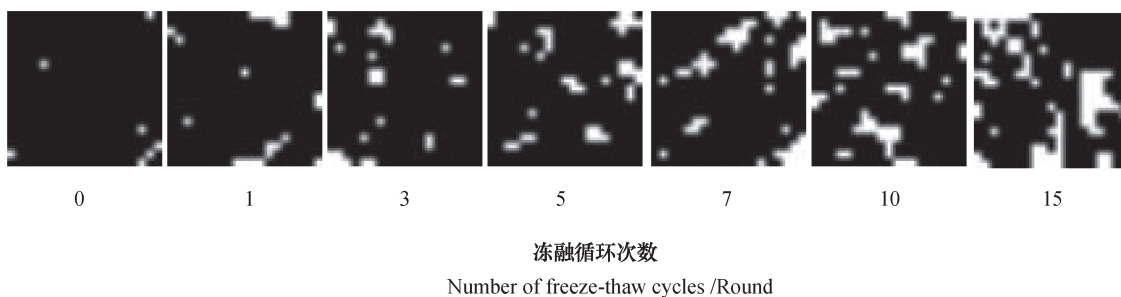


图1 冻融循环后土样的二维切片图像

Fig. 1 2D images of slices of the soil samples after rounds of freeze-thaw cycle

### 1.4 孔隙特征分析方法

土壤孔隙结构分析利用Image J软件中的插件3D object counter来完成。统计孔隙的信息, 包括孔隙的数量(TNP)、孔隙度、孔隙骨架和孔隙当量直径分布。根据计算出的当量直径来确定孔隙形状因子( $F$ )<sup>[21]</sup>:

$$F = A_e / A$$

式中,  $A_e$ 为体积与测得孔隙体积相等的球体的表面积,  $A$ 为测得的孔隙表面积。 $F=1$ 时表示孔隙为一个球体,  $F$ 值越小, 孔隙形状就越不规则越接近长条型。在这项研究中, 将孔隙分类为规则孔隙( $F \geq 0.5$ ), 不规则孔隙( $0.2 < F < 0.5$ )和加长孔隙( $F \leq 0.2$ )<sup>[22-23]</sup>, 各类孔隙体积占总孔隙体积的百分比为规则孔隙度(RP), 不规则孔隙度

(IRP)和加长孔隙度(EP)。

Beven和Germann<sup>[24]</sup>曾给出大孔隙的孔径变化范围大致为0.03~3 mm, 但土壤动物(如蚯蚓、蚂蚁等)形成的孔隙直径可达十几甚至几十厘米, 因此可将这一范围扩至>0.03 mm<sup>[25]</sup>。本文统计1.25 mm以上大孔隙, 将大孔隙分为两级, 1.25 mm~3 mm的大孔隙及>3 mm的超大孔隙。

## 2 结果

### 2.1 土壤结构可视化

图1分别为40%含水率下0次、1次、3次、5次、7次、10次、15次冻融循环处理后的二维图像。从二维图像可以观察到, 随着冻融循环的进

行，孔隙数量不断增多，孔隙面积增大且形状不规则，由此推断土体随冻融循环次数的增加结构逐渐疏松。

为了更直接观察原状土体内部微结构的变化，利用Image J软件对样品中部土体进行三维结构恢复，图2为40%含水率下土样的三维结构，黑色部

分为孔隙，白色部分为固体颗粒。三维孔隙结构更直观的表现出土壤结构在冻融循环作用下的变化特征。结合二维和三维结构图像进行分析，发现在冻融循环作用下，原状土壤结构变得相对疏松，大孔隙体积明显增大，孔隙间连通性得到改善，土体呈现明显的复杂多孔结构。

