

基于CT研究冻融对高寒草甸土壤孔隙结构的影响

赵云朵^{1,2}, 胡霞^{1,2}

(1.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2.北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875)

摘要: 冻融是影响高寒地区土壤结构的重要物理因素,以青海湖流域高寒草甸作为研究对象,通过野外采集原状土柱、室内冻融循环模拟、CT扫描和图像解译等方法,研究冻融循环对高寒草甸冻胀丘和丘间地的土壤大孔隙结构特征的影响。结果表明,随着冻融循环次数的增加,高寒草甸冻胀丘和丘间地土壤大孔隙度均呈现“减小—增加—减小”的趋势,冻融循环对土壤大孔隙度的降低主要在第1次冻融循环内形成的,且大孔隙的平均等效直径、平均体积、平均分枝长度、分枝密度和节点密度的变化规律与大孔隙度变化规律基本一致;冻融循环对高寒草甸冻胀丘土壤大孔隙的影响明显大于丘间地,其土壤大孔隙度随土层深度变化存在2个峰值,受冻融循环的影响,峰值大小和位置有所变动,且30—80 mm土层深度的土壤孔隙结构较草毡层其他位置更为敏感。

关键词: 冻融循环; 土壤结构; CT扫描; 青海湖流域

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0362-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.03.052

Influence of Freeze-thaw on CT Measured Soil Pore Structure of Alpine Meadow

ZHAO Yunduo^{1,2}, HU Xia^{1,2}

(1.Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2.Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Freeze-thaw is an important physical factor affecting soil structure in alpine regions. Taking alpine meadow in Qinghai Lake basin as the research object, the influence of freeze-thaw cycle on the structure characteristics of soil macropores in the frost mounds and the inter space of frost mounds were studied through collecting undisturbed soil columns, simulating freeze-thaw cycle, conducting CT scanning and image interpretation. The results showed that with the increase of the freeze-thaw cycles, the soil macroporosity in the frost mounds and the inter space of frost mounds presented a trend of “decrease-increase-decrease”, and the decrease of soil macroporosity by freeze-thaw cycles was mainly formed in the first freeze-thaw cycle. The variation trends of the average equivalent diameter, average volume, average branch length, branch density and node density of macropores were basically the same as that of macroporosity. The effect of freeze-thaw cycle on the soil macropores in the frozen mound was significantly greater than that in the inter space of frost mounds. There were two peaks of the soil macroporosity along the depth in frost mounds, and the size and position of the peak value changed. Soil pore structure was more sensitive at a depth of 30—80 mm in the frost mounds than other depths of the felt layer.

Keywords: freeze-thaw cycle; soil structure; CT scan; Qinghai Lake basin

青海湖流域地处青藏高原东北部,是我国东部季风区、西北部干旱区和西南部高寒区的交汇地带,是维系青藏高原东北部生态安全的重要屏障,具有高寒、半干旱、太阳辐射强和风力强劲的环境特征,生态环境极其脆弱和敏感。长期受到冻融作用的影响,地表反复的冻

融破坏了土壤团聚体,引起土壤结构的改变,影响水热能量的分配,甚至造成土壤侵蚀和水土流失。

土壤结构是土壤水、气等贮存和运输的场所,可以控制土壤—植物—微生物系统中重要的物理和生物过程^[1]。土壤大孔隙结构是描述土壤结构特征的重要参

收稿日期: 2019-10-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(41971053, 4173000064)

第一作者: 赵云朵(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤学研究。E-mail: 201721480048@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 胡霞(1978—), 女, 教授、博士生导师, 主要从事土壤水文学研究。E-mail: huxia@bnu.edu.cn

