

季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响^{*}

王恩姮 赵雨森 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,通过对不同水分补充条件下、不同频度和程度的冻融交替处理后土壤干筛团聚体和水稳性团聚体组成、破坏率($PAD_{0.25}$ 、 $PAD_{1.0}$)、平均质量直径(D_{mm})、平均质量比表面积(SA_{mm})和分形维数(D)等特征指标的测定与分析,研究季节性冻融对典型黑土区表层土壤团聚体特征的影响.结果表明:无水无冻融及无水冻融显著增加了 >5 mm干筛团聚体和 >0.25 mm水稳性团聚体的含量,干筛和水稳性团聚体的 D_{mm} 分别较冻融前增加了7.98%~29.41%和36.11%~44.44%, SA_{mm} 、 D 的变化规律也表现为促进大团聚体的团聚作用.少水冻融和季节冻融则显著增加了 <2 mm干筛团聚体和0.25~1 mm水稳性团聚体的含量, D_{mm} 、 SA_{mm} 、 D 均表现出加剧风干团聚体拆分的趋势,水稳性团聚体的 SA_{mm} 和 D 分别降低了10.88%~25.52%和1.02%~3.40% ($P<0.05$),团聚作用有所增强.季节性冻融后 $PAD_{0.25}$ 降低了33.45% ($P<0.05$), $PAD_{1.0}$ 无明显变化,典型黑土区季节性冻融增强了土壤团聚体的水稳性.

关键词 黑土 季节性冻融 土壤团聚体 平均质量比表面积

文章编号 1001-9332(2010)04-0889-06 **中图分类号** S152.4 **文献标识码** A

Effects of seasonal freeze-thaw cycle on soil aggregate characters in typical phaeozem region of Northeast China. WANG En-heng, ZHAO Yu-sen, CHEN Xiang-wei (School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(4): 889–894.

Abstract: Taking the cropland soil in typical phaeozem region of Northeast China as test object, this paper analyzed its dry-sieved and water-stable aggregates composition, disruption rate ($PAD_{0.25}$, $PAD_{1.0}$), mean mass diameter (D_{mm}), mean mass soil surface area (SA_{mm}), and fractal dimension (D) under different water supplement and different frequency and rate of freeze-thaw cycle, aimed to study the effects of seasonal freeze-thaw cycle on the top soil aggregate characters in the region. No water supplement plus no freeze-thaw cycle and no water supplement plus freeze-thaw cycle increased the amounts of >5 mm dry-sieved and >0.25 mm water-stable aggregates significantly, and the D_{mm} of the aggregates by 7.98%–29.41% and 36.11%–44.44%, respectively. The measurement of SA_{mm} and D also indicated the promotion of the aggregation of macroaggregates. However, smaller water supplement plus freeze-thaw cycle and seasonal freeze-thaw cycle increased the amounts of <2 mm dry-sieved aggregates and 0.25–1 mm water-stable aggregates significantly, accelerated the disruption of air-dried aggregates, and decreased the SA_{mm} and D of water-stable aggregates by 10.88%–25.52% and 1.02%–3.40%, respectively, indicating that aggregation was somewhat promoted. After seasonal freeze-thaw cycle, the $PAD_{0.25}$ decreased by 33.45% ($P<0.05$) but $PAD_{1.0}$ had less change, suggesting that the seasonal freeze-thaw cycle in typical phaeozem region did not weaken soil splash-resistibility, while strengthened the water-stability of soil aggregates.

Key words: phaeozem; seasonal freeze-thaw cycle; soil aggregate; mean mass soil surface area.

^{*} 国家自然科学基金项目(30872068)和黑龙江省重大科技攻关项目(GA06B302-3)资助.

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

2009-06-22 收稿, 2010-01-28 接受.

冻土,包括多年冻土和季节冻土.其不仅是一种对温度十分敏感且性质不稳定的土壤类型,而且是我国宝贵的土地资源^[1],其分布面积分别占我国国土面积的 21.5% 和 53.5%.东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,主要分布在东北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.季节性冻层的存在既是黑土成土过程的主要驱动因子,也是黑土良好的土壤结构与肥力条件的重要基础^[2].然而,季节性冻融也是该区土壤侵蚀、水土流失的重要营力之一^[3-4],土壤流失量的 50% 以上发生在冻土层解冻时期^[5].因此,在该区开展冻土研究不仅可以为深入理解和探明季节性冻融过程及其对土壤环境的影响,还可以为黑土资源的保护和利用提供科学依据.

