

典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应^{*}

王恩姮 赵雨森 陈祥伟^{**}

(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要 以东北典型黑土耕作区土壤为研究对象,通过对一季冻融交替后土壤团聚体、土壤楔入阻力、容重、孔隙度、饱和度、广义土壤结构指数等指标的测定和分析,对比研究了季节性冻融对黑土耕作土壤结构特征的影响.结果表明:季节性冻融加剧了黑土耕作区土壤风干团聚体的分散,但显著降低了水稳性团聚体的破坏率($P<0.05$),表现出促进其团聚的作用;季节性冻融后黑土土壤楔入阻力降低了15.45%;容重趋于一致,在 $1.10\sim 1.11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间;固相比比例持续增加,总孔隙度与毛管孔隙度均不同程度降低;土壤饱和度总体增加了13.06%,削弱了土壤潜在贮水能力.季节性冻融改善了耕作区的土壤结构,使之更适于耕作.虽然季节性冻融增强了土壤团聚体的抗蚀性,却削弱了土壤的抗冲性,增加了黑土水蚀发生的风险.

关键词 黑土 季节性冻融 土壤饱和度 土壤团聚体 广义土壤结构指数

文章编号 1001-9332(2010)07-1744-07 **中图分类号** S152.4 **文献标识码** A

Responses of soil structure to seasonal freezing-thawing in a typical black soil cultivated region. WANG En-heng, ZHAO Yu-sen, CHEN Xiang-wei (Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(7): 1744-1750.

Abstract: Taking the soil in a typical black soil cultivated region as test object, this paper analyzed its aggregate size distribution, wedge resistance, bulk density, porosity, saturation degree, and generalized structure index after a seasonal freezing-thawing cycle, and evaluated the effects of the freezing-thawing cycle on the soil structural characters. The seasonal freezing-thawing cycle aggravated the disruption of air-dried aggregates, but strengthened the aggregation of water-stable aggregates and lowered their destruction rate. After the freezing-thawing cycle, soil wedge resistance decreased by 15.45%, and soil bulk density remained relatively constant from 1.10 to 1.11 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The volume percent of soil solid phase increased, and soil total porosity and capillary porosity decreased to different degree. Soil saturation degree was improved by 13.06%, which in turn decreased the soil potential storage capacity. Seasonal freezing-thawing cycle improved the soil structure and soil arability and increased the erosion resistance of soil aggregates, but decreased the soil erosion resistance and increased the risk of the water erosion of black soil.

Key words: black soil; seasonal freezing-thawing; soil saturation degree; soil aggregate; generalized soil structure index.

冻融交替现象普遍存在于北半球中、高纬度地区及高海拔地区,是影响该区土壤生态的重要因素之一^[1].冻融作用不仅能较为强烈地影响土壤物理结构^[2-3]、改变土壤生物区系特征^[4-5],而且是 N_2O 等温室气体的重要释放源^[6-7].同时,冻融交替对改善土壤环境起着积极作用,能够调节土壤的紧实度^[8],释放N、P、有机碳等养分,进而提高土壤的可

耕性等^[9].事实上,冻融循环对土壤结构与功能的影响极其复杂,迄今尚无共识的结论^[10].

我国的黑土资源主要分布在东北地区松嫩平原东部及北部的山前台地,区内存在明显的季节性冻融现象.冻融交替过程不仅是黑土主要的成土因子,而且是黑土良好结构与肥热条件的重要基础^[11];但同时也是该区土壤侵蚀和水土流失的重要外营力之一^[12-13],特别是在温带地区,土壤流失量的50%以上发生在冻土层解冻时期^[14].目前,关于导致和加剧黑土侵蚀的原因众说纷纭,许多学者认为“坡缓

^{*} 国家自然科学基金项目(30872068)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: chenxwnfu@yahoo.com.cn

2009-10-12 收稿,2010-04-12 接受.

而长”、“降雨集中”、“母质脆弱”是黑土侵蚀的主要原因,也有学者提出“冻融交替”是加剧黑土侵蚀的关键因子,并对黑土区冻融侵蚀类型进行了分类^[15-17],而有关冻融对黑土结构的影响却鲜有研究.为此,本文拟通过典型黑土区季节性冻融前后耕作区土壤结构的变化规律,探讨季节性冻融对典型黑土结构的影响,以期为进一步揭示黑土侵蚀机理提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

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°.区域内土壤类型以粘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^[18].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 2296.2℃,年均降水量 501.7 mm,年均蒸发量 1329.4 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 样点选择与布设

2007 年 9 月下旬(季节性冻融前),于克山农场农业科技园区在收获、整地措施一致的小麦耕地内设置 30 m×30 m 样地 1 块,样地内沿对角线布设 3 个剖面,在耕作区 0 ~ 30 cm 垂直范围内,按 10 cm 机械分层,布点取样,每层 3 次重复.2008 年 5 月下旬(季节性冻融后),在同一样地内重复季节性冻融前的取样工作,样地除只经历自然季节性冻融外,无耕作等其他人为因素的影响.样地坡度 1°,土壤类型为粘化湿润均腐土.