数^[2]。大孔隙的存在能够增加土壤的通气性,形成优势流或大孔隙流,促进土壤水分快速移动^[3-4]。冻融循环对寒冷地区土壤结构的影响一直备受关注。许多学者研究表明,冻融会造成土壤的物理和机械性质如土壤团聚体的稳定性^[5]、土壤体积^[6]、土壤孔隙度和粒径^[7]、弹性系数^[8]以及容重^[9-10]的变化。目前,许多学者针对冻融对土壤大孔隙结构的影响展开了研究。刘佳等^[11]研究发现,冻融循环会使东北黑土土壤的孔隙度增大;王恩姮等^[12]以黑土区耕作土壤为研究对象,发现冻融循环降低 40—80 cm 土层范围内大孔隙面积;Torsten 等^[13]研究表明,冻融循环对松散沙质土壤孔隙结构的影响比对粉砂土壤影响更大。但是,目前冻融循环对于青海湖流域高寒草甸土壤大孔隙结构特征的具体影响仍不清楚。本试验以青海湖流域高寒草甸为研究对象,通过采集原状土柱,进行室内冻融模拟实验,采用 CT 扫描法分析土壤大孔隙特征,研究不同冻融循环下高寒草甸冻胀丘和丘间地原状土柱土壤孔隙结构特征的变化,揭示冻融作用对青海湖流域高寒草甸土壤结构的影响,以期为青海湖流域的生态水文过程研究提供理论基础和指导依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域地处青藏高原东北部(36°15′—38°20′N,97°50′—101°20′E),海拔 3 194~5 174 m,流域面积 29 661 km²,是一个封闭式山间内陆盆地。青海湖流域是我国东部季风区、西南高寒区和西北干旱区的交汇区,属于青藏高原温带大陆性半干旱气候,具有独特的高寒半干旱生态系统特征,气温日较差大,降水较少且集中于夏季,干湿季分明。流域年平

均气温-1.1~4.0℃,最高月平均气温 11.0℃,最低月平均气温-13.5℃。流域年平均降水量 291~479 mm,多年平均蒸发皿蒸发量为 1 300~2 000 mm。流域内水系分布不均,较大的河流有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、泉吉河和黑马河等。

1.2 原状土柱采集与冻融实验

本研究以青海湖流域的高寒草甸作为研究对象(图 1),分别在冻胀丘和丘间地各采集 3 个原状土柱。根据现场调查,冻胀丘富有一定弹性,直径为 200~400 mm,高 100~300 mm,间距 100~500 mm。采样前清除采样点土壤表层的砾石、残枝等杂物,将内径 7.5 cm、高 15 cm 的 PVC 管一端套入特制的铁头后垂直压入土层。铁头为特制钢管,一端打磨削尖,以减少压入土壤带来的摩擦阻力。挖开土柱周边土壤,将 PVC 管连同内部原状土壤小心取出,两端套上 PVC 盖,空隙部分用海绵填充塞实,避免运输过程中土壤样品的震动和散落。同时,采集表层 0—10,10—20 cm 的土壤样品各 1 kg,通过室内分析测定得到土壤基本理化性质(表 1)。

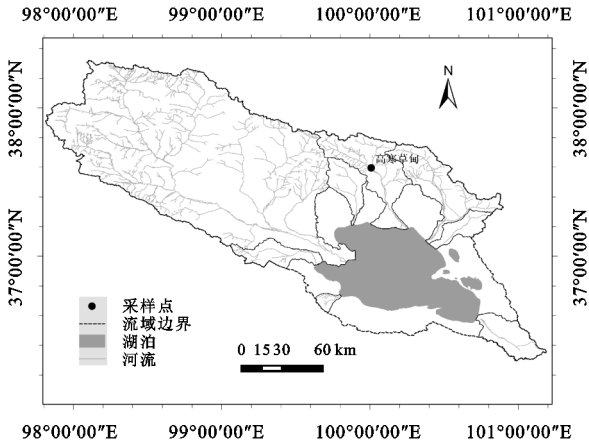


图 1 研究区样地位置

表 1 高寒草甸土壤理化性质

土层	容重/ (g·cm ⁻³)	机械组成/(g·kg ⁻¹)				全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
		0.25≤Φ<2.00 mm	0.05≤Φ<0.25 mm	0.02≤Φ<0.05 mm	0.002≤Φ<0.02 mm					
0—10	0.645	50.14	10.16	10.0	20	11.80	1.04	203	27.3	72.1
10—20	1.025	42.59	15.21	12.5	20	8.95	0.98	216	24.0	76.2