冻融交替可较为强烈地影响土壤物理和化学性质^[6-7],进而影响土壤生物区系等特征^[8-9].已有研究表明,冻融交替作用对土壤结构和性质的影响主要取决于土壤前期含水量、容重、孔隙状况、冻融温度及循环次数等条件,同时还由于土壤质地、有机质含量、化学组分及土壤中根系发育的差异而不同^[10-11].土壤团聚体作为土壤结构的基本骨架,其组成及稳定性是土壤结构稳定性及土壤可蚀性的重要评价指标^[12-14].冻融交替对土壤团聚体组成及稳定性的影响将直接或间接影响土壤物理结构、化学环境及大型土壤动物、土壤微生物的生长、繁殖与活动,进而影响土壤质量与功能^[6,15].本文以东北典型黑土区耕作土壤为对象,研究了一季冻融过程中不同频度和程度的冻融交替对土壤团聚体的影响规律,以期为进一步探讨季节性冻融对黑土区土壤结构与侵蚀环境的影响提供理论依据.

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的克山县克山农场(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°.区域内土壤类型以黑土占绝对优势,只在部分低洼处镶嵌分布少量的草甸土,属典型黑土区^[16].温带大陆性季风气候特征明显,年平均气温 0.9℃,≥10℃有效积温 2296.2℃,年平均降水量 501.7 mm,平均蒸发量 1329.4 mm,无霜期 115 d,土壤结冻期从 11 月初至翌年 6 月中旬,最大结冻深度可达 2.5 m.

1.2 试验设计与样品采集

2007 年 9 月下旬,在克山农场农业科技园区收

获整地后的小麦地表层 0~10 cm 范围内取混合土样约 3 kg,用于季节冻融前土壤团聚体的分析(CK);并用自制原状土取样装置取 40 cm×30 cm×10 cm 原状土 6 块,其中 3 块置于变温室内(室内气温-15℃~20℃,随室外温度而变化,无水分补充,有冻融交替现象,即无水冻融,以下简称 N-FT),另外 3 块置于恒温室内(室内温度约 18℃~22℃,无水分补充,无冻融交替现象,即无水无冻融,以下简称 N-N);同时在取样点附近选 2 块 1 m×2 m 的样地,其中 1 块地用木板遮盖,木板距地表 10 cm(与季节冻融相比,除土体内原含水量外有下层土壤水分及少量雨雪水补充,有冻融现象,即少水冻融,以下简称 L-FT);另外 1 块地无任何遮盖处理(除土体内原含水量外有一季雨雪水分的自然补充,属自然状态下季节冻融,以下简称 S-FT).2008 年 5 月下旬,分别对 N-FT、N-N、L-FT、S-FT 条件下的样品进行混合取样(3 kg),用于季节冻融后土壤团聚体的分析.其中,处理 S-FT、L-FT、N-FT 的冻融强度及频度依次减弱,N-N 无冻融现象.

1.3 测定项目与方法

土壤团聚体选取 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^[17-18].在此基础上,计算>0.25 mm 团聚体比例($PA_{0.25}$)、>1 mm 团聚体比例($PA_{1.0}$)、平均质量直径(D_{mm})、团聚体破坏率($PAD_{0.25}$ 、 $PAD_{1.0}$)^[19-21]和分形维数(D)^[22]等团聚体特征指标.按下列公式计算团聚体平均质量比表面积(SA_{mm}):

$$SA_{mm} = \sum_{i=1}^n \frac{6w_i}{\rho_i d_i}$$

式中:假设土壤团聚体大致形状为球体,忽略各个粒级间土壤密度的差异,即 $\rho_1 \cdots \rho_n = 2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; \bar{d}_i 为两筛分粒级 d_i 和 d_{i+1} 的平均值; w_i 为与 \bar{d} 相对应的筛分粒级的质量百分比.

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对数据进行处理,并分别对不同处理与对照进行 t 检验.