1.3 测定项目与方法

选取 5、2、1、0.5 和 0.25 mm 组成的套筛,分别采用干筛和湿筛法进行测定土壤团聚体,并计算 >0.25 mm 团聚体破坏率($PAD_{0.25}$)、平均质量直径(D_{mm})和分形维数(D)^[19-21];土壤硬度(土壤楔入阻力)采用 ET-3 型土壤硬度计在田间进行实地测定^[22];土壤质量含水量采用烘干法测定;土壤容重、孔隙度、饱和度采用环刀法(环刀的规格为 100 cm³)测定^[23];广义土壤结构指数的计算采用以下公式^[24]:

$$I_{gss} = [(X_s - 25)X_L X_G]^{0.4769}$$
式中: I_{gss} 为广义土壤结构指数; X_s 为土壤固相体积百分比(>25%); X_L 为土壤液相体积百分比(>0); X_G 为土壤气相体积百分比(>0).

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 Sigmaplot 10.0 软件对数据进行处理,并用 SPSS 13.0 软件进行 T 检验.

2 结果与分析

2.1 季节性冻融前后土壤团聚体组成特征的变化

固体颗粒是土壤固相的基本结构要素,颗粒的大小、形状、表面特征以及组成分布等对土壤三相体系结构具有重要意义.季节性冻融后 0 ~ 10 cm 表层土壤 >2 mm 的干筛团聚体比例迅速降低,而 <2 mm 粒级的团聚体比例增加,其中以 >5 mm 的团聚体的降幅最显著($P<0.05$);与表层土壤不同,季节性冻融降低了 10 ~ 30 cm 土壤 2 ~ 5 mm 和 0.5 ~ 1 mm 团聚体的比例,其他粒级的比例则有所增加.产生这种差异的原因可能是由于不同土壤深度所经历的季节性冻融频度和强度不同所致,表层土壤季节性冻融较下层土壤强烈,其季节性冻融后平均质量直径(D_{mm})降低了 25.21% ($P<0.05$),分形维数(D)升高了 1.23%.季节性冻融对耕作区(0 ~ 30 cm)土壤干筛团聚体的影响总体表现为:显著降低了 2 ~ 5 mm 粒级团聚体的比例,提高了其他中小粒级团聚体的比例; D_{mm} 较冻融前降低了 10.79%,而 D 则增加了 3.8%,差异均达显著水平(表 1).可见,季节性冻融过程加剧了典型黑土区耕作土壤风干团聚体的分散.

从表 2 可以看出,季节性冻融前,耕作区各层土壤水稳性团聚体比例随着粒级的减小而逐渐增加.季节性冻融后,表层(0 ~ 10 cm)土壤 >1 mm 和 <0.25 mm 团聚体比例有所降低,而 0.25 ~ 1 mm 中粒级团聚体比例显著增加($P<0.05$);10 ~ 20 cm 土层内,0.5 ~ 2 mm 和 <0.25 mm 的团聚体比例不同程度降低,而其他粒级显著增加($P<0.05$);20 ~ 30 cm 土层内,0.5 ~ 2 mm 团聚体比例显著降低($P<0.05$),增加了 >2 mm 和 <0.5 mm 水稳性团聚体的组成.季节性冻融对耕作区(0 ~ 30 cm)土壤水稳性团聚体的影响总体表现为:显著降低了 <0.25 mm 小粒级水稳性团聚体比例,显著增加了 >2 mm 大粒级水稳性团聚体的比例.土壤 D_{mm} 、 D 和 $PAD_{0.25}$ 的变化幅度随着土壤深度的增加逐渐降低,且总体变化均达显著水平,其中, D_{mm} 较冻融前增加了 10.81%, D 和 $PAD_{0.25}$ 较冻融前平均降低了 0.68% 和 6.19% ($P<0.05$).可见,季节性冻融能够增强 >0.25 mm 团聚体的水稳性,可促进典型黑土区耕作土壤水稳性团聚体的团聚.

