

模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响^{*}

王恩姮 卢倩倩 陈祥伟[†]

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 以东北典型黑土区耕地土壤为研究对象, 采用室内模拟冻融以及 CT (Computerized tomography) 扫描相结合的方法, 通过大孔隙数目、平均面积、Feret 直径以及成圆率 4 个指标的量化与分析, 研究了冻融循环对不同深度范围土层 (0 ~ 40 cm, 40 ~ 80 cm, 120 ~ 160 cm) 土壤大孔隙特征的影响规律。结果表明: 冻融循环没有对表层土壤大孔隙结构产生影响, 却能够显著降低 40 ~ 80 cm 土层范围内平均大孔隙面积以及 Feret 直径, 降幅分别为 46. 72% 和 17. 32% ($p < 0. 05$), 且以 1 ~ 2 mm 和 ≥ 5 mm 的孔隙对冻融循环响应最为强烈, 冻融循环后分别降低 9. 58% 和 42. 19% ($p < 0. 05$)。研究结果不仅证明了黏化层滞水效应的可能, 同时探明了黏化层孔隙结构对冻融循环的敏感性, 由此印证了季节性冻融循环对黏化层抗蚀性的削弱以及黏化层的滞水效应是导致黑土区地表侵蚀与沟蚀的主要原因。

关键词 黑土; 冻融循环; CT; 大孔隙; 黏化层

中图分类号 S152 **文献标识码** A

土壤结构最初被简单定义为固体初级颗粒、次级颗粒的空间排列^[1], 随后其概念逐渐改进, 至今普遍理解为土壤固体颗粒与孔隙的空间排列^[2-3], 因此, 对土壤结构的研究除了要着眼于土壤团聚体及其稳定性, 还要继续对孔隙大小、形状、连接等结构特征进一步深入探讨。有关土壤孔隙的传统定量研究方法主要是通过土壤水分特征曲线的测定来间接实现^[4]。但该方法的缺点在于对土壤孔隙形态特征做了相当大的简化, 无法反映实际孔隙结构的复杂性、不规则性。尽管近年来有研究采用土壤切片图像来直接分析孔隙结构特征, 但切片制备过程较为繁琐, 易造成土壤孔隙结构的扰动, 耗时费力^[5]。

CT (Computerized tomography, X 射线计算机断层摄影设备) 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^[6]。通过 CT 扫描技术获取的原状土体的图像, 可以揭示孔隙数目、大小、形状和位置^[7-9], 计算容重、孔隙度、等效直径等孔隙定量指标^[10-11]。冯杰^[12]和何娟^[13]等也应用此技术分别研究了土壤孔隙的分形特征, 但由于扫描图像分辨率的限制, 多

用于大孔隙的定量研究。程亚南等^[14]应用 CT 扫描的方法重建了土壤孔隙的三维结构并较好地模拟了孔隙尺度上的水分运动过程以及非饱和和水力学性质。应用高精度同步辐射 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^[15-17]。

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^[18-19]。通常认为冻融作用反复进行的结果, 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。齐吉琳等^[20]以一定干密度的饱和兰州黄土和天津粉质粘土为研究对象, 通过进行冻融前后土力学试验和电子显微镜图像中孔隙直径、比例、长度等指标的定量分析, 发现冻融循环可以改变土的力学性质, 这种影响是通过改变土的结构性而产生的。邓西民等^[21]在研究冻融对犁底层土壤物理性状的影响的过程中发现, 冻融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。随着冻融循环次数的增加, 黑土容重和孔隙度逐渐减小和增加, 直至稳

* 国家自然科学基金项目 (41271293)、国家自然科学基金青年科学基金项目 (41302222) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: chenxwnefu@163.com

作者简介: 王恩姮 (1982—), 女, 辽宁人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: erxin222@163.com

