DOI: 10.5846/stxb201805211112

姜宇,范昊明,侯云晴,刘博,郭芯宇,马仁明.基于同步辐射显微 CT 研究冻融循环对黑土团聚体结构特征影响.生态学报,2019,39(11): - . Jiang Y, Fan H M, Hou Y Q, Liu B, Guo X Y, Ma R M. Characterization of aggregate microstructure of black soil with different number of freeze-thaw cycles by synchrotron-based micro-computed tomography. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

基于同步辐射显微 CT 研究冻融循环对黑土团聚体结 构特征影响

姜 宇,范昊明,侯云晴,刘 博,郭芯宇,马仁明*

沈阳农业大学水利学院,沈阳 110866

摘要:在我国东北地区,土壤不同程度的受到季节性冻融的影响。冻融作用会改变土壤微观结构,团聚体作为土壤结构的基本 单元,其结构特征的改变反映了冻融作用对土壤微观结构的影响。同步辐射显微 CT 可以无损获取高分辨率、强对比度的内部 结构图像,是研究土壤团聚体三维微结构的有效手段。采集了室内冻融循环试验下不同冻融循环次数的土壤团聚体样品,应用 同步辐射显微 CT 扫描获取了 3.25 μm 分辨率的团聚体内部结构图像,然后应用 CT 图像处理方法和 Image J 软件观察并定量分 析了团聚体微结构特征。结果表明:随着冻融循环次数的增加,土壤孔隙度不断增大,瘦长型孔隙度占比与>100 μm 的非毛管 孔隙度不断增大;当冻融循环次数达到 7 次以上,团聚体孔隙连通度随冻融循环次数的增加而变大。冻融循环对黑土团聚体孔 隙度、孔隙形状、孔隙分级、连通性等结构特征影响显著。该研究为春季解冻期土壤侵蚀机理的研究及水土流失的防治提供理 论依据。

关键词:冻融循环;黑土;同步辐射微 CT;团聚体;孔隙结构

Characterization of aggregate microstructure of black soil with different number of freeze-thaw cycles by synchrotron-based micro-computed tomography

JIANG Yu, FAN Haoming, HOU Yunqing, LIU Bo, GUO Xinyu, MA Renming * Shenyang Agricultural University, College of Water Resourse, Shenyang 110866, China

Abstract: In Northeast China, seasonal freezing and thawing have been shown to cause significant physical changes in soil. The change in soil microstructure might be attributed to the freeze-thaw action during early spring. The freeze-thaw action affects soil microstructure directly by affecting soil aggregate, which is the basic unit of soil structure. Synchrotron-based X-ray micro-computed tomography can nondestructively capture images of the interior structure with high resolution and strong contrast, and therefore, is an excellent tool to investigate the 3-D microstructure of soil aggregates. Samples of soil aggregates were collected from laboratory freeze-thaw tests with different number of freeze-thaw cycles, and the aggregates were scanned with micro-CT at a resolution of $3.25 \ \mu m$. The microstructure of aggregates was visualized and quantified by the digital image analysis method using Image J software. The results showed that with the increase in number of freeze-thaw cycles, the soil porosity increased, and the proportion of extended pore and pores > 100 μm also increased. When the number of freeze-thaw cycles was >7, the aggregate porosities increased with the increase in number of freeze-thaw cycles. The results showed that the number of freeze-thaw cycles significantly influenced the structural characteristics of black soil aggregates. This study provides a theoretical basis for the study of freeze-thaw erosion and control of soil erosion during thawing in spring.

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0202900);国家自然科学基金项目(41601284);辽宁省教育厅科学研究项目(LSNYB201610)

收稿日期:2018-05-21; 网络出版日期:2018-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: marenming521@ hotmail.com

Key Words: freeze-thaw cycle; black soil; micro-CT; aggregate; microstructure

冻融作用作为一种自然现象普遍存在于中、高纬度及高海拔地区。东北黑土区位于中纬度地带,秋末和 春初易形成土壤季节性融化层与冻土层的周期性变化^[1-2],该周期性变化对土壤结构产生强烈的影响。土壤 结构指土壤中原生颗粒和次生颗粒以及土粒间所构成孔隙的不同排列形式,是维持土壤功能的基础,也是影 响侵蚀过程的重要因素。作为土壤结构重要组成单元的团聚体,其大小分布和稳定性影响着土壤的孔隙性、 持水性、通透性和抗蚀性^[34]。因此,研究冻融作用对黑土团聚体结构特征的影响具有重要意义。