表 1 季节性冻融前后土壤风干团聚体组成
Tab.1 Air-dry soil aggregate distribution before and after seasonal freezing-thawing cycle (mean±SD)

处 理 Treatment	土壤深度 Soil depth (cm)	土壤团聚体比例 Percentage of soil aggregate (%)						D_{mm} (mm)	D
		>5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm		
冻融前 Before freezing- thawing cycle	0 ~ 10	18.72±2.72	31.51±3.51	8.49±1.51	17.79±3.21	13.82±1.18	9.67±0.33	2.38±0.21	2.44±0.01
	10 ~ 20	21.57±1.57	33.34±3.34	7.50±1.50	19.14±0.86	12.08±1.92	6.38±0.62	2.56±0.16	2.34±0.03
	20 ~ 30	10.11±1.80	41.31±1.39	7.18±0.28	23.18±1.96	11.64±0.49	6.58±0.46	2.29±0.12	2.33±0.01
	0 ~ 30	16.80±2.40	35.39±1.94	7.72±0.52	20.04±1.13	12.51±0.91	7.54±1.67	2.41±0.10	2.37±0.05
冻融后 After freezing- thawing cycle	0 ~ 10	9.05±0.91*	24.92±2.49	11.68±1.75	24.72±3.71	18.60±2.79	11.03±4.85	1.78±0.08*	2.47±0.12
	10 ~ 20	22.72±1.72	24.91±1.91*	8.55±0.45	17.88±1.12	15.97±1.03*	9.97±1.03*	2.36±0.13	2.46±0.03*
	20 ~ 30	20.72±1.28*	26.22±1.22*	7.98±1.02	18.84±1.84	16.65±1.65*	9.59±2.41	2.30±0.02	2.45±0.05
	0 ~ 30	17.50±7.38	25.35±0.75*	9.40±1.99	20.48±3.70	17.08±1.37*	10.20±0.75*	2.15±0.32*	2.46±0.01*

D_{mm} : 平均质量直径 Mean mass diameter; D : 分形维数 Fractal dimension; * $P<0.05$. 下同 The same below.

表 2 季节性冻融前后土壤水稳性团聚体组成
Tab.2 Water-stable soil aggregate distribution before and after seasonal freezing-thawing cycle (mean±SD)

处 理 Treatment	土壤深度 Soil depth (cm)	土壤团聚体比例 Percentage of soil aggregate (%)						D_{mm} (mm)	D	$PAD_{0.25}$ (%)
		>5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm			
冻融前 Before freezing- thawing cycle	0 ~ 10	0	1.18±	1.80±	6.10±	12.20±	78.72±	0.36±	2.94±	87.72±
			0.18	0.20	1.22	2.44	3.68	0.01	0.01	1.00
	10 ~ 20	0	0.60±	1.82±	12.50±	19.44±	65.64±	0.38±	2.90±	90.28±
			0.20	0.18	2.50	1.44	3.56	0.01	0.01	0.42
冻融后 After freezing- thawing cycle	20 ~ 30	0	0.42±	2.38±	10.62±	18.48±	68.10±	0.37±	2.91±	90.34±
			0.08	0.12	0.38	2.48	1.90	0.00	0.00	0.37
	0 ~ 30	0	0.73±	2.00±	9.74±	16.71±	70.82±	0.37±	2.92±	89.35±
			0.40	0.33	3.29	3.93	6.95	0.01	0.02	1.28
冻融前 Before freezing- thawing cycle	0 ~ 10	0	0.98±	1.51±	16.83±	24.39±	56.29±	0.42±	2.87±	80.41 ±
			0.02	0.09	1.17*	0.61*	1.89*	0.01*	0.01*	7.97
	10 ~ 20	0.24±	2.72±	1.58±	8.73±	22.49±	64.25±	0.44±	2.90±	84.48±
		0.06*	1.28*	0.42	1.73	0.51*	0.55	0.04	0.01	1.74*
冻融后 After freezing- thawing cycle	20 ~ 30	0	1.30±	1.75±	7.44±	20.92±	68.59±	0.38±	2.92±	86.02±
			0.90	0.25*	1.56*	0.08	2.79	0.04	0.01	4.09
	0 ~ 30	0.08±	1.67±	1.61±	11.00 ±	22.60±	63.04±	0.41±	2.90±	83.82±
		0.14	0.93*	0.12*	5.09	1.74*	6.24*	0.03*	0.03*	2.90*

$PAD_{0.25}$: >0.25 mm 团聚体破坏率 Disruption rate of >0.25 mm aggregate.