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤团聚体组成特征的变化

2.1.1 风干团聚体组成特征 季节性冻融前,土壤中 2~5 mm 的风干团聚体比例最高,其次是>5 mm 和 0.25~1 mm 的团聚体,1~2 mm 及<0.25 mm 中小粒级团聚体的比例相对较低,不足 10%.经过不同条件冻融处理后,干筛团聚体的组成特征发生了

表 1 不同处理下土壤粒级团聚体组成特征
Tab.1 Aggregate-size distribution and aggregate stability measured by the dry-sieve and wet-sieve method under different treatments (mean±SD, %)

	处 理 Treatment	土壤粒级团聚体组成 Aggregate-size distribution and aggregate stability							
		>5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm	$PA_{0.25}$	$PA_{1.0}$
风干团聚体	CK	18.72±2.72	31.51±3.51	8.49±1.51	17.79±3.21	13.82±1.18	9.67±0.33	90.33±0.33	58.72±4.72
Air-dry	N-N	24.32±3.32 *	29.64±4.64	7.87±2.13	16.44±2.47	13.10±1.9	8.62±1.41	91.38±1.40	61.83±5.83
aggregate	N-FT	31.25±3.25 *	36.53±4.53	7.21±1.29	11.75±1.2 *	7.73±3.2 *	5.53±1.97 *	94.47±1.97 *	74.99±6.49 *
	L-FT	6.66±0.66 *	21.65±2.1 *	12.06±1.81 *	32.29±5.7 *	19.03±0.9 *	8.31±5.66	91.69±5.66	40.37±1.02 *
	S-FT	9.05±0.9 *	24.92±2.49 *	11.68±1.75 *	24.72±3.71 *	18.60±2.79 *	11.03±4.85	88.97±4.85	45.65±1.65 *
水稳性团聚体	CK	0.00±0.00	1.18±0.18	1.80±0.20	6.10±1.22	12.20±2.44	78.72±3.68	21.28±3.68	2.98±0.02
Water-stable	N-N	0.05±0.01 *	2.30±0.46 *	4.21±0.79 *	15.38±2.62 *	27.75±5.55 *	50.30±8.48 *	49.70±8.49 *	6.56±0.32 *
aggregate	N-FT	0.10±0.02 *	3.84±0.16 *	3.38±0.72 *	15.23±2.77 *	21.05±4.21 *	56.38±7.82 *	43.62±7.84 *	7.32±0.86 *
	L-FT	0.00±0.00	0.39±0.08 *	0.92±0.18 *	6.99±1.31	27.15±5.43 *	64.54±6.84 *	35.46±6.85 *	1.31±0.11 *
	S-FT	0.00±0.00	0.98±0.20	1.51±0.30	16.83±3.37 *	24.39±4.88 *	56.29±8.35 *	43.71±8.35 *	2.49±0.11 *

* $P<0.05$; $PA_{0.25}$: 小于 0.25 mm 团聚体百分比含量 Percentage of aggregate smaller than 0.25 mm; $PA_{1.0}$: 小于 1.00 mm 团聚体百分比含量 Percentage of aggregate smaller than 1.00 mm.

明显的变化. 从表 1 可以看出,受冻融过程中有无水分补充的制约,不同处理土壤团聚体组成特征的变化规律表现出一定差异性,其中,无水冻融与无冻融处理后,总体趋势为:<2 mm 的中小粒级团聚体比例表现出不同程度的降低,>2 mm 的大团聚体比例有所增加,并且>5 mm 大团聚体比例的增加达到了显著水平($P<0.05$),表现出促进团聚作用的趋势,其中以无水冻融后团聚体组成的变化幅度较大. 在有水分补充的季节性冻融和少水冻融条件下,团聚体组成的变化趋势为:>2 mm 的大团聚体比例降低,<2 mm 的小团聚体比例增加,表现出一定的团聚体拆分作用,除<0.25 mm 外,各粒级团聚体含量的差异均达显著水平($P<0.05$),且少水冻融后团聚体比例的变化幅度均大于田间实际季节性冻融. 此外,通过对不同处理 $PA_{0.25}$ 和 $PA_{1.0}$ 的分析,进一步证明了无水冻融(N-FT)与无水无冻融(N-N)对土壤团聚体的影响以促进大团聚体团聚作用为主,尤其以无水冻融的变化最明显,其 $PA_{0.25}$ 和 $PA_{1.0}$ 分别增加了 4.58% 和 27.71% ($P<0.05$);而有水冻融(S-FT 和 L-FT)则以对大团聚体的拆分作用为主,其中 $PA_{1.0}$ 降低了 22.26% ~ 31.25% ($P<0.05$).