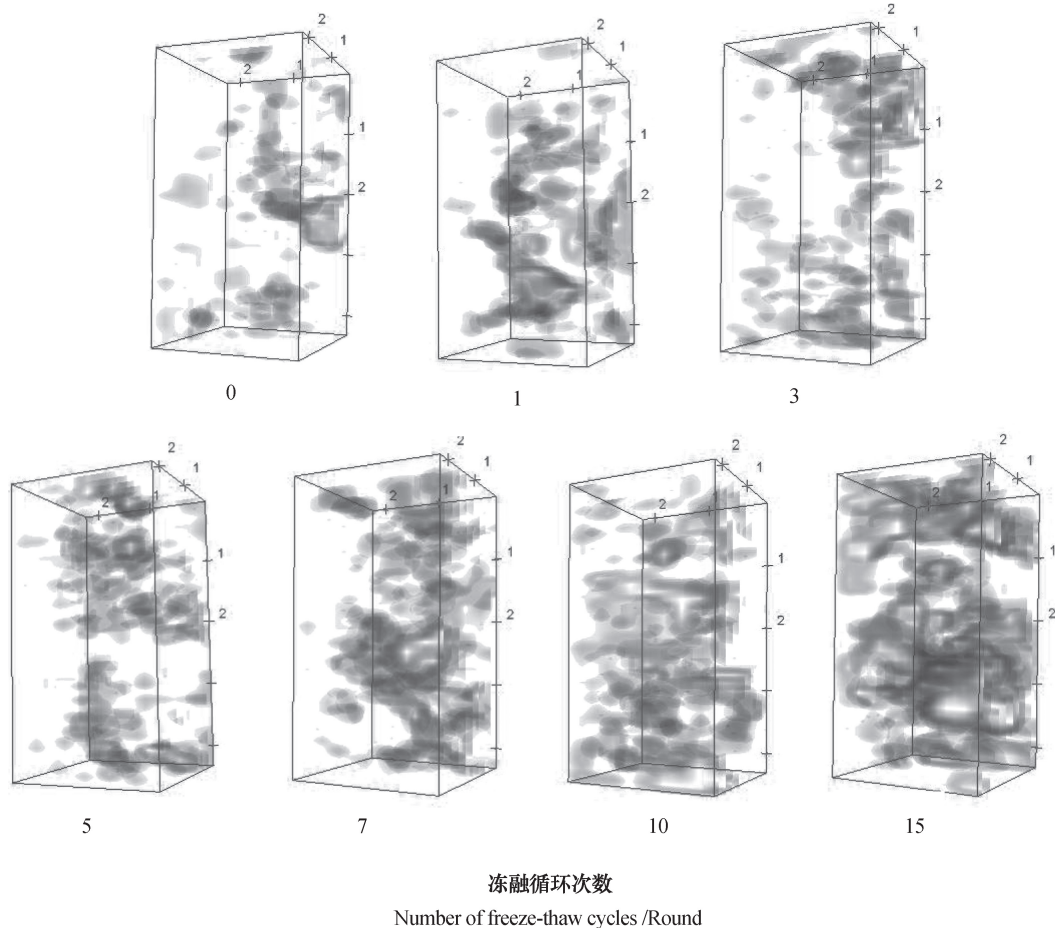


图2 冻融循环后土样的三维孔隙结构

Fig. 2 Three-dimensional images of pore structure of the soil samples after rounds of freeze-thaw cycle

### 2.2 原状土孔隙特征

两组不同含水率土样在冻融循环处理下的孔隙的基本特征如表2所示。由表2可以看出，冻融循环处理下的原状土体孔隙结构参数发生了显著的变化。两组土样的孔隙度均增加，这与刘佳<sup>[26]</sup>、郑郢<sup>[27]</sup>等研究结果相似。随着冻融循环的进行，40%含水率土样孔隙度增加程度均高于30%含水量土样，其中在完成7次冻融循环后，30%含水率的土样的孔隙度增加85.81%，40%含水率土样的孔隙度增加108.5%；在完成15次冻融循环后，30%

含水率的土样的孔隙度增加294.8%，40%含水率土样的孔隙度增加369.6%，孔隙度持续增长。40%含水率土样的孔隙度高于30%含水率土样，在6种处理条件下孔隙度分别高出39.82%、7.78%、2.57%、12.22%、65.00%和18.97%。

TNP在冻融循环处理过程中呈现出减少的趋势。在完成7次冻融循环后，30%含水率的土样TNP减少32.35%，40%含水率土样TNP减少29.41%；在完成15次冻融循环后TNP显著减少 ( $P < 0.05$ )，30%含水率的土样TNP减少67.65%，