通过分析青海湖流域高寒草甸 20 mm 土层土壤温度的变化情况,可知全年最低温和最高温分别为-11.36,25.07℃,最热月(7 月)平均土温为 10.81℃,最冷月(1 月)平均土温为-7.05℃(图 2)。因此,模拟冻融循环的冻结温度设置为-10℃,融化温度设置为 20℃。以 24 h 为 1 个冻融循环周期,模拟 1 个冻融过程,冻结和融化时间均设置为 12 h。试验于 2018 年 12 月在北京世纪坛医院进行,首先从采集的冻胀丘和丘间地土柱样品中各选 1 根代表性较好的柱子,将原状土样品底部用多层纱布包裹后放置在蒸

馏水中浸泡 24 h,之后静置 12 h 去除重力水,然后将其密封固定,利用 CT 扫描仪对冻融循环前的样品进行扫描。将扫描后的土柱放进全自动低温冻融试验机(TDR-10,天津市港源试验仪器厂),进行室内模拟冻融循环,冻融循环周期设为 0,1,3,6 次,每次冻融循环结束后马上进行 CT 扫描。

1.3 CT 扫描与图像处理

本试验利用北京世纪坛医院的医学 CT(Philips 公司生产的 128 层 Brilliant ICT 256)分别对冻融循环 0,1,3,6 次后的土壤样品进行扫描。扫描电压为 140 kV,电

流为 300 mA,扫描层厚为 0.625 mm,层间距为 0.312 mm,图片矩阵为 1 024×1 024,通过三维重建获得体素分辨率为 0.146×0.146×0.312 mm。

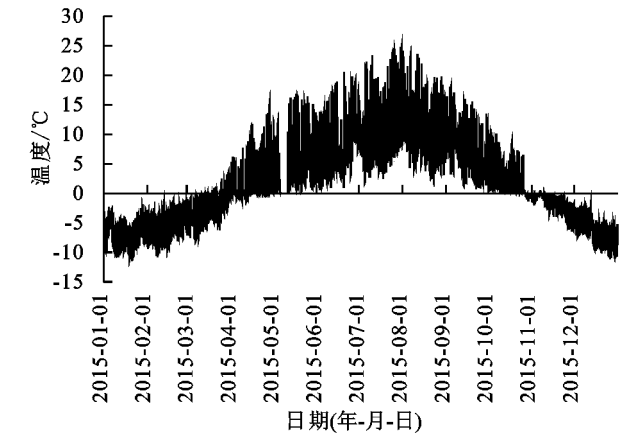


图 2 2015 年高寒草甸 20 mm 土层土壤温度全年变化

扫描得到的扫描图像格式为 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 格式,利用 PV-WAVE 编程语言转化为 ASCII 格式。将 ASCII 格式图像导入 Avizo9.0 (FEI, America) 软件,首先利用 1 个柱形切割工具选取研究区域 (直径 7 cm、高 12 cm 的圆柱体),目的是为了消除管壁处和管底部的扰动。根据阈值法并经过反复的对比分析,选取合适的阈值得到土壤大孔隙的三维结构图,然后通过参数计算和骨架化的操作得到大孔隙度、数量密度、平均体积、分枝密度、平均分枝长度、长度密度和平均等效直径等大孔隙参数特征值 (图 3)。