收稿日期: 2013-06-24; 收到修改稿日期: 2013-10-09

定状态^[22],土壤力学结构特征也表现出一致的规律^[23]。本文应用 CT 扫描数字图像研究了模拟冻融循环条件下,典型黑土不同土层范围内大孔隙数量以及形状的变化,为进一步揭示该区季节性冻融对土壤结构的影响提供证据,同时可能为探明该区土壤水蚀、冻融侵蚀、复合侵蚀的机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于黑龙江省西北部克山县境内的克山农场(48°12′—48°23′N,125°8′—125°37′E),属克拜漫川漫岗地带,海拔 240~340 m,平均坡度 3°。区域内土壤类型以黏化湿润均腐土占绝对优势,只在部分低洼处镶嵌分布少量的草甸土,属典型黑土区^[15]。该区温带大陆性季风气候特征明显,年均气温 0.9℃,≥10℃有效积温 2 296℃,年均降水量 501.7 mm,年均蒸发量 1 329 mm,无霜期 115 d,土壤冻结期从 11 月初至翌年 6 月中旬,最大冻结深度可达 2.5 m。

1.2 样品采集与制备

2009 年 10 月初,以黑龙江省克山农场 13 连队区内侵蚀沟为研究对象,沿着土壤剖面层次清晰的侵蚀沟壁,修整取样剖面,分别于 0~40 cm、40~80 cm、120~160 cm 土层范围内采用自制内径和高分别均为 10 cm 的有机玻璃管进行原装土柱的取样,每层重复取样 3 次。将分层取样的原状土柱在

水中浸泡(水面与有机玻璃管上沿平齐)12 h 进行饱和处理,然后将土柱取出平置于 3 cm 高的沙层上自然渗水 2 h,水分处理后将原状土柱样品置于自动循环低温冻融箱内(型号 DRX-I)进行冻融循环处理,循环次数为 6 次,每次冻融循环历时 15 h,其中冻结时间为 12 h,解冻时间为 3 h,冻结最低温度为 -20℃,解冻最高温度为 5℃。由于所用试样均为原状土,受各土层土壤结构异质性的限制,无法实现统一含水量的要求,因此,为了真实反映不同深度侵蚀沟沟壁土壤结构对冻融交替的响应差别,本研究中采用了实际能力持水量。自上至下,3 个土层样品在进行冻融循环时的初始平均体积含水量依次为 31.71%、34.36% 和 23.77%。所采土样质地为黏壤土,pH 为 6.2,3 个土层有机质和黏粒含量至上而下依次为 65 g kg⁻¹、46 g kg⁻¹、24 g kg⁻¹ 和 33.1%、39.1%、36.5%。

1.3 CT 扫描与处理

试验采用的是黑龙江省中医药大学 CT 扫描中心,美国 GE 公司生产的 Lightspeed16 排螺旋 CT 扫描仪,空间分辨率为 0.275 mm。扫描参数为:电压 140 kV,电流 60 mA,扫描间隔 1.5 s,扫描层厚 2 mm,窗宽(显示图像时所选用的 CT 值范围)和窗位(窗宽上、下限 CT 值的平均数)均为 1300。对每个土柱样品进行横断面扫描,扫描位置为中心线 1 次,中心线两侧每隔 10 mm 扫描 1 次,各 3 次,共 7 次,以下数据的分析均采用 7 次扫描的平均结果。