表2 冻融循环后土样的孔隙特征

**Table 2** General characteristics of the soil pore systems in the soil samples after rounds of freeze-thaw cycle

含水率 Moisture content /%	冻融循环 Freeze-thaw cycle /Round	孔隙度 Porosity/%	TNP	RP /%	IRP/%	EP/%
30	0	4.58b	102a	25.66a	35.35b	39.09b
	1	5.70Ab	105Aa	20.95Aa	71.82Aa	7.35Bc
	3	7.71Ab	96Aa	13.85Ab	35.48Ab	50.83Aa
	5	8.56Ab	95Aa	11.92Ab	25.31Ab	62.86Aa
	7	8.51Ab	69Aa	10.20Ab	44.19Ab	45.71Bb
	10	12.66Aa	82Aa	6.87Ac	24.55Ab	68.70Aa
40	15	18.08Aa	33Bb	1.99Ac	1.56Cc	96.57Aa
	1	7.97Ab	110Aa	15.93Aa	41.03Bb	43.15Ab
	3	8.31Ab	105Aa	15.85Aa	36.02Ab	48.25Ab
	5	8.78Ab	82Aa	9.44Ab	27.86Ab	62.79Aa
	7	9.55Ab	72Ab	9.66Ab	36.13Bb	54.34Aa
	10	20.89Ab	65Bb	2.83Bc	4.33Bc	92.97Aa
	15	21.51Aa	41Ac	1.85Ac	2.42Bc	95.86Aa

注：不同小写字母表示相同含水率不同冻融循环次数下的数据显著性差异 ( $P<0.05$ )；不同大写字母表示相同冻融循环次数不同含水率下的数据显著性差异 ( $P<0.05$ )。将连通孔隙视为单个孔隙进行TNP的统计 Note: Different lowercase letters mean significant difference ( $P<0.05$ ) between treatments the same in moisture content, but different in number of freeze-thaw cycles, and different uppercase letters represent significant difference ( $P<0.05$ ) between treatments the same in number of freeze-thaw cycles, but different in moisture content. Statistics of TNP with connected pores as single pore

40%含水率土样TNP减少59.80%。两组含水率土样在TNP上并无显著差异。

从孔隙形态来看，RP在冻融循环过程中显著减少 ( $P<0.05$ )。在完成15次冻融循环后30%含水率土样RP减少92.24%、40%含水率土样RP减少92.79%；30%含水率土样IRP减少95.59%、40%含水率土样IRP减少93.15%；30%含水率土样EP增加147.05%、40%含水率土样EP增加145.23%。RP在冻融循环过程中显著减少 ( $P<0.05$ )，两组含水率土样在孔隙规则度上并无显著差异。

以上结果表明在相同含水率条件下冻融循环后土壤孔隙度增大，不规则孔隙度增大。冻融初期，土体快速冻结，冰晶生长体积膨胀，对周围的土颗粒产生挤压；融化时，土骨架部分发生回落坍塌，这将会破坏土颗粒之间的胶结，使土颗粒发生位移甚至破碎变形<sup>[27]</sup>。倪万魁和师华强<sup>[28]</sup>研究表明反复冻融作用使黄土颗粒之间原始固有胶结逐渐减弱，造成黏聚力不断降低。随着冻融循环次数的增加，被冰晶挤压而产生形变的孔隙恢复能力逐渐减

弱，因此孔隙度随冻融循环次数的增加而增大。同一冻融温差条件下，高含水率土壤经过冻融循环后较之低含水率土壤孔隙度更大，但两者数值变化并不显著。在不考虑温差等其他因素情况下，土体中水分含量越大，冻结过程中水分迁移的有效时间越长，由此迁移的水分越多，进一步增加了这种推动作用，从而使土壤冻融作用更为强烈，冻胀更为严重，使得孔隙结构变化的幅度更大一些<sup>[26]</sup>。