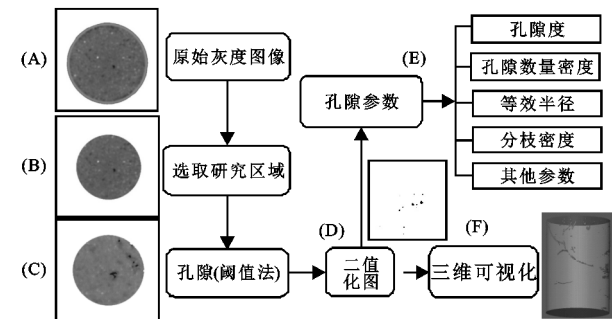


图 3 图像处理过程

2 结果与分析

2.1 冻融循环对高寒草甸土壤大孔隙特征的影响

图 4 为不同冻融循环下青海湖流域高寒草甸冻胀丘与丘间地土壤大孔隙的三维结构图,其中黑色部分表示土壤大孔隙。由图 4 可以看出,冻胀丘和丘间地的土壤大孔隙特征具有明显的差异性。在孔隙度方面,冻胀丘的土壤大孔隙度明显高于丘间地,由于低温环境下水分冻结使得土壤产生体积膨胀,容重降低,进而冻胀丘的大孔隙度高于丘间地的大孔隙度^[14];在孔隙数量方面,丘间地土壤大孔隙数量相对较少,且主要集中在土壤表层 0—80 mm,而冻胀丘

土壤大孔隙的数量相对较多。

随着冻融循环次数的增加,冻胀丘和丘间地土壤大孔隙的变化规律基本相似,均呈现“减小—增加—减小”的趋势。与未冻融时相比,1 次冻融循环后,土壤大孔隙的数量明显减少,大孔隙度明显变小,而且更加分散,连通度变差;3 次冻融循环后,土壤大孔隙的数量略有上升,大孔隙度略有增大,连通度也相对变好;6 次冻融循环后,土壤大孔隙的数量、大小和连通度略有降低,且均明显低于未冻融时的土壤大孔隙。

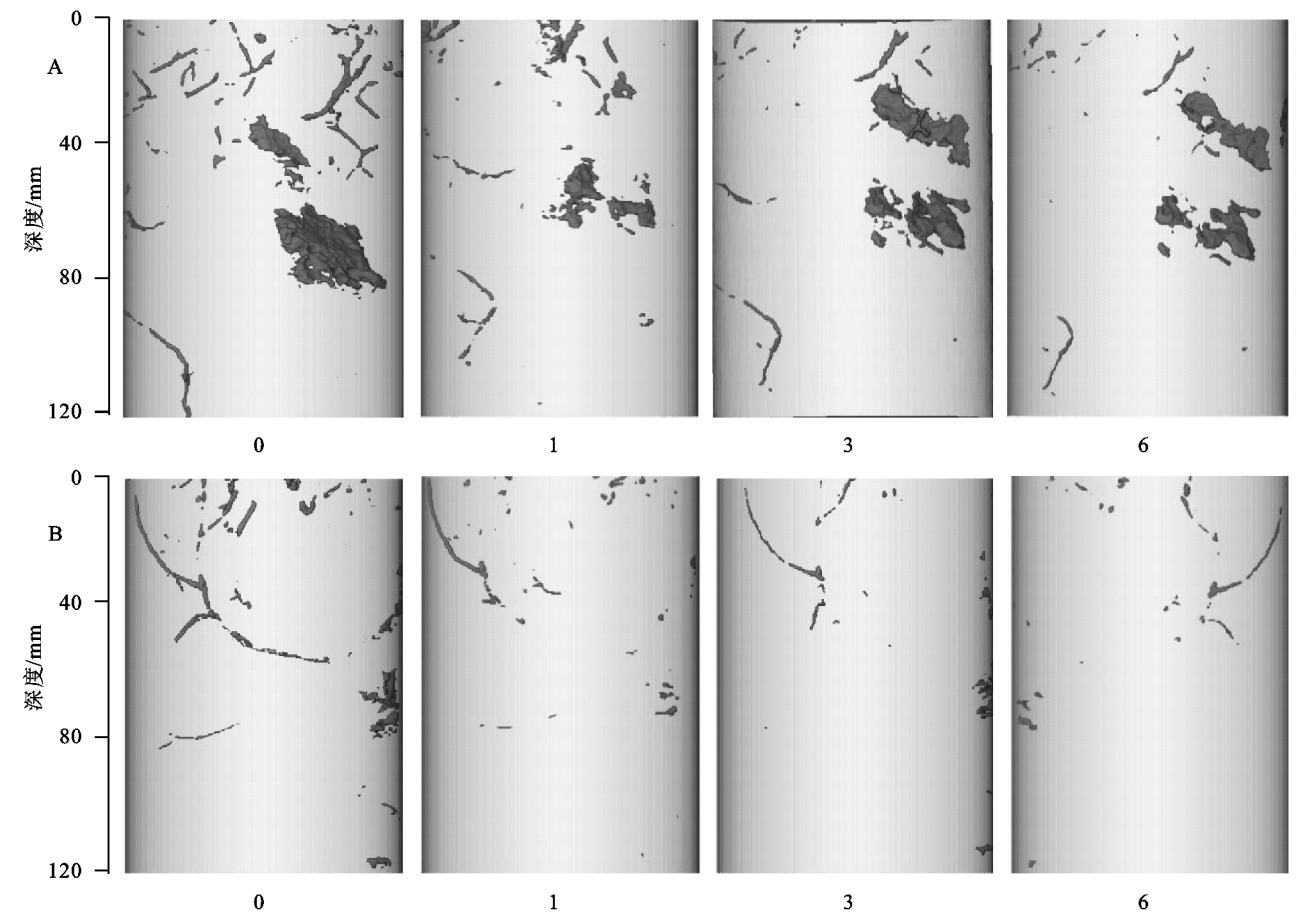
随着冻融循环次数的增加,土壤团聚体作为衡量土壤结构的一个重要指标遭到严重的破坏,并使之重新进行排列^[15-17],导致土壤孔隙度增大或减小。已有研究^[18-19]表明,冻融循环会导致容重较大的土壤孔隙体积增加,同时使松散土壤的孔隙体积降低。本研究中高寒草甸的土壤容重为 0.645 g/cm³,相对较低,土壤比较松散,经过冻融循环后变紧密,与前人^[18-19]的研究结果相吻合。