2.2 季节性冻融前后土壤楔入阻力的变化

土壤楔入阻力,即土壤硬度,主要反映土壤的紧实程度,土壤硬度的变化直接影响土壤的可耕性.季节性冻融前后土壤硬度的垂直变化规律一致,均随着土壤深度的增加而逐渐增大(图1).季节性冻融能够降低土壤硬度,0~30 cm 耕作区域内平均土壤硬度较冻融前降低了15.45%.不同土壤层次季节性冻融后土壤硬度的降低幅度不同,表现出随着土壤深度的增加,土壤硬度的降低幅度逐渐减小,降低幅度范围为30.33%~84.11%,其中以表层(0~10 cm)土壤的作用效果最显著($P<0.05$).

2.3 季节性冻融前后土壤容重的变化

季节性冻融对典型黑土耕地土壤容重的影响较复杂(图1),冻融前耕作区从上至下3个土层的土壤容重依次为1.11、1.09和1.16 g·cm⁻³,冻融后容重相对较低的0~10 cm和10~20 cm土层略有增加,分别较冻融前增加了0.12%和1.64%;而容重相对较高的20~30 cm土层则降低了4.79%,但

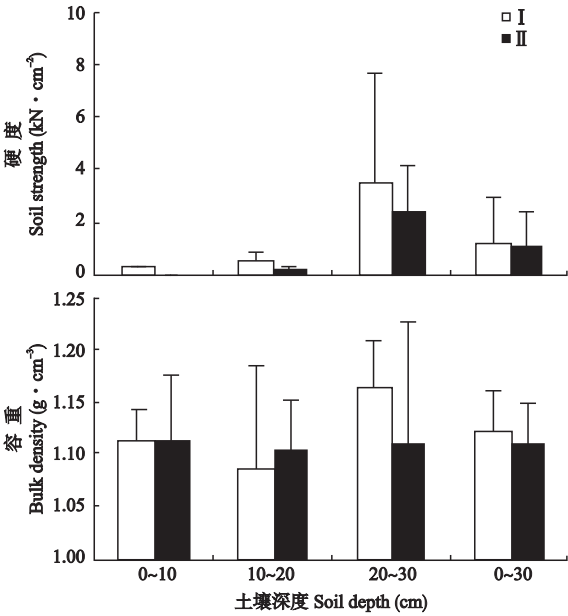


图 1 季节性冻融前后土壤硬度和容重的变化
Fig.1 Changes of soil wedge resistance and bulk density before and after seasonal freezing-thawing cycle (mean±SD).
I: 冻融前 Before freezing-thawing cycle; II: 冻融后 After freezing-thawing cycle. 下同 The same below.

差异均不显著. 季节性冻融后耕作区内各土层的土壤容重较相近, 在 $1.10 \sim 1.11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 总体表现出一定的降低作用.

2.4 季节性冻融前后土壤孔隙度的变化

由图 2 可知, 季节性冻融后 0 ~ 30 cm 土层内, 土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均不同程度地降低, 其中, 表层土壤的变化幅度相对较大, 分别较冻融前降低了 10.22%、9.14% 和 21.24%, 其中总孔隙度的变化差异达到了显著水平 ($P < 0.05$); 10 ~ 20 cm 土层内各孔隙度的变化相对较小, 三者分别降低了 3.77%、2.18% 和 10.58%, 但差异均未达到显著水平; 与上层土壤表现不同, 在 20 ~ 30 cm 土层内, 虽然总孔隙度较冻融前仅降低了 6.69%, 但其内部的孔隙结构变化较强烈, 非毛管孔隙度从 2.12% 提高到 6.99%, 而毛管孔隙度则降低了 16.69% ($P < 0.05$). 季节性冻融对典型黑土耕作区土壤 0 ~ 30 cm 孔隙结构的影响总体表现为: 非毛管孔隙度小幅增加, 但由于毛管孔隙度降低的幅度相对较大, 最终导致总孔隙度显著降低 ($P < 0.05$).

由图 3 可知, 与冻融前相比, 0 ~ 30 cm 土层范围内季节性冻融后 NCP/CP 增加了 27.71%, 但未达显著水平. 季节性冻融对土壤孔隙结构的影响主要以减少非毛管大孔隙度为主, 毛管孔隙度虽然也