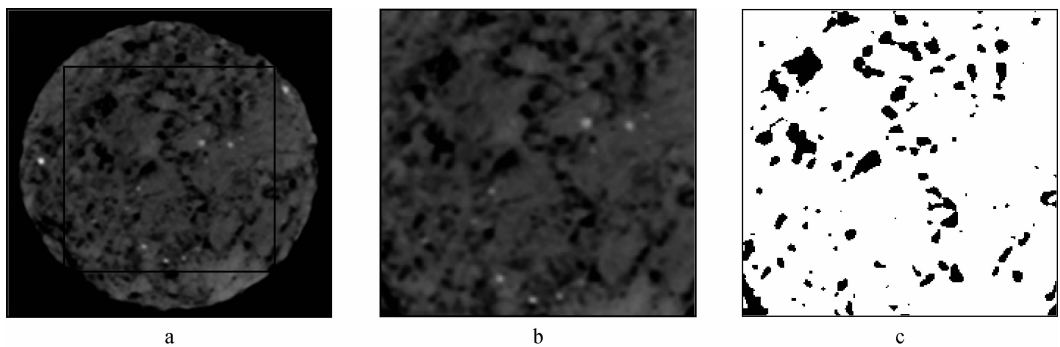


图 1 灰度图像二值化处理(a, 原始断层图像; b, 选择分析范围; c, 二值化图像)

Fig. 1 Segmentation of gray-scale CT images(a, Original CT image; b, selected images for quantification; c, binary-value image)

将原始的 CT 图像以 *.JPG 文件形式保存(图 1a),在 Photoshop 软件中将每一个横断面 CT 扫描图像切割成 214×214 像素的中心方块(图 1b),对应的实际边长为 7.55cm,仍以 *.JPG 文件形式保存。应用 Image Tool 3.0 软件再次将图像转化为只有孔隙(黑色)和固体颗粒(白色)的二值化图像(图

1c)。在转化过程中,首先对含有已知大小的大孔隙的原状土柱进行 CT 扫描,然后手动设定阈值(Processing → Threshold → Manual),反复调试,直至图像中的孔隙直径与已知孔隙直径最相近为宜。在调试过程中发现,自动设定阈值(Processing → Threshold → Automatic)后的孔隙大小更接近已知

孔隙,所以阈值采用自动设置法。阈值设定后,通过对已知孔隙直径的测量,设置度量单位(Setting → Calibrate Spatial Measurement),作为图像定量处理的依据。

1.4 数据处理

通过 ImageTool3.0 软件的查找功能(Analysis → Find Objects → Automatic)和分析功能(Analyze Analysis → Object Analysis → Analyze),获得每一个可以识别的孔隙的定量参数。以 Feret 直径(经过不规则物体的中心,任意方向每隔 10° 的 36 个直径平均值)为孔隙径级分类标准,选择孔隙数目、面积和成圆率($4\pi A/P^2$,其中 A 为孔隙面积; P 为孔隙周长,成圆率为 1 时,孔隙为圆)3 个指标进一步对原状土柱内不同径级(< 0.5 mm、 $0.5 \sim 1$ mm、 $1 \sim 2$ mm、 $2 \sim 5$ mm、 ≥ 5 mm)孔隙的大小、形状进行分析。采用 SPSS11.5 进行统计分析。

2 结果

2.1 土壤剖面孔隙特征总体变化规律

冻融循环后,表层 0~40 cm 范围土层的大孔隙结构没有发生明显变化,虽然孔隙数目、面积和 Feret 直径略有降低但均未达到显著水平,成圆率略有增加,孔隙的形状更加不规则(表 1)。与表层土壤不同,40~80 cm 范围土层于冻融前后大孔隙数量几乎没有增减,孔隙形状也没有显著变化,但孔隙大小的变化差异明显,面积从冻融前的 12.22 mm² 减小至 6.51 mm²,Feret 直径则相应从 2.31 mm 降低至 1.91 mm($p < 0.05$)。对于 120~160 cm 范围土层而言,冻融循环降低了大孔隙数目($p < 0.05$),但对孔隙的大小和形状均无显著影响。