不同冻融循环次数下,高寒草甸冻胀丘与丘间地土壤大孔隙的结构特征参数见表 2。从表 2 可以看出,冻胀丘土壤的初始大孔隙度 ($0.623 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{mm}^3$) 明显高于丘间地土壤的初始大孔隙度 ($0.090 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{mm}^3$)。与未冻融时相比,冻胀丘冻融 1, 3, 6 次后土壤大孔隙度分别减少 74.5%, 51.6% 和 68.7%, 而丘间地土壤大孔隙度分别减少 72.9%, 71.0% 和 81.9%。冻融循环对土壤大孔隙度的降低主要在第 1 次冻融循环内形成,随着冻融循环的增加,土壤大孔隙度呈现小幅波动的状态。冻融循环对丘间地大孔隙度的影响比冻胀丘的大,大孔隙度降低的程度更大,可能是因为冻胀丘草毡层发育较好,对土壤结构有保护作用。吕艳花等^[20]指出,冻胀丘松散的土壤为植被生长提供了良好的条件,冻胀丘上的物种丰富度和物种多样性指数均高于其周围的草甸。而植被的覆盖会削弱土壤的冻融作用,减小土壤冻融过程中的温度差异,从而使冻胀丘土壤结构受冻融循环的影响比丘间地小。

高寒草甸冻胀丘的大孔隙数量密度与丘间地差异不大,但冻融循环对冻胀丘和丘间地的大孔隙数量密度的影响不同。随着冻融循环次数的增加,冻胀丘的大孔隙数量密度的变化呈现“增加—减小—增加”的趋势,与未冻融时相比,冻胀丘冻融循环 1, 3, 6 次后土壤大孔隙数量密度分别增加 5.7%、降低 46.4% 和降低 40.6%。而随着冻融循环的增加,丘间地大孔隙数量密度呈现降低趋势,与未冻融时相比,冻融循环 1, 3, 6 次的丘间地土壤大孔隙数量密度分

别降低 45.9%,52.8%和 53.9%。高寒草甸冻胀丘土壤大孔隙的平均等效直径(1.710 mm)比丘间地(1.487 mm)略高,冻融循环对冻胀丘和丘间地土壤