2.1.2 水稳性团聚体组成特征 与干团聚体不同,水稳性团聚体均表现出随着粒级的减小组成比例逐渐增加的趋势. 从不同冻融处理后土壤水稳性团聚体组成测定结果来看,同样以是否有水分补充为限制条件,无水冻融和无水无冻融处理大幅降低了<0.25 mm 粒级团聚体的比例,不同程度地提高了大团聚体(>0.25 mm)的比例,尤其促进了>5 mm 团聚体的生成,各粒级团聚体含量的差异均达显著水

平($P<0.05$);而季节性冻融和少水冻融处理则降低了>1 mm 和<0.25 mm 粒级团聚体的比例,仅增加了 0.25 ~ 1 mm 中等粒级团聚体的比例(表 1). 与对照相比,各处理的 $PA_{0.25}$ 均有所增加,增加幅度为 66.64% ~ 133.55% ($P<0.05$);但 $PA_{1.0}$ 的变化趋势却与团聚体组成特征相似,即无水分补充的冻融过程和无水无冻融处理大幅提高了 $PA_{1.0}$,提高幅度为 120.13% ~ 145.64% ($P<0.05$),而有水分补充的季节性冻融和少水冻融则降低了 $PA_{1.0}$,降低幅度为 16.44% ~ 56.04% ($P<0.05$).

2.1.3 团聚体的破坏率 >0.25 mm 团聚体的破坏率($PAD_{0.25}$)常作为土壤团聚体水稳定性的重要评价指标^[21],而周一杨等^[23]在研究黑土区土壤溅蚀过程中发现 1 mm 粒径是土壤颗粒损耗与富集特征的分界限,为此本文同时采用 $PAD_{0.25}$ 和大于 1 mm 团聚体破坏率($PAD_{1.0}$)分析土壤团聚体的水稳定性及其抵抗击溅侵蚀的能力. 由图 1 可知,冻融可显著降低 $PAD_{0.25}$ ($P<0.05$),并以季节性冻融降低的幅度最大,达 33.45%,可见,季节性冻融可以提高典型黑土区土壤的水稳定性,但仍不如无水无冻融处理的水稳性强. 与 $PAD_{0.25}$ 的变化规律不同,无水冻融和无水无冻融处理的 $PAD_{1.0}$ 有所降低,且差异显著($P<0.05$),表明土壤抵抗击溅侵蚀的能力有所增强;而少水冻融后 $PAD_{1.0}$ 与对照相比却有小幅增加(增加了 2.0%, $P<0.05$),表明土壤抵抗击溅侵蚀的能力减弱;值得注意的是,田间自然季节性冻融后的 $PAD_{1.0}$ 并没有发生变化,表明季节性冻融交替综合作用后土壤抗溅蚀能力既没有增强也没有削弱.

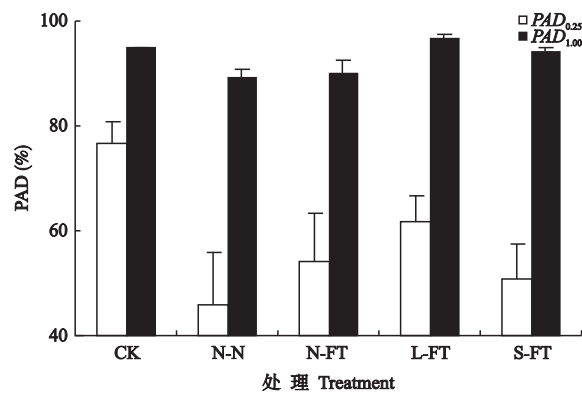


图1 不同处理团聚体破坏率
Fig.1 Percentage of soil aggregate disruption (PAD) under different treatments.