孔隙数量与孔隙度是分析孔隙特征经典的两项指标，对于孔隙数量的描述中，由于大多数孔隙的连通导致孔隙数量的确定存在模糊区域，在此引入孔隙骨架用于分析，利用数学方法在三维图像的孔隙骨架中找到孔隙连接的结点，并在结点处将孔隙分隔开，计算出孔隙分支数用以更加准确的描述孔隙数量。由表3可以看出包含分支的孔隙数量与传统计算的孔隙数量随冻融循环的变化趋势相同，但孔隙分支数随着冻融循环次数的增加比重不断增大，表明原有孔隙在冻融作用下产生裂隙出现分支，固态冰的体积比等质量液态水的体积大，当液

态水转变为固态冰时, 冰晶生长体积膨胀, 对周围的土颗粒产生挤压, 这将会破坏土颗粒之间的胶结, 使土颗粒发生位移甚至破碎变形, 同时也会改变孔隙的形态<sup>[2-3, 28-29]</sup>, 随着冻融循环次数的增

多, 孔隙分支所占比例不断增大, 说明随着冻融循环的不断进行, 孔隙出现越来越多的分支, 孔隙结构变化越来越强烈, 结构上不规则且更易破碎变形。

表3 冻融循环后土样的分支数量变化

Table 3 Variation of number of pore branches in for soil samples after rounds of freeze-thaw cycle

冻融循环 Freeze-thaw cycle /Round	30%含水率 30%Moisture content		40%含水率 40%Moisture content	
	孔隙个数 Pore number	孔隙分支占比 Branch percentage/%	孔隙个数 Pore number	孔隙分支占比 Branch percentage/%
	0	188Aa	46Ab	188Aa
1	193Aa	46Ab	225Aa	51Aa
3	211Aa	55Aa	229Aa	54Aa
5	220Aa	57Aa	194Aa	58Aa
7	167Ab	58Aa	169Ab	58Aa
10	191Aa	57Aa	162Bb	60Aa
15	102Bc	68Aa	138Ac	70Aa

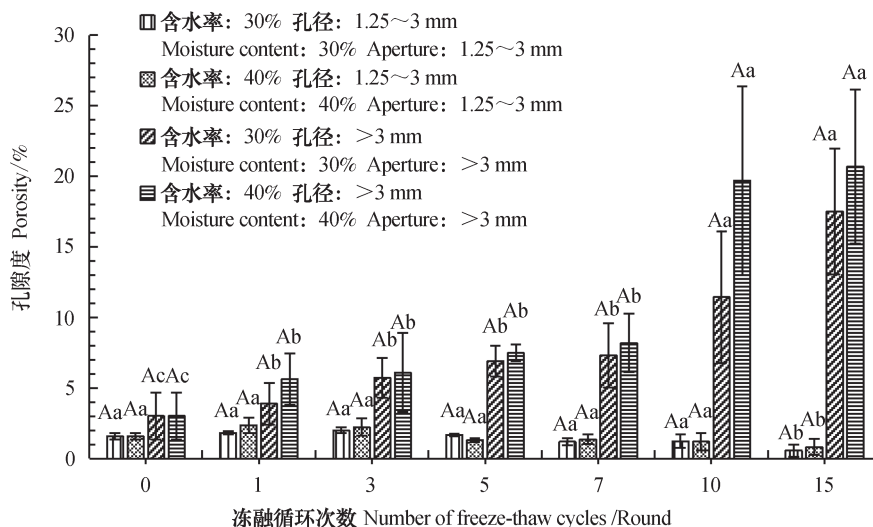
注: 不同小写字母表示相同含水率不同冻融循环次数下的数据显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示相同冻融循环次数不同含水率下的数据显著性差异 ( $P < 0.05$ )。孔隙个数=TNP+分支数量; 孔隙分支占比 (%) = 分支数量/孔隙个数  $\times 100\%$  Note: Different lowercase letters indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatments the same in moisture content, but different in number of freeze-thaw cycles; the different capital letters indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatments the same in freeze-thaw cycles but different in moisture content. Pore number = TNP+The number of branches, Branch percentage (%) = The number of branches / Pore number  $\times 100\%$