大孔隙的平均等效直径有波动影响,在 1 个循环后降低(5.33%和 13.24%),3 个循环后增加(26.51%和 10.55%),6 个循环后又降低(16.54%和 6.79%)。



注:A 为冻胀丘;B 为丘间地;0,1,3,6 为冻融循环周期。

图 4 不同冻融循环条件下高寒草甸土壤大孔隙三维结构图

表 2 不同冻融循环下土壤大孔隙三维结构特征参数

类型	冻融循环 次数	大孔隙度(10^{-3})/ ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$)	大孔隙数量密度($\times 10^{-4}$)/ ($\text{个} \cdot \text{mm}^{-3}$)	平均等效 直径/mm	平均体积/ mm^3
冻胀丘	0	0.623	3.751	1.710	51.196
	1	0.159	3.963	1.619	12.409
	3	0.301	2.010	2.048	46.238
	6	0.195	2.229	1.709	26.985
丘间地	0	0.090	4.277	1.487	6.507
	1	0.025	2.315	1.290	3.264
	3	0.026	2.018	1.427	3.999
	6	0.016	1.973	1.330	2.560

2.2 冻融循环对高寒草甸不同深度土壤大孔隙的影响

由图 5 可知,未冻融时冻胀丘与丘间地的土壤大孔隙主要分布在 0—80 mm,丘间地的土壤大孔隙度明显小于冻胀丘。随土层深度变化,冻胀丘的土壤大孔隙度存在 2 个明显的峰,在 8—50 mm 处大孔隙度先增大后减小,并在 35 mm 处达到最大;在 50—80 mm 处急剧增加后又急剧减小,在 63 mm 处出现 1 个峰值,且高于 35 mm 处的孔隙度。丘间地的土壤

大孔隙度随土层深度变化波动较明显,无明显峰值。

冻融循环 1 次后,冻胀丘在 0—10 mm 土层的土壤大孔隙度比未冻融时的有所增加,而在 20—120 mm 土层明显减小,且大孔隙度峰值变成 1 个,所在土层深度上移至 40—60 mm。丘间地在 0—120 mm 土壤大孔隙度比未冻融时的均降低,没有明显峰值。冻融循环 3 次后,冻胀丘土壤大孔隙度随土层深度变化又变回双峰,所在土层深度为 30,50—70 mm,第 1 个峰

值比未冻融时的小,但比冻融循环 1 次后的大,第 2 个峰值比未冻融时的大;丘间地没有明显的峰值。冻融循环 6 次后,冻胀丘土壤大孔隙度的双峰值较冻融循环 3 次后的小。丘间地土壤大孔隙度整体上都呈下降

趋势,没有明显的波动。从图 5 可知,冻胀丘 30—80 mm 土层的土壤孔隙结构较草毡层其他位置更为敏感。这可能由于表层 0—30 mm 草毡层最为丰富,对土壤孔隙结构有一定稳定作用,所以冻融对其影响不明显。