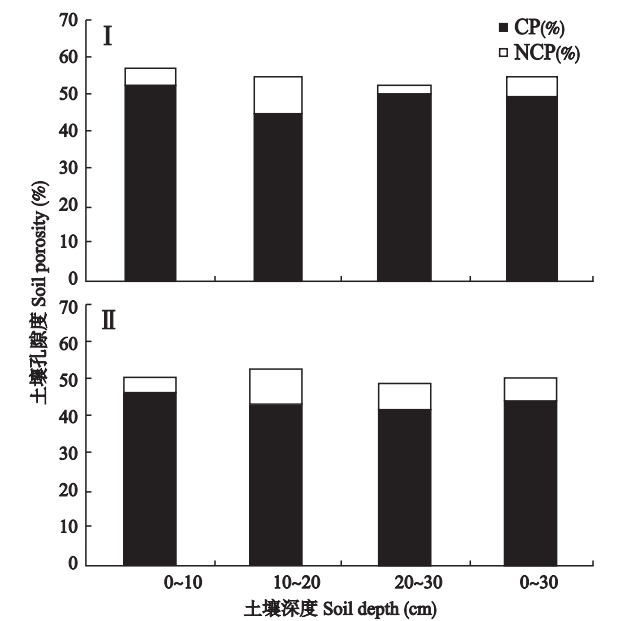


图 2 季节性冻融前后土壤孔隙度的变化
Fig.2 Change of soil porosity before and after seasonal freezing-thawing cycle.
NCP: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity. 下同 The same below.

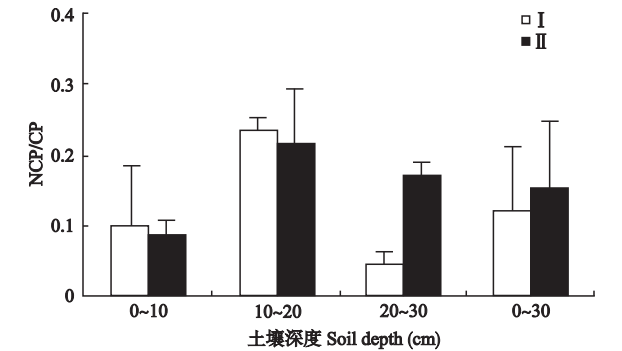


图 3 季节性冻融前后土壤非毛管孔隙度/毛管孔隙度的变化
Fig.3 Change of soil NCP/CP before and after seasonal freezing-thawing cycle (mean±SD).

有不同程度的降低, 但其变化幅度相对较小, 从而导致各土层的 NCP/CP 均有所降低. 在 20 ~ 30 cm 范围内, 由于非毛管孔隙度的增加及毛管孔隙度的显著降低导致 NCP/CP 迅速增加近 3 倍.

2.5 季节性冻融前后土壤饱和度的变化

土壤饱和度指单位土体内水的容积与孔隙的容积之比, 土壤完全饱和时的饱和度为 1. 在非饱和状态下, 饱和度越大说明土壤中孔隙被水分占据的比例越高, 因此潜在贮水能力就越差, 易产生径流; 反之, 饱和度越小, 潜在贮水能力越强, 进而能够促进土壤入渗, 减少径流. 从图 4 可以看出, 季节性冻融前, 土壤饱和度为 0.35 ~ 0.41, 并表现出随着土层深度的加深呈先升高后降低的趋势. 季节性冻融后, 各土层土壤饱和度均有所增加, 并且随着土壤深度的增加其变化幅度逐渐增大, 依次提高了 9.42% (0 ~ 10 cm)、11.42% (10 ~ 20 cm) 和 18.04% (20 ~ 30 cm), 但差异未达显著水平. 总体看来, 0 ~ 30 cm 土层的土壤饱和度平均升高了 13.06%, 表明季节性冻融后耕作区土壤潜在贮水能力被削弱, 初春融雪期易产生径流; 同时该区年降水量分配不均, 全年一半以上的降雨及强度降雨多集中在 7—9 月, 因此在 6 月冻融交替结束后, 由于土壤饱和度增加, 极易诱发面蚀和细沟侵蚀, 加剧该区耕地土壤的侵蚀风险.

2.6 季节性冻融前后广义土壤结构指数的变化

广义土壤结构指数 (I_{gss}) 是基于土壤固、液、气三相为研究对象, 借鉴柯布-道格拉斯生产函数构建的能够定量有效表达土壤结构的指标^[24]. 旱作土壤的理想三相结构是: 固相 50%, 液相和气相各占 25%^[25], 此时 I_{gss} 为 100, 其他情况下的 I_{gss} 均小于 100, 故 I_{gss} 值越高, 说明土壤越接近理想的三相结构比例. 由图 4 可知, 季节性冻融前后各土层 I_{gss} 的垂