由图3表明随着冻融循环次数的增加, 当冻融循环次数达到15次时当量孔径显著增大 ( $P < 0.05$ ) 超大孔隙呈现递增趋势, 而1.25 ~ 3 mm的孔隙呈现递减趋势。对于1.25 ~ 3 mm的孔隙分析可知, 经过1次冻融循环后30%含水率的土样孔隙度增加15.92%, 40%含水率的土样孔隙度增加49.68%; 冻融循环1次以上孔隙度逐渐减小, 7次冻融循环后, 30%含水率的土样孔隙度减小24.20%, 40%含水率的土样孔隙度减小12.74%; 完成15次冻融循环后30%含水率土样孔隙度减小64.33%, 40%含水率土样减小48.41%。随着冻融循环次数的增多, 30%含水率的土样1.25 ~ 3 mm孔隙的孔隙度下降比率高于40%含水率的土样。

对于大于3 mm的孔隙分析可知, 经过1次冻融循环后30%含水率的土样孔隙度增加28.90%, 40%含水率的土样孔隙度增加86.71%; 冻融循环1次以上孔隙度依然增加, 7次冻融循环后, 30%含水率的土样孔隙度增加

143.2%, 40%含水率土样孔隙度增加171.8%; 完成15次冻融循环后30%含水率土样孔隙度增加481.7%, 40%含水率土样增加587.7%。随着冻融循环次数的增多, 40%含水率的土样大于3 mm孔隙的孔隙度上升比率高于30%含水率的土样。

以上结果表明在多次冻融循环过程中, 黑土的孔隙分布发生了明显变化。这是因为土壤水在冻结过程中, 由于变成冰晶体而使土体体积膨胀, 冰晶体充填土壤孔隙, 使得土壤颗粒之间产生推力, 从而会引起孔隙的形变, 冰晶融化时土体固有的胶结与黏聚力使孔隙形状趋于恢复冻结前状态, 而反复的冻融作用导致土体固有胶结逐渐减弱, 黏聚力下降, 一次冻融循环后的孔隙形变越来越大, 因此随着冻融循环次数的增加, 孔径不断增大, 大于3 mm的超大孔隙数量持续增长, 1.25 ~ 3 mm的大孔隙数量减少。而高含水率的超大孔隙数量增长高于低含水率土样, 主要是由于土壤含水量越高, 冰晶



注：不同小写字母表示相同含水率不同冻融循环次数下的数据显著性差异 ( $P < 0.05$ )；不同大写字母表示相同冻融循环次数不同含水率下的数据显著性差异 ( $P < 0.05$ ) Note: Different lowercase letters mean significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatments the same in moisture content, but different in number of freeze-thaw cycles, and different uppercase letters represent significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatments the same in number of freeze-thaw cycles, but different in moisture content

图3 冻融循环后供试土样的孔隙分布

Fig. 3 Pore size distributions in soil samples after rounds of freeze-thaw cycle

体积越大，对土颗粒的推移作用越大。

### 3 结论

冻融作用下土壤孔隙结构的改变受冻融循环次数和含水率的影响呈规律性变化。随着冻融循环次数的增多，土壤孔隙度不断增大，孔隙数量减少。孔径随冻融循环次数的增多而增大，孔径大于3 mm的孔隙孔隙度不断增大而1.25~3 mm的孔隙孔隙度减小。此外，随着冻融循环次数的增加，规则孔隙度持续减小，不规则孔隙度呈减小趋势而加长孔隙度呈增大趋势。在冻融温差一定时，冻融循环后高含水率土壤比低含水率土壤的上述孔隙特征变化更为显著。冻融作用通过对土壤孔隙度，孔隙数量、形状，孔径，孔隙分支的改变来影响土壤孔隙结构，其中，冻融循环次数与含水率是两个重要的影响因素。冻融土壤理化性质的研究关系农业的可持续发展，有待从多方面深入研究，应试从微观角度出发进一步研究冻融条件下团聚体孔隙结构特征以及土壤持水、入渗特性，为研究冻融侵蚀机理、科学合理评价与利用寒区农田提供理论依据。

### 参考文献

[1] 王威娜, 支喜兰, 毛雪松, 等. 冻融循环作用下路基

土回弹模量试验研究. 冰川冻土, 2010, 32(5): 954—959

Wang W N, Zhi X L, Mao X S, et al. Experimental study of resilience modulus of subgrade soil under circles of freezing and thawing (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 954—959