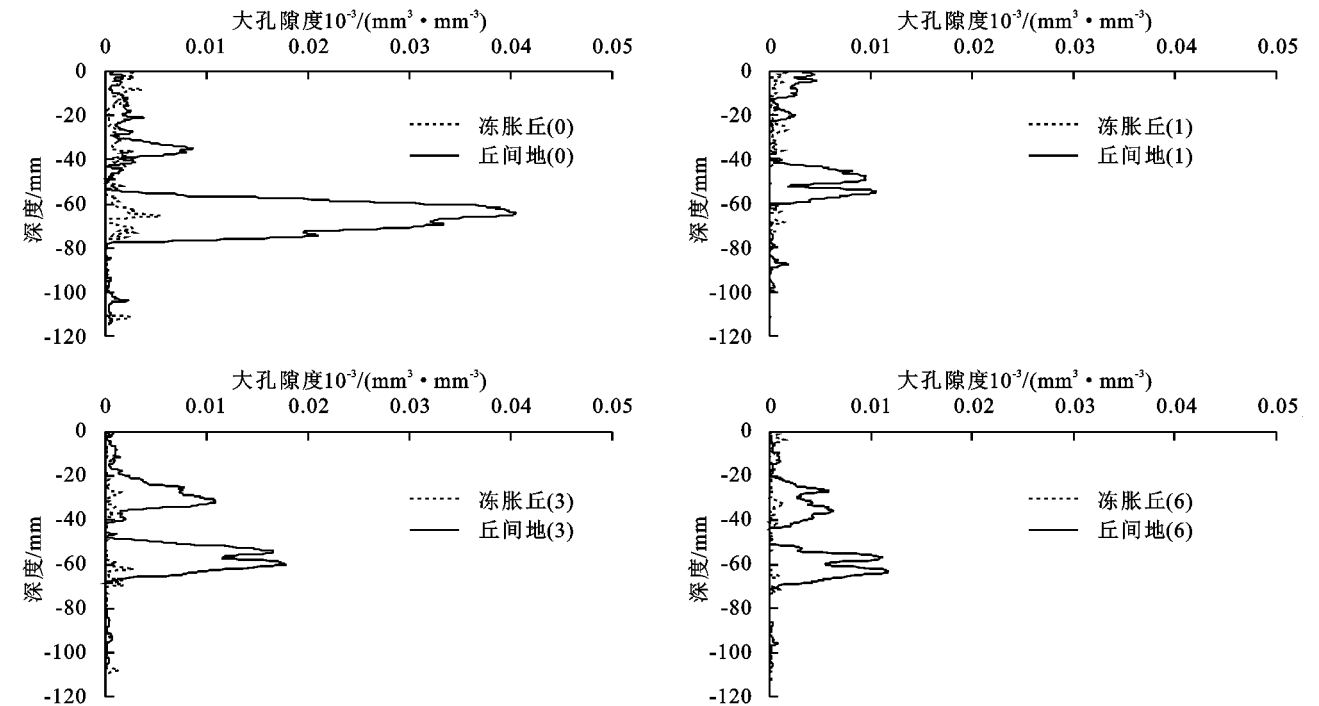


图 5 不同冻融次数下高寒草甸冻胀丘和丘间地土壤大孔隙度随土层深度的变化

2.3 冻融循环对高寒草甸土壤大孔隙连通度的影响

从表 3 可以看出,冻融次数相同时,冻胀丘土壤大孔隙的平均分枝长度、长度密度、分枝密度和节点密度均比丘间地大。随冻融次数的增加,丘间地和冻胀丘土壤大孔隙的平均分枝长度、分枝密度和节点密度的变化规律基本一致:未冻融时的土壤大孔隙特征值最大,冻融循环 1 次后急剧减小,冻融循环 3 次后有所回升,冻融循环 6 次后又降低。这个规律与丘间

地土壤大孔隙长度密度的变化趋势一致,但冻胀丘土壤大孔隙长度密度随着冻融循环呈降低趋势。总体来说,长期冻融循环使得土壤大孔隙的平均分枝长度、长度密度、分枝密度和节点密度均降低。长度密度、节点密度、分枝密度是土壤大孔隙的连通度的重要表征参数^[21-23],因此,冻融作用会使土壤大孔隙连续性变差,使大孔隙变成较小的、独立的、随机分布的大孔隙,不利于水分运移。

表 3 不同冻融循环下土壤大孔隙三维骨架结构特征参数

类型	冻融循环 次数	平均分枝 长度/mm	长度密度/ ($\text{km} \cdot \text{m}^{-3}$)	分枝密度($\times 10^{-4}$)/ ($\text{个} \cdot \text{mm}^{-3}$)	节点密度($\times 10^{-4}$)/ ($\text{个} \cdot \text{mm}^{-3}$)
冻胀丘	0	5.861	2.019	8.779	10.295
	1	5.117	1.608	3.559	5.015
	3	5.739	1.338	4.702	5.707
	6	5.457	1.229	4.053	5.106
丘间地	0	5.533	1.794	3.358	4.797
	1	4.998	0.793	1.218	2.274
	3	5.131	0.797	1.372	2.421
	6	3.654	0.684	1.369	2.375