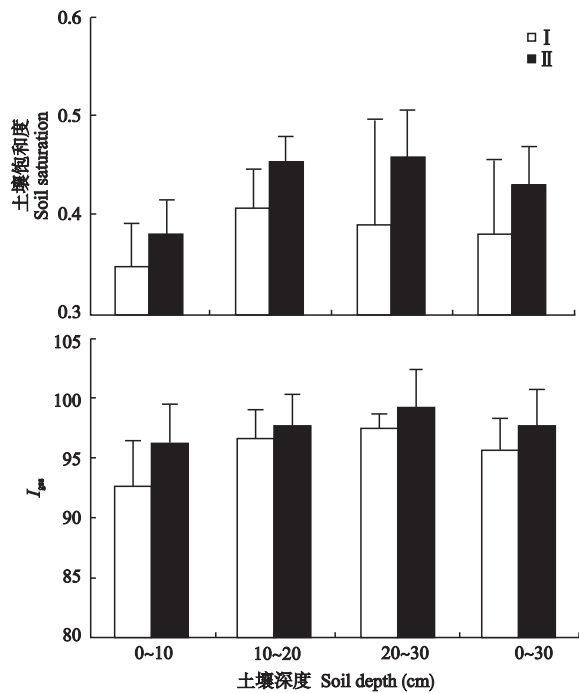


图4 季节性冻融前后土壤饱和度和广义土壤结构指数的变化

Fig. 4 Change of soil saturation and I_{gss} before and after seasonal freezing-thawing cycle (mean±SD).

I_{gss} : 广义土壤结构指数 Generalized soil structure index.

直变化规律一致,即均随着土层深度的增加而逐渐增大.与冻融前相比,季节性冻融后土壤的 I_{gss} 均有不同程度的增加,其中以表层土壤 I_{gss} 的增幅最大(增加了3.97%),而10~20 cm土壤 I_{gss} 的增幅最小(增加了0.97%).整体上看,0~30 cm土壤 I_{gss}

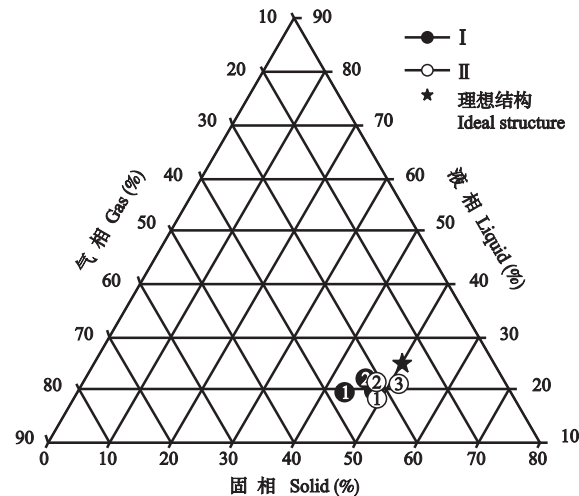


图5 季节性冻融前后土壤三相的变化

Fig. 5 Change of soil three phases before and after seasonal freezing-thawing cycle.

图中1, 2, 3 分别代表土层深0~10、10~20、20~30 cm 1, 2, 3 in the figure meant soil depth of 0~10, 10~20, 20~30 cm, respectively.

增加了2.24%,但差异未达显著水平.

此外,结合土壤三相的二维三系图(图5)可以看出,在0~20 cm 土层范围内,季节性冻融通过增加土壤固相比例和不同程度地减小液相与气相的比例来调节土壤三相,进而提高 I_{gss} .在20~30 cm 土层范围内,季节性冻融则是通过增加土壤固相和液相的比例、同时持续降低气相的比例来实现对土壤三相结构的调节.这表明黑土区耕作土壤的结构能够在季节性冻融后得到改善,使之更接近理想的三相结构.

3 讨 论

由于水分子和粘土矿物表面粘附能力的不同,随着温度的降低,最先结冰的土壤水是重力水,其次分别为毛管水和薄膜水,而吸附水的结冰温度可低达-80℃~-75℃^[26-27].温度降低条件下,储存并活动于土壤大孔隙中的重力水首先冻结,导致体积膨胀,使其周围的小粒级土壤颗粒因受到挤压而缩短了颗粒之间的距离,增加了吸引力,促进了其团聚并保持稳定^[28].与此同时,也正是由于重力水冻结膨胀作用,致使构成大孔隙结构的大团聚体首先遭到破坏,这可能是冻融交替加剧风干团聚体分散却能促进水稳性团聚体团聚的重要原因.此外,冻融交替能够加剧根系、菌根、土壤微生物残体等的分解,提高土壤有机质含量,进而促进土壤颗粒的团聚,提高其稳定性^[29].