[2] 方丽莉, 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化. 冰川冻土, 2012, 34(2): 435—440

Fang L L, Qi J L, Ma W. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 435—440

[3] 张世民, 李双洋. 青藏粉质黏土冻融循环试验研究. 冰川冻土, 2012, 34(3): 625—631

Zhang S M, Li S Y. Experimental study of the Tibetan silty clay under freeze-thaw cycles (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 625—631

[4] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193—200

Chen S J, Zhao S P, Ma W, et al. Studying frozen soil with CT technology: Present studies and prospects (In Chinese). Journal of Glaciology and

- Geocryology, 2013, 35 (1): 193—200
- [ 5 ] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. 水土保持学报, 2004, 18 (2): 66—70  
Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (2): 66—70
- [ 6 ] Konrad J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16 (3): 291—303
- [ 7 ] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义. 岩石力学工程学报, 2003, 22 (S2): 2690—2694  
Qi J L, Zhang J M, Zhu Y L. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance (In Chinese). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (S2): 2690—2694
- [ 8 ] 邓西民, 王坚, 朱文珊. 冻融作用对犁底层土壤物理性状的影响. 科学通报, 1998, 43 (23): 2538—2541  
Deng X M, Wang J, Zhu W S. Effect of freezing and thawing on physical properties of plough bottom soil (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (23): 2538—2541
- [ 9 ] Lawrence W G. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: Potential impacts on soil erosion. Geomorphology, 2000, 32 (2): 147—160
- [ 10 ] Taskin O, Ferhan F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. Catena, 2003, 52 (1): 1—8
- [ 11 ] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展. 中国水土保持科学, 2003, 1 (4): 50—55  
Fan H M, Cai Q G. Review of research progress in freeze-thaw erosion (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1 (4): 50—55
- [ 12 ] 王恩姮, 卢倩倩, 陈祥伟. 模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响. 土壤学报, 2014, 51 (3): 490—496  
Wang E H, Lu Q Q, Chen X W. Characterization of macro-pores in mollisol profile subjected to simulated freezing-thawing alternation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (3): 490—496
- [ 13 ] Graham J, Au V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22 (1): 69—78
- [ 14 ] Leroueil S, Tardif J, Roy M, et al. Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain Sea Clays. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28 (5): 690—697
- [ 15 ] 冯杰, 郝振纯. CT在土壤大孔隙研究中的应用评述. 灌溉排水, 2000, 19 (3): 71—76  
Feng J, Hao Z C. A summary of CT application in research of soil macropores (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19 (3): 71—76
- [ 16 ] 张英, 邴慧. 基于压汞法的冻融循环对土体孔隙特征影响的试验研究. 冰川冻土, 2015, 37 (1): 169—174  
Zhang Y, Bing H. Experimental study of the effect of freezing-thawing cycles on porosity characters of silty clay by using mercury intrusion porosimetry (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37 (1): 169—174
- [ 17 ] 夏祥友, 王恩姮, 杨小燕, 等. 模拟冻融循环对黑土黏化层孔隙结构的影响. 北京林业大学学报, 2015, 37 (6): 70—76  
Xia X Y, Wang E H, Yang X Y, et al. Pore characteristics of mollisol argillic horizon under simulated freeze-thaw cycles (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37 (6): 70—76
- [ 18 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978  
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil (In Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978
- [ 19 ] Bouma J, Wösten J H M. Characterizing ponded infiltration in a dry cracked clay soil. Hydrology, 1984, 69: 297—304
- [ 20 ] Green R D, Askew G P. Observations on the biological development of macropores in soils of Tomney Marsh. Soil Science, 16 (2): 342—349
- [ 21 ] Waddel H. Volume, shape and roundness of rock particles. Geology, 1932, 40: 443—451
- [ 22 ] 周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微CT研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征. 农业工程学报, 2011, 27 (12): 343—347  
Zhou H, Peng X H, Zhang Z B, et al. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (12): 343—347
- [ 23 ] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. Soil and Tillage Research, 2015, 149: 1—11