表 1 冻融前后平均孔隙特征的变化

Table 1 Macro-pore characterization before and after the simulated freezing-thawing alternation

| 土层 Soil layer(cm) | 处理 Treatment | 数目 Number | 面积 Aarea(mm ²) | 成圆率 Roundness | Feret 直径 Feret diameter(mm) |
|----------------------|-----------------|--------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|
| 0~40 | 冻融前 BF | 120 ± 22Aa | 3.71 ± 1.08Aa | 1.19 ± 0.14Aa | 1.68 ± 0.17Aa |
| | 冻融后 AF | 110 ± 20Aa | 2.93 ± 0.56Aa | 1.22 ± 0.11Aa | 1.56 ± 0.13Aa |
| 40~80 | 冻融前 BF | 52 ± 3Ab | 12.22 ± 3.69Ab | 1.16 ± 0.11Aa | 2.31 ± 0.22Ab |
| | 冻融后 AF | 50 ± 9Ab | 6.51 ± 2.12Bb | 1.23 ± 0.10Aa | 1.91 ± 0.20Bb |
| 120~160 | 冻融前 BF | 78 ± 7Ac | 2.60 ± 0.68Ac | 1.28 ± 0.19Aa | 1.43 ± 0.10Ac |
| | 冻融后 AF | 68 ± 3Bc | 2.51 ± 0.69Aa | 1.19 ± 0.11Aa | 1.48 ± 0.15Aa |

注:BF,冻融循环前;AF,冻融循环后。平均值 ± 标准差。不同大写字母表示冻融前后差异显著,不同小写字母表示土层间差异显著, $p < 0.05$ 。下同 Note:BF,before freezing-thawing alternation; AF,after the alternation. Means ± SD. Different uppercase letters indicate significant difference between BF and AF,while lowercase letters mean significant difference between soil layers at $p < 0.05$. The same below

同时发现,冻融前后不同土壤层次之间大孔隙特征也有所差异。冻融循环前和冻融循环后,3 个土层之间的大孔隙数目变化均差异显著($p < 0.05$),表层 0~40 cm 孔隙最多,40~80 cm 孔隙最少。3 个土层的大孔隙面积和 Feret 直径在冻融循环前差异均显著($p < 0.05$),但冻融循环后仅有 40~80 cm 土层与其他 2 个土层之间差异显著($p < 0.05$);在全剖面范围内,成圆率虽有变化但未达到显著水平。

2.2 不同径级孔隙数目的变化

如表 2 所示,冻融循环对 40~80 cm 土层范围

内各个径级的孔隙数目没有显著影响,但 0~40 cm 土层内 ≥ 5 mm 的孔隙和 120~160 cm 土层内 < 1 mm 的孔隙数目则有所减少($p < 0.05$)。1~2 mm 的孔隙数目在全剖面范围内冻融循环前、后均差异显著。而 < 1 mm 的孔隙在冻融循环前各个土层之间差异显著($p < 0.05$),但冻融循环后 40~80 cm 与 120~160 cm 之间则无差异。同时发现,各个土层在冻融循环前后均是中间径级的孔隙数目较多,以 1~2 mm 的孔隙最多, > 5 mm 的孔隙最少。

表 2 冻融前后各径级孔隙数目的变化

Table 2 Numbers of macro-pores of different diameter classes before and after freezing-thawing treatments

| 土层 Soil layer (cm) | 处理 Treatment | 孔隙数目 Numbers of macro-pores | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------------|------------|-----------|----------|---------|
| | | <0.5 mm | 0.5 ~ 1 mm | 1 ~ 2 mm | 2 ~ 5 mm | ≥5 mm |
| 0 ~ 40 | 冻融前 BF | 15 ± 6Aa | 26 ± 5Aa | 46 ± 10Aa | 29 ± 8Aa | 3 ± 1Aa |
| | 冻融后 AF | 13 ± 3Aa | 26 ± 9Aa | 43 ± 10Aa | 25 ± 4Aa | 2 ± 1Ba |
| 40 ~ 80 | 冻融前 BF | 6 ± 2Ab | 14 ± 2Ab | 16 ± 4Ab | 12 ± 2Ab | 4 ± 1Aa |
| | 冻融后 AF | 7 ± 3Ab | 11 ± 3Ab | 19 ± 2Ab | 11 ± 3Ab | 3 ± 1Ab |
| 120 ~ 160 | 冻融前 BF | 12 ± 4Ac | 18 ± 4 Ac | 34 ± 3Ac | 12 ± 2Ab | 2 ± 1Ab |
| | 冻融后 AF | 7 ± 3Bb | 14 ± 3 Bb | 35 ± 5Ac | 11 ± 4Ab | 1 ± 1Aa |