国内外关于冻融循环对团聚体影响的研究已经逐步开展,由于冻融作用对土壤结构会产生影响,因此,冻 融过程被认为是影响团聚体形成和破碎的重要因子。Benoit 研究发现冻融作用对团聚体破碎的影响与冻融 强度、团聚体颗粒大小和团聚体水分含量有关^[5]。Six 则表示冻融过程对团聚体的物理破坏随冻融次数不断 累积,其中大团聚体破碎尤为明显^[6]。此外,关于冻融作用对团聚体影响的研究多侧重于其对团聚体稳定性 的影响。王恩姮等^[7]、范昊明等^[8]在此方面进行研究得出相近的结论,即冻融作用使大团聚体的稳定性降 低,但提高了小粒级团聚体的稳定性。

前人对于冻融作用下团聚体的形成、破碎机制及稳定性变化做了大量研究,但缺乏对团聚体内部孔隙特征的研究,而团聚体孔隙特征决定了团聚体的结构性,因此,开展冻融作用对团聚体孔隙特征影响的研究尤为重要。随着技术的发展,高精度同步辐射 CT 技术对土壤孔隙结构的可量化研究已达到微团聚体尺度^[9-11]。 我国上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)可以进行高分辨率的三维成像,为三维土壤微 结构研究提供了条件。本研究利用上海光源同步辐射显微 CT 对冻融作用下 5—7 mm 的大团聚体的三维结 构进行分析,获取孔隙特征的定性、定量指标,进而分析不同冻融循环周期对土壤大团聚体孔隙结构特征的影 响。为进一步揭示黑土区季节性冻融对黑土结构的影响以及水土流失的防治提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点与样品采集

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。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,采集后将土柱的 上下两端均用保鲜膜封闭,防止土壤水分快速散失发生干裂;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。

冻融试验前,将原状土柱置于 4°C 下恒温保存。利用去离子水慢速湿润至土壤中,然后进行 18 h 以上的 闷土处理,达到 40%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包裹土样以减少含水率的 变化。将装有原状土的 PVC 管置于温度可调控的冻融机中,进行不同冻融循环周期的试验。

每年的11月份到次年3月份,黑土一般处于冻结状态;3—5月份,0—20 cm 土层内温度变动于0°C 上下,表现出"昼融夜冻"的特点^[12]。结合拜泉县当地气象资料,设置冻融温度为-10—7°C。该温度下当地冻融周期为20天左右,因此试验设置冻融循环周期为0、1、3、5、7、10、15 次和20次。为确保试验过程中土柱可完全冻结、融化,本试验采取的是12h冻结,12h融化的缓慢冻融过程。完成冻融循环后将土壤风干过筛,获取5—7 mm 团聚体用于结构的测定。

土壤理化性质采用常规方法测定(土壤理化分析 1978);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。

1.2 CT 扫描和图像重建

本试验样品图像的获取利用上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)的同步辐射显微 CT 完成,光子能量设置为 30000 eV,分辨率为 3.25 μm,曝光时间为 1.8 s,样品台与探测器距离为 15 cm。将

样品固定在样品台上,样品台在水平方向从0到180°匀速旋转,每个样品采集1440张图像。图像重建利用上海光源PITRE软件完成。PITRE软件处理图像首先对图像进行相位恢复,然后将12位投影图像(图1a)转换为16位,生成正弦图像(图1b),然后利用背投影算法重建获取切片图像(图1c)。重建后将切片图像存储为8位 tiff 格式。三维团聚体结构(图1d)的可视化利用 Image J 完成。

Table 1 The physical and chemical properties of studied black soil											
	机械组成			应重	有机质	饱和持水量	田间共业县				
Granulo	Granulometric composition/%			台里 Dulla danaita /	Organic	Saturation	四回付小里 E:11	总孔隙度			
砂粒	粉粒	黏粒	Soil texture	(g/cm ³)	matter/	moisture	capacity/%	Total porosity/%			
Sand	Silt	Clay			(g/kg)	capacity/%					
16.08	47.57	36.35	粉质壤土	1.05	32.87	55.40	36.17	60.38			

表1 供试土样理化性质

总孔隙度=1-容重/比重;砂粒为0.05-2 mm的土壤颗粒、粉粒为0.002-0.05 mm的土壤颗粒、黏粒为<0.002 mm的土壤颗粒



图 1 土壤团聚体的投影、正弦、切片和三维结构图像 Fig.1 Radiograph, sino, reconstructed slices and 3-D structure of soil aggregate