冻融循环对土壤孔隙结构的影响具有双重性,即对于松散土壤,冻融会使孔隙比降低、容重增加;而对于密实的土壤则相反^[30].多次冻融交替后,土壤容重趋于某一定值,该定值与土壤初始干容重无关,而与土体的种类有关^[31].但也有研究认为,在冻融交替过程中无论冻结部分还是未冻结部分都会由于冻胀力的挤压而产生压密现象,常会在一定程度上减小孔隙比^[28,32].本研究结果发现,季节性冻融后土壤孔隙比由冻融前的1.21降至1.04,这与以往的研究^[28,32]结果相吻合.

剪切力和硬度是土壤对冻融交替作用反应较敏感的指标,即使土壤容重没有发生变化,硬度也会由于冻融交替而降低,而且粘土的降低幅度比壤土更明显^[33].本研究结果表明,季节性冻融后黑土土壤硬度大幅降低,土壤容重趋于一致,土壤总孔隙度降低,而固相比例增加.但值得注意的是,由于各层次内土壤颗粒密度的差异,土壤容重与总孔隙度并没有表现出严格的负相关,因此可以判断,冻融交替能

够改变土壤的颗粒密度,其变化程度可能与土层内矿物和有机质的含量与组成及冻融的强度和频度有关。

冻融交替作用通过改变土壤物理及结构力学等特征而削弱土壤抗蚀性,被认为是直接或间接影响土壤侵蚀过程的最重要因素之一^[34]。本研究发现,黑土耕地土壤季节性冻融后土壤饱和度增加、潜在贮水能力下降,加剧了该区的土壤侵蚀风险,这与张永光等^[12]的研究结论一致,其认为黑土区在春季表层土壤解冻、地表裸露和存在季节性冻土层的条件下,春季融雪及强降水易造成强烈的浅沟侵蚀。需要指出的是,土壤水稳性团聚体在冻融之后稳定性增强,破坏率降低,理论上应该是增强了土壤的抗蚀性,并且在黑土区发生面蚀的坡面以及侵蚀沟的沟尾与沟底处也确实清晰可见颜色明亮、结构稳定的团聚体。因此,结合水稳性团聚体的变化规律、初春融雪期的浅沟侵蚀特征以及切沟的发育模式,我们认为季节性冻融提高了典型黑土区耕作土壤团聚体的抗蚀性,但却削弱了土壤的抗冲性。建议在今后黑土侵蚀过程及机理的研究中,将黑土可蚀性分为土壤抗蚀性和土壤抗冲性两方面来考虑。

4 结 论

季节性冻融加剧了典型黑土区耕作土壤风干团聚体的分散,却促进了水稳性团聚体的团聚,增加了 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体的含量,显著降低了其破坏率($P<0.05$),提高了团聚体的水稳性。

季节性冻融后,土壤硬度以表层($0\sim 10\text{ cm}$)变化最显著,较冻融前降低了 84.11% ($P<0.05$);各层次土壤容重趋于一致,在 $1.10\sim 1.11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;总孔隙度和毛管孔隙度均有降低趋势,但非毛管孔隙度平均增加了 4.10% ,非毛管孔隙度与毛管孔隙度的比值也提高了 27.71% ;土壤饱和度均有不同程度的增加,削弱了耕作区土壤的潜在贮水能力。

广义土壤结构指数在季节性冻融后均有所增加,各土层的三相结构更接近理想状态下的三相比例,说明季节性冻融能够有效改善典型黑土区耕作土壤的结构。

参考文献

[1] Wang L-F (王连峰), Cai Y-J (蔡延江), Xie H-T (解宏图). Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycles. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(10): 2361 -

2366 (in Chinese)

[2] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 2003, **52**: 1-8

[3] Sahin U, Angin I, Kiziloglu FM. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash. *Soil & Tillage Research*, 2008, **99**: 254-260

[4] Walker VK, Palmer GR, Voordouw G. Freeze-thaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community. *Applied & Environmental Microbiology*, 2006, **72**: 1784-1792

[5] Yang S-Z (杨思忠), Jin H-J (金会军). Physiological and ecological effects of freezing and thawing processes on microorganisms in seasonally-froze ground and in permafrost. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 5065-5074 (in Chinese)

[6] Ludwig B, Wolf I, Teepe R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N_2O in a freeze-thaw event in an agricultural soil. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2004, **167**: 678-684

[7] Teepe R, Ludwig B. Variability of CO_2 and N_2O emissions during freeze-thaw cycles: Results of model experiments on undisturbed forest soil cores. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2004, **167**: 153-159