2.3 不同径级孔隙平均面积的变化

冻融循环对各个径级孔隙平均面积的影响如表 3 所示,仅有 40 ~ 80 cm 土层内 1 ~ 2 mm 和 >5 mm 的孔隙面积变化显著,分别较冻融循环以前降低了 9.58 % 和 42.19 % ($p < 0.05$),对其他土层、其他径级的孔隙面积没有明显的影响。冻融循环前、后,0.5 ~ 2 mm 孔隙的平均面积在各个土层之间

均无显著差异,<0.5 mm 孔隙面积虽然在冻融循环前无差异,但在冻融循环后 40 ~ 80 cm 与 120 ~ 160 cm 之间差异达到显著 ($p < 0.05$),2 ~ 5 mm 孔隙的平均面积在冻融循环前后均是 120 ~ 160 cm 显著低于 0 ~ 40 cm 和 40 ~ 80 cm ($p < 0.05$),而 ≥5 mm 的孔隙平均面积则是在冻融循环前后 40 ~ 80 cm 显著高于 0 ~ 40 cm 和 120 ~ 160 cm ($p < 0.05$)。

表 3 冻融前后各径级孔隙平均面积的变化

Table 3 Average areas of macro-pores of different diameter classes before and after freezing-thawing treatments

| 土层 Soil layer (cm) | 处理 Treatment | 孔隙平均面积 Average areas of macro-pores (mm ²) | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| | | <0.5 mm | 0.5 ~ 1 mm | 1 ~ 2 mm | 2 ~ 5 mm | ≥5 mm |
| 0 ~ 40 | 冻融前 BF | 0.15 ± 0.02Aa | 0.45 ± 0.06Aa | 1.69 ± 0.09Aa | 7.32 ± 0.95Aa | 37.80 ± 15.67Aa |
| | 冻融后 AF | 0.15 ± 0.01Aab | 0.48 ± 0.02Aa | 1.54 ± 0.2Aa | 7.15 ± 0.69Aa | 23.84 ± 17.00Aa |
| 40 ~ 80 | 冻融前 BF | 0.15 ± 0.02Aa | 0.49 ± 0.03Aa | 1.67 ± 0.07Aa | 7.82 ± 1.02Aa | 127.2 ± 52.0Ab |
| | 冻融后 AF | 0.16 ± 0.01Aa | 0.49 ± 0.05Aa | 1.51 ± 0.14Ba | 7.81 ± 0.67Aa | 73.53 ± 26.47Bb |
| 120 ~ 160 | 冻融前 BF | 0.14 ± 0.02Aa | 0.48 ± 0.05Aa | 1.61 ± 0.08Aa | 6.22 ± 0.84Ab | 28.00 ± 21.00Aa |
| | 冻融后 AF | 0.14 ± 0.01Ab | 0.50 ± 0.03Aa | 1.68 ± 0.09Aa | 4.79 ± 2.2Ab | 22.64 ± 22.15Aa |

2.4 不同径级孔隙成圆率的变化

成圆率是表示不规则图形接近标准圆形的程度,成圆率越接近 1 说明不规则图形越近似圆形。由表 4 可知,冻融循环处理能够小幅度改变各个径级孔隙的成圆率,但是均未达到显著水平。冻融循环前和冻融循环后各个土层之间成圆率的变化也不是很明显:0.5 ~ 1 mm 孔隙的成圆率在冻融前后均无明显变化,各个土层内 <0.5 mm 孔隙在冻融循环前没有差异,但冻融后 40 ~ 80 cm 显著高于