1.3 图像处理

图像分割是实现数字图像定量分析的必要和关键步骤。由于每个样品包含大量的切片,必须通过批量化 处理提高效率。但是不同 CT 切片图像间亮度差别较大,首先利用 Image J 软件中的 Normalize 命令对图像进 行归一化处理。对灰度图像的二值分割是土壤结构定量分析的关键,不同分割方法对土壤结构特征分析结果 影响很大^[13]。为了准确提取土壤孔隙结构数据,比对多种分割模式后采用采用全局阈值法,结合实际的土壤 孔隙度反复调试确定每个图像的分割阈值。

1.4 孔隙结构分析

为了避免边界部分的影响,选取团聚体中间部分 500×500×500 体元进行图像分析。土壤孔隙结构分析 利用 Image J 软件完成。利用 Bone J 插件计算土壤孔隙的孔隙骨架、分形维数、孔隙连通度。利用 3D suit 将 相连的孔隙从孔隙网络中提取出来后计算孔隙的数量、体积、长度、面积等。按孔隙当量直径将孔隙分为 3 个 等级:非毛管孔隙>100 μm;毛管孔隙 30—100 μm;贮存孔隙<30 μm,分别统计出其相应分级孔隙度。孔隙数

(1)

量是外部孔隙和内部孔隙数量之和。孔隙节点为多个孔隙的连接点。通过公式(1)来计算孔隙形状系数 (F)^[14]。

$$F = Ae/A$$

式中, Ae 为体积与测得孔隙体积相等的球体的表面积, mA 为孔隙的实测表面积。按孔隙形状系数将孔隙分为三类:规则型($F \ge 0.5$), 不规则型(0.2 < F < 0.5)和瘦长型($F \le 0.2$)^[15-16]。

分形维数和连通性能够量化不同处理团聚体微结构的差异,很好地反映孔隙网络状况。三维分形维数反映了物体的自相似性和占有空间的有效性,分形维数越大表明该物体结构越复杂,且其值介于 2—3 之间。孔隙系统的连通性通过计算欧拉特征值(Euler-Poincaré,Ev)来体现,数值越小则孔隙系统连通性越高^[9]。本研究中分形维数与欧拉特征值均利用 Image J 软件获得。

1.5 统计分析

由于试验机时的限制,本研究每组冻融循环采集3个样品进行分析。在数据处理过程中将这3个样品作为3个重复进行分析。利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,多重比较利用 LSD 法,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体可视化

图 2 是不同冻融循环次数下团聚体内部结构的二维和三维图像。不同冻融循环次数下团聚体的二维形态有明显的差异(二维图中白色部分为孔隙,黑色部分为固体颗粒)。如图所示,0 次冻融循环下的土壤团聚体结构比较致密,随着冻融循环次数的增加,土壤团聚体结构则相对疏松,形成明显的大孔隙结构,中、小孔隙减少。从二维图像可以看出未经冻融时团聚体孔隙以小孔隙为主,随着冻融循环次数的增加孔隙不断增大,5 次冻融循环后团聚体出现明显裂隙,孔隙相连,随着冻融循环次数的增多,该现象越为明显。0 次冻融循环下的土壤大团聚体内部观察不到中、小团聚体的轮廓和边界。当冻融循环次数达到 15 次时,团聚体内部孔隙连通呈现网络状,连通的网络状孔隙将大团聚体内部固体颗粒分离,在大团聚体内部可以观察到明显的小团聚体结构。

如图 2 所示,随着冻融循环次数的增加,团聚体孔隙度明显增大。此外,三维图像中黄色部分为立方体边 缘孔隙,紫色部分为内部孔隙。从立方体边缘黄色部分的孔隙可以看出,随着冻融循环次数的增加,3 次冻融 循环后团聚体内部孔隙个体显著增大,单个孔隙在不断增大的同时与相邻孔隙相连通。团聚体内部出现裂 隙,孔隙连通度增大,这与二维图像显示结果一致。图像观察表明,多次冻融循环后,团聚体内部孔隙增大,连 通性增强,团聚体内部由于孔隙的连通呈现网络状结构。

2.2 团聚体孔隙基本特征

通过 CT 扫描和数字图像处理技术,不仅可以直观可视化研究土壤团聚体的三维结构,还可以定量表征 团聚体内部孔隙的连通性和复杂性^[17-18]。由于显微 CT 图像分辨率为 3.25 μm,不能分辨出更小的孔隙,所以 本文仅研究大于 3.25 μm 的孔隙。表 2 为团聚体孔隙的相关参数。