3 结论

(1)冻融作用是影响高寒草甸生态系统土壤大孔隙的重要因素。随着冻融循环次数的增加,高寒草甸冻胀丘和丘间地土壤大孔隙度、平均等效直径、平均

体积、平均分枝长度、分枝密度和节点密度均呈现“减小—增加—减小”的趋势。冻融循环对丘间地大孔隙度的影响比冻胀丘的大,大孔隙度降低的程度更大。冻融循环对土壤大孔隙度的降低主要是在第 1 个循

环内形成。冻融循环使土壤大孔隙连续性变差,不利于水分运移。

(2)高寒草甸冻胀丘土壤大孔隙特征参数明显大于丘间地。冻胀丘土壤大孔隙的数量相对较多,大孔隙体积较大,丘间地土壤大孔隙的数量相对较少,大孔隙较小。冻胀丘的土壤大孔隙度随土层深度变化存在2个明显的峰值,受冻融循环的影响,峰值大小和位置有所变动,30—80 mm土层的土壤孔隙结构较草毡层其他位置更为敏感。丘间地土壤大孔隙随土层深度变化波动较明显,冻融循环后的土壤大孔隙度降低,没有明显的峰值。

参考文献:

- [1] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex[J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1633-1637.
- [2] 刘勇,胡霞,李宗超,等.基于CT的青海湖流域芨芨草草地土壤大孔隙特征分析[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 184-188.
- [3] Lin H S, Bouma J, Wilding L, et al. Advances in hydropedology[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 1-89.
- [4] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 523-546.
- [5] Shen S W, Xia C C, Huang J H. Influence of seasonal melt layer depth on the stability of surrounding rock in permafrost regions based on the measurement[J]. *Nat Hazards*, 2015, 75(3): 2545-2557.
- [6] Zhang S J, Lai Y M, Sun Z Z, et al. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 47(3): 263-270.
- [7] Viklander P, Eigenbrod D. Stone movements and permeability change in till caused by freezing and thawing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2000, 31(2): 151-162.
- [8] Simonsen E, Janoo V C, Isacsson U. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2002, 16: 28-50.
- [9] Lai Y M, Li S Y, Qi J L. Strength distributions of warm frozen clay and its stochastic damage constitutive model[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(2): 200-215.
- [10] Niu F J, Luo J, Lin Z J, et al. Thaw-induced slope failures and susceptibility mapping in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China[J]. *Nat Hazards*, 2014, 74(3): 1667-1682.
- [11] 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[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 186-189.
- [12] 王恩姮,赵雨森,夏祥友,等.冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6287-6296.
- [13] Torsten S, Mats L, Jannes S, et al. Quantifying the impact of a succession of freezing-thawing cycles on the pore network of a silty clay loam and a loamy sand topsoil using X-ray tomography[J]. *Gatena*, 2017, 156: 365-374.
- [14] 吴吉春,盛煜,曹元兵,等.青藏高原发现大型冻胀丘群[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1217-1228.
- [15] Wang E H, Cruse R M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze-thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92: 529-536.
- [16] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 42: 193-204.
- [17] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. *Catena*, 2006, 67: 175-182.
- [18] 齐吉琳,马巍.冻土的力学性质及研究现状[J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 133-143.
- [19] 温美丽,刘宝元,魏欣,等.冻融作用对东北黑土容重的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 492-495.
- [20] 吕艳花,赵明德,周华坤,等.青海乱海子高寒湿地植物群落结构对土壤水分变化的响应[J]. *湿地科学*, 2017, 15(5): 697-704.
- [21] Hu H C, Wang G X, Liu G S, et al. Influences of alpine ecosystem degradation on soil temperature in the freezing-thawing process on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57: 1391-1397.
- [22] Luo L F, Lin H, Li S C, et al. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 53-64.
- [23] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 9-20.