120 ~ 160 cm ($p < 0.05$);1 ~ 2 mm 和 >5 mm 孔隙的成圆率在冻融循环前有差异、冻融循环后无差异;而 2 ~ 5 mm 孔隙的成圆率在冻融循环前均差异显著 ($p < 0.05$),但冻融循环后 120 ~ 160 cm 与 0 ~ 40 cm 和 40 ~ 80 cm 之间无差异。同时发现,中间径级的孔隙成圆率较为接近 1,以 1 ~ 2 mm 的孔隙形状最接近圆形,其次是 0.5 ~ 1 mm 径级的孔隙,较大径级和较小径级的孔隙成圆率与 1 的差值逐渐增加,说明其孔隙形状越来越不规则。

表 4 冻融前后各径级孔隙成圆率的变化

Table 4 Roundness of macro-pores of different diameter classes before and after freezing-thawing treatments

| 土层 Soil layer (cm) | 处理 Treatment | 孔隙成圆率 Roundness of macro-pores | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | <0.5 mm | 0.5 ~ 1 mm | 1 ~ 2 mm | 2 ~ 5 mm | ≥5 mm |
| 0 ~ 40 | 冻融前 BF | 3.32 ± 0.91 Aa | 1.38 ± 0.14 Aa | 0.85 ± 0.02 Aa | 0.62 ± 0.05 Aa | 0.36 ± 0.06 Aa |
| | 冻融后 AF | 3.37 ± 0.51 Aab | 1.31 ± 0.11 Aa | 0.92 ± 0.05 Ba | 0.65 ± 0.05 Aa | 0.27 ± 0.19 Aa |
| 40 ~ 80 | 冻融前 BF | 3.45 ± 0.84 Aa | 1.27 ± 0.15 Aa | 0.83 ± 0.07 Aa | 0.53 ± 0.05 Ab | 0.25 ± 0.08 Ab |
| | 冻融后 AF | 3.84 ± 0.80 Aa | 1.27 ± 0.22 Aa | 0.89 ± 0.06 Aa | 0.57 ± 0.06 Aa | 0.34 ± 0.07 Aa |
| 120 ~ 160 | 冻融前 BF | 2.81 ± 0.82 Aa | 1.31 ± 0.12 Aa | 0.95 ± 0.01 Ab | 0.72 ± 0.08 Ac | 0.22 ± 0.13 Ab |
| | 冻融后 AF | 3.16 ± 0.37 Ab | 1.20 ± 0.11 Aa | 0.95 ± 0.06 Aa | 0.77 ± 0.12 Ab | 0.20 ± 0.19 Aa |

3 讨论

模拟冻融循环显著降低了 40 ~ 80 cm 土层范围内平均孔隙面积以及 Feret 直径, 降幅分别为 46.72% 和 17.32% ($p < 0.05$), 与野外研究结果相一致。50 ~ 70 cm 是对季节性冻融响应最为强烈的土层, 无论是坡上还是坡下, 土壤容重、饱和度以及团聚体破坏率均在冻融前后发生了显著的变化^[25]。这可能是由于 40 ~ 80 cm 土层为黏化层的分布范围, 黏粒含量大于 30%, 在含水量相近的情况下, 对冻融循环较为敏感。而且通过对不同径级的孔隙特征分析可知, 黏化层范围内 1 ~ 2 mm 和 ≥5 mm 的孔隙对冻融循环最为敏感, 6 次循环后, 平均孔隙面积分别降低 9.58% 和 42.19% ($p < 0.05$)。

表层土壤在冻融循环前后没有明显变化, 可能由于与较深土层相比, 该层每年均经历较为频繁的季节性冻融循环, 土壤结构相对稳定, 受冻融交替过程的影响较弱。除了成圆率指标外, 冻融循环前后 3 个土层内平均孔隙数目、平均孔隙面积、平均 Feret 直径均有不同程度的差异 ($p < 0.05$)。3 个层次之间平均孔隙数目均差异显著 ($p < 0.05$), 以表层 0 ~ 40 cm 最多, 40 ~ 80 cm 土层最少, 这可能是导致田间黏化层滞水的主要原因^[25]。尽管黏化层范围内孔隙数目少, 但是孔隙的平均面积却在冻融前后始终高于其上、下层土壤(表 1), 结合表 2 可以发现, 是由于 40 ~ 80 cm 土层内 ≥5 mm 径级的孔隙较多, 也有可能是由于黏化层黏重紧实, 在取样过程中干扰产生大裂缝, 图像分析时统计为 ≥5 mm 的自然孔隙。