如表 2 所示, 孔隙数量随冻融循环次数的变化并无明显规律。孔隙节点数量随冻融循环次数的增加呈增 多趋势, 在 5 次循环以内, 孔隙节点数量无规律波动, 但达到 7 次冻融循环以上孔隙节点数量较 5 次以内明显 增大, 说明 7 次以上的冻融循环导致孔隙分支增多。

随着冻融循环次数的增加,土壤团聚体孔隙度不断增大,孔隙度由0次冻融循环后的7.8%增加至20次 冻融循环后的23.34%。1次冻融循环后孔隙度增加了7.69%;3次冻融循环后孔隙度增加了77.56%;5次冻 融循环后孔隙度增加了96.03%;7次冻融循环后孔隙度增加了92.95%;10次冻融循环后孔隙度增加了 142.82%;15次冻融循环后孔隙度增加了206.79%;20次冻融循环后孔隙度增加了199.23%。数据表明,5次 冻融循环与7次冻融循环对团聚体孔隙度影响相近;15次冻融循环与20次冻融循环对团聚体孔隙度影响 相近。



图 2 不同冻融循环次数下土壤团聚体二维和三维结构

Fig.2 2D and 3D visualizations of soil aggregate structures under different freeze-thaw cycles

在7次冻融循环以内,欧拉特征值增减并无规律,7次冻融循环后,欧拉值随冻融循环次数增加而减小, 孔隙连通度增大,分形维数值先减小后增大,说明团聚体内部的复杂程度随着冻融循环次数的增加降低而后 增大最后趋于平稳。

表 2	不同冻融循环次数下土壤团聚体孔隙基本结构参数

Table 2 General properties of soil pore network of aggregates under different freeze-thaw cycles										
冻融循环/次 Freeze-thaw cycle	0	1	3	5	7	10	15	20		
孔隙数量 Pore quantity/个	26790a	20620a	36090a	8838a	26039a	10356a	8775a	7795a		
孔隙度 Porosity/%	7.80d	8.40c	13.85b	15.29b	15.05b	18.94ab	23.93a	23.34a		
孔隙节点数量 Pore node quantity/个	8154a	9393a	7505a	6732a	10219a	10824a	11953a	10644a		
内部孔隙数量 Internal pore quantity/个	24774a	19044a	34172a	8172a	24263a	10799a	8055a	7094a		
欧拉值 Euler number(Ev)	23550a	16516a	32917a	6315a	20397a	5944a	3762b	3040b		
分形维数 Fractal dimension	2.69a	2.66a	2.64a	2.60a	2.71a	2.67a	2.73a	2.67a		

同一行不同小写字母表示差异显著(P<0.05,LSD)

2.3 团聚体孔隙分布特征

图 3 为不同冻融循环次数下土壤团聚体孔隙大小分布。如图所示,孔径大小分布以>100 µm 孔径的非毛

管孔隙为主,占总孔隙度 60%以上。数据表明,孔径<30 μm 的孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度有所减 小,相较于 0 次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15 次和 20 次冻融循环后孔隙度分别减小 22.22%、7.78%、 65.56%、13.33%、62.22%、67.78%和 64.44%。孔径在 30—100 μm 的孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度有 所减小,相较于 0 次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15 次和 20 次冻融循环后孔隙度分别减小 30.54%、 56.16%、68.47%、47.78%、74.88%、78.33%和 75.86%。孔径>100 μm 的孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度 有所增大,相较于 0 次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15 次和 20 次冻融循环后孔隙度分别增加 29.42%、 149.79%、195.06%、171.81%、272.43%、377.37%和 363.58%。随着冻融循环次数的增加,>100 μm 孔径的非 毛管孔隙孔隙度不断增大;30—100 μm 的毛管孔隙孔隙度不断减小;<30 μm 的贮存孔隙在 7 次冻融循环后 稳定在总孔隙度的 2%以下。