- [24] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18 (5): 1311—1325
- [25] 刘伟, 区自清, 应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法. *应用生态学报*, 2001, 12 (3): 465—468  
Liu W, Ou Z Q, Ying P F. Soil macropore and its studying methodology (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (3): 465—468
- [26] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究. *水土保持学报*, 2009, 23 (6): 186—189  
Liu J, Fan H M, Zhou L L, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (6): 186—189
- [27] 郑娜, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法. *冰川冻土*, 2015, 37 (1): 132—137  
Zheng Y, Ma W, Bing H. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach (In Chinese). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37 (1): 132—137
- [28] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响. *冰川冻土*, 2014, 36 (4): 922—927  
Ni W K, Shi H Q. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess (In Chinese). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36 (4): 922—927
- [29] 张调风, 张勃, 刘秀丽, 等. 基于CI指数的甘肃省黄土高原地区气象干旱的变化趋势分析. *冰川冻土*, 2012, 34 (5): 1076—1084  
Zhang T F, Zhang B, Liu X L, et al. Trend analysis of the variation of meteorological drought in Loess Plateau of Gansu Province based on comprehensive meteorological drought index (In Chinese). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34 (5): 1076—1084

## Macropore Structure Characteristics of Black Soil under Freeze-Thaw Condition

JIANG Yu LIU Bo FAN Haoming MA Renming<sup>†</sup>

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract** 【Objective】Freeze-thaw action will change the microstructure of a soil, and the change in pore characteristics is an important reflection of the change in soil structure. Most of the regions along the mid-latitudes on earth are affected by seasonal freeze-thaw processes, especially the black soil in Northeast China. It is of great significance to study mechanism of the erosion on black soil and rational utilization of the black soil resources. So this study is oriented to analyze three-dimensional structure of the soil under freeze-thaw condition, extract quantitative indices of pore characteristics, and then explore effects of freeze-thaw cycle on soil macropores, in an attempt to provide evidence for further revealing influences of seasonal freezing and thawing on soil structure of the black soil area. 【Method】In this paper, through indoor simulation experiment of freeze-thaw cycle and with the aid of the CT scanning technique, changes in macropore in the undisturbed black soil samples under different numbers of freeze-thaw cycles and different moisture contents were studied. Undisturbed soil samples, 0 ~ 15 cm in depth, were collected with PVC pipe from a typical black soil area for the indoor simulation experiment of freeze-thaw cycle, which was designed to have two moisture contents (30% and 40%), and seven levels of freeze-thaw cycles (0, 1, 3, 5, 7, 10 and 15), each ranging in temperature from -10 to 7°C. With the aid of a medical CT, 1.25 mm in resolution, changes in pores > 1.25 mm in pore size were studied. 【Result】Results show that with the increasing number of freeze-thaw cycles, soil porosity continuously increased, especially after the 7<sup>th</sup> freeze-thaw cycles, while the number of pores decreases; regular porosity (RP) and irregular porosity (IRP) continued to decrease, but lengthening porosity (EP) increased; and pore size increased, especially that of those >3 mm in diameter. Besides, freeze-thaw action caused formation of a lot of branches along pores, and the more

the numbers of freeze-thaw cycles, the higher the proportion of branches. Among the soil samples subjected to the same temperature variation in freeze-thaw cycles, those high in soil moisture content changed more significantly in pore characteristics than those low in soil moisture content. 【 Conclusion 】 As affected by freeze-thaw cycle, soil porosity, pore size and pore branching increased, and soil pores changed significantly in shape and distribution. All the findings in this study show that the number of freeze-thaw cycles and soil moisture content are the two major factors affecting pore structure of the soil. Properties of the soils under freeze-thaw cycle is not only a very important research hotspot, but also a major factor concerning sustainable development of the agriculture in Northeast China. In order to reveal mechanism of freeze-thaw erosion of the soil, further study should be done focusing on pore structure characteristics of aggregates and relationships between pore structure characteristics and soil water-holding and infiltration characteristics in the soil under freeze-thaw cycle. The study may provide a theoretical basis for researches on mechanism of freeze-thaw erosion of soil and reasonable evaluation and utilization of farmlands in cold-temperate areas.

**Key words** Freeze-thaw cycle; Black soil; Undisturbed soil; CT; Macropore

( 责任编辑：卢 萍 )