从地表至 100 cm 范围内有黏化层分布是黑土分类最为重要的诊断特征^[24], 由于黏化层滞水效

应的存在, 初春融雪季节表层土壤甚至可达饱和状态, 削弱了土壤内部的黏结力, 硬度迅速降低至全年最低水平, 诱发严重的土壤侵蚀^[26], 这种脆弱的土壤状态将一直持续至土体中大孔隙中的水排出, 土壤黏结力重新回复为止^[27]; 而表层以下的冻结层以及完全解冻后下层黏化层的滞水效应可从 6 月初持续至 6—9 月的雨季, 加剧了黑土区的侵蚀, 这也是该区侵蚀沟迅速发展的决定性因素。本研究通过 CT 扫描孔隙结构的方法, 不仅证明了黏化层滞水效应的可能, 同时探明了黏化层孔隙结构对冻融循环的敏感性, 由此印证了季节性冻融循环对黏化层抗蚀性的削弱以及黏化层的滞水效应是导致黑土区地表侵蚀与沟蚀的主要原因。

4 结论

冻融循环对黑土区不同深度土壤的大孔隙结构影响不同: 0 ~ 40 cm 土层的孔隙数目、大小、形状均未受到冻融循环的显著影响; 40 ~ 80 cm 土层孔隙的数目及形状在冻融后没有明显变化, 但孔隙直径和面积显著降低, 分别较冻融前降低 9.58% 和 42.19% ($p < 0.05$), 并以 1 ~ 2 mm 和 ≥5 mm 的孔隙面积降低最为显著 ($p < 0.05$); 冻融循环后, 120 ~ 160 cm 土层中除 <1 mm 的大孔隙数目有所降低, 其他径级孔隙的数目、大小和形状均没有变化。

参考文献

- [1] 郑毅, 张福锁. 土壤结构和耕作对根际微生态系统的影响. 云南农业大学学报, 2003, 18(2): 193—197. Zheng Y, Zhang F S. Effects of soil structure and tillage on the rhizospheric microecosystem (In Chinese). Journal of Yunnan Agricultural University, 2003, 18(2): 193—197
- [2] Hillel D. Soil and water: Physical principles and processes. New