2.4 土壤团聚体孔隙形状特征

土壤孔隙形状影响着土壤的水力特性,尤其是瘦长型孔隙,由于其较大的孔壁表面积,更有利于水分和气体的存储^[19]。图4表明,瘦长型孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度增大,相较于0次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15次和20次冻融循环后孔隙度分别增加17.02%、48.45%、63.20%、53.56%、67.22%、68.56%和69.19%。不规则型孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度有所减小,相较于0次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15次和20次冻融循环后孔隙度分别减小23.13%、68.99%、84.71%、72.40%、89.93%、91.28%和93.06%。规则型孔隙随着冻融循环次数的增加孔隙度有所减小,相较于0次冻融循环的团聚体,1、3、5、7、10、15次和20次冻融循环后孔隙度分别减小20.25%、48.53%、78.5%、64.67%、83.94%、86.80%和85.01%。瘦长型孔隙为土壤团聚体孔隙的主要形态,其所占孔隙度大约为60%,且经过冻融处理后瘦长型孔隙度不断提高后趋于稳定,20次冻融循环后瘦长型孔隙占总孔隙度96%。而规则型和不规则孔隙所占孔隙度比例呈现出相反的趋势。这与图1中观察到的现象一致。随着冻融循环次数的增加,土壤团聚体中产生了更多的细长的不规则的孔隙,呈现明显的复杂多孔结构。

3 讨论

土体的冻融过程,实质上就是土中水的冻结和融化过程,当土中水冻结时,体积膨胀,使得土颗粒间的孔



图 4 不同冻融循环次数下土壤团聚体孔隙形状分布

Fig.4 Pore shape distribution of soil aggregates under different freeze-thaw cycles

同一孔隙形状的不同小写字母表示差异显著(P<0.05,LSD);各型孔隙体积占总孔隙体积的百分比为规则型孔隙度,不规则型孔隙度和瘦长型孔隙度。RP:规则型孔隙度,Regular porosity;IRP:不规则型孔隙度,Irregular porosity;EP:瘦长型孔隙度,Extended pore

隙体积增大,而当冰融化时,孔隙体积减小,所以冻融过程将会改变土颗粒间的结构联接,排列方式,从而改变 土壤结构^[20-21]。此外,冻融作用会造成土颗粒之间原始固有胶结逐渐减弱,黏聚力不断降低^[22]。

孔隙度是受冻融循环影响最基础、直观的孔隙特征参数。冻融初期,未经过冻融循环的团聚体孔隙内含 有一定水分。冻融循环开始时,孔隙中的水转化成冰,体积增大,导致团聚体孔隙变大;冰晶融化时,孔隙未能 恢复冻结前状态,此过程循环往复。此外,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。以上两个因素导致孔隙体积不断增大,团聚体孔隙度随冻融循环次数的增多持续增长状态。当冻 融循环达到 15 次以后原有的结构已经被改变,团聚体内部裂隙明显,在大团聚体内部形成多个小团聚体,达 到新的稳定状态,受冻融循环的影响减小甚至不再受其影响。但在试验过程中发现此时的大团聚体结构脆 弱,极易破碎。多次的冻融循环使得土壤孔隙结构不断变化,但当冻融循环次数在 15 次以上时孔隙结构变化 不再明显。

在冻融循环过程中孔隙数量并未随冻融循环次数增加呈现规律性变化。该现象是由于在水与冰的相变 过程中除孔隙体积的增长外也会有新的孔隙形成,因此孔隙数量随冻融循环次数的增加并无规律性变化;从 切片分析结果来看,内部孔隙数量与外部孔隙数量变化也无规律性变化。而孔隙节点数量增加是由于冻融循 环导致孔隙出现裂隙或者多个孔隙由于不断扩大相连,这与瘦长型孔隙孔隙度占比不断增大原理相同。

连通性与分形维数能很好的反应团聚体形态结构的变化^[4]。欧拉指数判定孔隙连通性结果表明,冻融循环次数达到7次以上有改善团聚体孔隙连通性的作用,而分形维数并未受冻融循环影响呈现规律性变化。