[8] Unger PW. Over winter changes in physical-properties of no-tillage soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**: 778-782

[9] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 1495-1505

[10] Henry HAL. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, **39**: 977-986

[11] Cui H-S (崔海山), Zhang B (张 柏), Yu L (于磊), et al. Pattern and change of black soil resources in China. *Resources Science* (资源科学), 2003, **25**(3): 64-68 (in Chinese)

[12] Zhang Y-G (张永光), Wu Y-Q (伍永秋), Liu B-Y (刘宝元). Ephemeral gully erosion during the spring freeze-thawing period in black soil rolling-hill regions of northeast. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2006, **24**(3): 306-311 (in Chinese)

[13] Hu G (胡 刚), Wu Y-Q (伍永秋), Liu B-Y (刘宝元), et al. The growth characteristics of gully erosion over rolling hilly black soil area of Northeast China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2007, **62**(11): 1165-1173 (in Chinese)

[14] Froese JC, Cruse RM, Ghaffarzadeh M. Erosion mechanics of soils with an impermeable subsurface layer. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 1836-1841

[15] Liu X-J (刘绪军), Jing G-C (景国臣), Qi H-Y (齐恒玉). Preliminary on main morphology of gully freezing and thawing erosion in Ke-Bai black soil region. *Sci-*

entific & Technical Information of Soil & Water Conservation (水土保持科技情报), 1999(1): 28-30 (in Chinese)

[16] Wang Y-X (王玉玺), Xie Y-J (解运杰), Wang P (王 萍). Cause analysis of black soil in Northeast of China. *Scientific & Technical Information of Soil & Water Conservation* (水土保持科技情报), 2002(3): 27-29 (in Chinese)

[17] Li F-P (李发鹏), Li J-Y (李景玉), Xu Z-X (徐宗学). The status quo of black soil degradation and water and soil loss in Northeast China. *Research of Soil & Water Conservation* (水土保持研究), 2006, 13(3): 50-54 (in Chinese)

[18] Gong Z-T (龚子同). Classification System of Chinese Soil: Theories, Methods and Practice. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)

[19] Liu X-Y (刘孝义). Soil Physics and Research Methods of Soil Melioration. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1981 (in Chinese)

[20] Yang P-L (杨培岭), Luo Y-P (罗远培), Shi Y-C (石元春). Fractal features of soils characterized by grain weight distribution. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1993, 38(20): 1896-1899 (in Chinese)

[21] Yan F-L (闫峰陵), Shi Z-H (史志华), Cai C-F (蔡崇法), *et al.* Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hill slope in red soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, 44(4): 577-583 (in Chinese)

[22] Wang E-H (王恩姮), Chai Y-F (柴亚凡), Chen X-W (陈祥伟). Effects of heavy machinery operation on the structural characters of cultivated soils in black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, 19(2): 351-356 (in Chinese)

[23] Chen L-X (陈立新). Course of Soil Experimentation and Practice. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2005 (in Chinese)

[24] Wang E-H (王恩姮), Zhao Y-S (赵雨森), Chen X-W (陈祥伟). Quantification of generalized soil structure based on soil three phases. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, 29(4): 2067-2082 (in Chinese)

[25] Brandy NC, Weil RR. The Nature and Properties of Soils. New Jersey: Pearson Education Inc., 2002

[26] Zeng D-C (曾德超). Mechanical Soil Mechanics. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1995 (in Chinese)

[27] Qin Y-D (秦耀东). Soil Physics. Beijing: Higher Education Press, 2003 (in Chinese)

[28] Xu X-Z (徐学祖), Wang J-C (王家澄), Zhang L-X (张立新). Physics of Frozen Soils. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)

[29] Jastrow JD. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28: 665-676

[30] Peter V. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35: 471-477

[31] Yang C-S (杨成松), He P (何 平), Cheng G-D (程国栋), *et al.* Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering* (岩石力学与工程学报), 2003, 22(suppl.): 2695-2699 (in Chinese)

[32] Chamberlain EJ, Gow AJ. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology*, 1979, 13: 73-92

[33] Benjamin JG. Freeze-thaw Effects on penetrometer resistance and shear strength of two soils. The ASA-CS-SA-SSSA International Annual Meeting, Salt Lake City, 2005: 6-10

[34] Bryan RB. Soil erodibility and processes of water erosion on hill slope. *Geomorphology*, 2000, 32: 385-415

作者简介 王恩姮,女,1982年生,博士研究生.主要从事土壤侵蚀和水土保持研究. E-mail: erxin222@163.com

责任编辑 张凤丽