- York; Academic Press Inc., 1971
- [3] Kay B D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances of Soil Science*, 1990, 12: 1—52
- [4] Hill R L, Horton R, Cruse R M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 49 (5): 1264—1270
- [5] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度. *土壤学报*, 2003, 40 (5): 678—682. Li D C, Velde B, Zhang T L. Quantitative estimation of pore variability and complexity in soils by digital image method (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (5): 678—682
- [6] 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). *Guangai Paishui*, 2000, 19 (3): 71—76
- [7] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53 (3): 653—660
- [8] Zeng Y, Gantzer C J, Payton R L, et al. Fractal dimension and lacunarity of bulk density determined with X-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (6): 1718—1724
- [9] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布. *水科学进展*, 2002, 13 (5): 611—617. Feng J, Hao Z C. Distribution of soil macropores characterized by CT (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2002, 13 (5): 611—617
- [10] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 1990, 46 (1/3): 13—29
- [11] Peyton R L, Anderson S H, Gantzer C J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 1992, 53 (3/4): 329—340
- [12] 冯杰, 于纪玉. 利用 CT 扫描技术确定土壤大孔隙分形维数, *灌溉排水学报*, 2005, 24 (4): 26—28, 40. Feng J, Yu J Y. Determination fractal dimension of soil macropore using computed tomography (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24 (4): 26—28, 40
- [13] 何娟, 刘建立, 吕菲. 基于 CT 数字图像的土壤孔隙分形特征研究. *土壤*, 2008, 40 (4): 662—666. He J, Liu J L, Lü F. Characterizing fractal characteristics of soil pores based on high-resolution digital CT images (In Chinese). *Soils*, 2008, 40 (4): 662—666
- [14] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测. *农业工程学报*, 2012, 28 (22): 115—122. Cheng Y N, Liu J L, Lü F, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (22): 115—122
- [15] 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
- [16] San José Martínez F, Martín M A, Caniego F J, et al. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macro pore structures. *Geoderma*, 2010, 156 (1/2): 32—42
- [17] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124 (4): 17—23
- [18] Lawrence W G. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill; Potential impacts on soil erosion. *Geomorphology*, 2000, 32 (2): 147—160
- [19] Taskin O, Ferhan F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 2003, 52 (1): 1—8
- [20] 齐吉琳, 张建国, 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*, 2003, 22 (增 2): 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 (Suppl 2): 2690—2694
- [21] 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. Influence of freezing-thawing on soil physical properties of plow pan (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43 (23): 2538—2541
- [22] 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 cycles on bulk density and porosity of black soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (6): 186—189
- [23] 范昊明, 钱多, 周丽丽, 等. 冻融作用对黑土力学性质的影响研究. *水土保持通报*, 2011, 31 (3): 81—84. Fan H M, Qian D, Zhou L L, et al. Effects of freeze-thaw cycle on mechanical properties of black soil (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31 (3): 81—84
- [24] 龚子同, 等. *中国土壤系统分类: 理论·方法·实践*. 北京: 科学出版社, 1999. Gong Z T, et al. *Chinese soil taxonomy: Theory, methodology and practices* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [25] Zhao Y S, Wang E H, Cruse R M, et al. Characterization of seasonal freeze-thaw and potential impacts on soil erosion in Northeast China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92 (3): 567—571
- [26] Froese J C, Cruse R M, Ghaffarzadeh M. Erosion mechanics of soils with an impermeable subsurface layer. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (6): 1836—1841
- [27] Formanek G E, McCool D K, Papendick R L. Freeze-thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1984, 27 (6): 1749—1752

CHARACTERIZATION OF MACRO-PORES IN MOLLISOL PROFILE SUBJECTED TO SIMULATED FREEZING-THAWING ALTERNATION

Wang Enheng Lu Qianqian Chen Xiangwei[†]

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract Taking cropland soil in the Mollisol region of Northeast China as object, an indoor experiment was carried out to have the soil subjected to simulated freezing-thawing alternation for investigation of effects of the alternation on macro-pores in the soil profile using CT (Computerized tomography) thorough quantifying and analyzing variation of the number, average area, Feret diameter and roundness of macro-pores with soil depth (0 ~ 40 cm, 40 ~ 80 cm, 120 ~ 160 cm). Results show that the alternation did not change the characterization of macro pores in 0 ~ 40 cm but significantly reduced the average area and Feret diameter of pores in 40 ~ 80 cm by 46.72% and 17.32%, respectively ($p < 0.05$). Pores, 1 ~ 2 mm and ≥ 5 mm in diameter were found most vulnerable to the alternation, decreasing by 9.58% and 42.19% ($p < 0.05$), respectively. The findings confirmed the possible effect of argillic horizon stagnating water, and susceptibility of the pore structure in argillic horizon to the alternation, thus demonstrating that seasonal freezing-thawing alternation is the major cause of surface soil erosion and gully erosion of the Mollisol region through weakening erosion resistance of its argillic horizon and enhancing the effect of the argillic horizon stagnating water.

Key words Mollisol; Freezing-thawing alternation; CT; Macro-pore; Argillic horizon

(责任编辑: 卢 萍)