受冻融作用的影响,非毛管孔隙、毛管孔隙和贮存孔隙的孔隙度变化显著。冻融作用对土壤结构的改变 在不同冻融循环次数下有所不同,由于该过程对团聚体内部结构的改变存在着复杂的不确定性,因此在3、5 次和7次冻融循环下孔隙分级的规律性略微不同,但7次冻融循环后规律清晰,整体趋势显著。非毛管孔隙 度比例随冻融循环次数增加不断增大,而毛管孔隙与贮存孔隙占比不断减小,该现象是由于冻融作用的循环 往复导致小孔隙体积增大,促进了大孔隙的形成,进而使非毛管孔隙、毛管孔隙和贮存孔隙的占比产生变化。 而土壤团聚体大孔隙的形成,进一步导致水分运移速率增加。孔径较大的大孔隙具有较强的水力传导性,但 这种促进作用是有限的,孔隙之间的连通性也是决定水流运移速率的主要因素^[23]。因此,冻融循环对水分运 移速率的增加产生一定促进作用。 冻融循环对孔隙形状可产生影响。结合图 2 中二维、三维图像与图 4 的定性、定量分析表明,随着冻融循环次数的增加,规则孔隙与不规则孔隙的孔隙度占比均减小,而瘦长型孔隙占比显著增大,这与冻融循环造成大团聚体内部产生裂隙直接相关。此外,原本的单个孔隙相连通也使得孔隙形状更趋近于瘦长型,造成规则与不规则孔隙的占比减小。由于瘦长型孔隙的增多更有利于水分与气体的存储^[20],因此,冻融循环对土壤水分与气体的存储和运移产生一定影响。

4 结论

本文利用同步辐射显微 CT 和数字图像处理与分析技术研究团聚体三维微结构,实现了团聚体内部孔隙 结构的可视化。结果表明,随着冻融循环次数的增加,团聚体孔隙度增大,在15 次冻融循环后趋于稳定;瘦长 型孔隙孔隙度占比增加,规则与不规则孔隙趋势相反;>100 µm 孔隙占比不断增大;孔隙连通性在7 次冻融循 环后显著改善;孔隙节点数量随冻融循环次数的增加而增大;孔隙数量和分形维数无显著性变化。该研究为 冻融侵蚀的研究以及春季解冻期水土流失的防治提供理论依据。此外,冻融循环对黑土团聚体孔隙特征产生 影响的同时,对土壤水分的存储与运移以及团聚体破碎机制产生一定影响,而国内外关于该方面影响的研究 尚且不足,有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 程国栋. 中国冻土研究近今进展. 地理学报, 1990, 45(2): 220-224.
- [2] Gong J D, Qi X S, Xie Z K, Wang Y J. Effect of seasonal freezing on soil moisture and its significance for agriculture. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 1997, 19(4): 328-333.
- [3] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [4] 赵冬,许明祥,刘国彬,张蓉蓉,脱登峰.用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征.农业工程学报,2016,32(9): 123-129.
- [5] Benoit G R. Effect of freeze-thaw cycles on aggregate stability and hydraulic conductivity of three soil aggregate sizes. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(1): 3-5.
- [6] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [7] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1744-1750.
- [8] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of northeast China. Pedosphere, 2014, 24(2): 285-290.
- [9] Dal Ferro N, Charrier P, Morari F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment. Geoderma, 2013, 204-205(4/5): 84-93.
- [10] San José Martínez F, Martín M A, Caniego F J, Tuller M, Guber A, Pachepsky Y, C. García-Gutiérr C. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. Geoderma, 2010, 156(1/2): 32-42.
- [11] Zhou H, Peng X, Peth S, Xiao T Q. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based microcomputed tomography. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 17-23.
- [12] 范吴明,张瑞芳,周丽丽,武敏,刘艳华. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 48-53.
- [13] Iassonov P, Gebrenegus T, Tuller M. Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. Water Resources Research, 2009, 45(9): W09415.
- [14] Waddel H. Volume, shape, and roundness of rock particles. The Journal of Geology, 1932, 40(5): 443-451.
- [15] 周虎, 彭新华, 张中彬, 王亮亮, 肖体乔, 彭冠云. 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, 2012, 27(12): 343-347.
- [16] Ma R M, Cai C F, Li Z X, Wang J G, Xiao T Q, Peng G Y, Yang W. 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.
- [17] Dal Ferro N, Delmas P, Duwig C, Simonetti G, Morari F. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments. Soil and Tillage Research, 2012, 119: 13-21.
- [18] Garbout A, Munkholm L J, Hansen S B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. Soil and Tillage Research, 2013, 128: 104-109.
- [19] Lebron I, Suarez D, Schaap M. Soil pore size and geometry as a result of aggregate-size distribution and chemical composition. Soil Science, 2002, 167(3): 165-172.
- [20] Konrad J M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16(3): 291-303.
- [21] 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. 岩石力学与工程学报, 2004, 22(S2): 2690-2694.
- [22] 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.
- [23] 骆紫藤,牛健植,孟晨,张英虎,杜晓睛,蔺星娜,贾京伟.华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响.水 土保持学报,2016,30(3):305-308,316.