2.2 不同处理土壤团聚体分布与分形特征的差异

平均质量直径是表征土壤团聚体大小的综合指标,能够直观地反映团聚体的平均分布特征.由图2所示,在无水补充的条件下,无论发生冻融与否,干筛团聚体的平均质量直径都较对照有所增加,增加幅度分别为7.98%和29.41%,其中无水冻融达显著水平($P<0.05$);而少水冻融和自然季节性冻融交替后干筛团聚体平均质量直径均表现为显著降低的趋势($P<0.05$),并以少水冻融后相对降低幅度最大,从冻融前的2.38 mm减少到1.61 mm.水稳性团聚体平均质量直径的变化在少水冻融后与对照相比降低了5.56%,其他处理均显著增加,增加幅度为16.67%~44.44% ($P<0.05$),并以无水补充时增加幅度较大,而季节性冻融后的变化幅度相对较小.

团聚体平均质量比表面积是基于土壤界面过程的思想 and 平均直径的方法构建的,能够作为分析和研究土壤团聚体特征的另一有效指标^[24].由图2可知,无水分补充时,干筛团聚体的平均质量比表面积表现出降低趋势,且无水冻融时降低幅度最大,达35.55% ($P<0.05$);而在有水分补充条件下,随着冻融交替的频度和强度的增加,平均质量比表面积逐渐增大,表现出土壤团聚体外界面增加、大团聚体被破坏成小团聚体的趋势,并以季节性冻融时最为明显,与对照相比,其平均质量比表面积提高了20.54%,但差异未达显著水平.不同冻融处理后,水稳性团聚体的平均质量比表面积均显著小于对照,降低幅度为10.88%~20.99% ($P<0.05$),表现出促进水稳性团聚体团聚的作用,但这种促进作用均不如无水无冻融处理明显.

干筛团聚体分形维数更接近于田间土壤的实际情况,主要反映非饱和和特定含水量下土壤的分形特

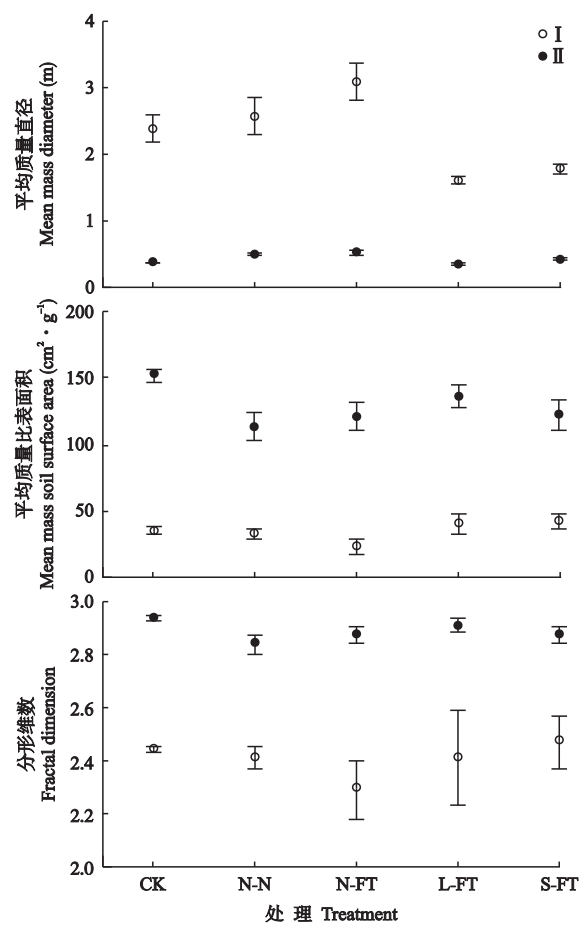


图2 不同处理团聚体平均质量直径、平均质量比表面积和分形维数
Fig.2 Mean mass diameter mean mass, soil surface area and fractal dimension of soil aggregate under different treatments.
I: 干筛 Dry-sieve; II: 湿筛 Wet-sieve.

征,其值越大,说明小粒级干筛团聚体比例越大.水稳性团聚体分形维数主要用来描述与干筛团聚体同等干扰条件下土壤团聚体结构的水稳性^[25].由图2可知,无论是干筛团聚体还是水稳性团聚体,分形维数(D)与平均质量比表面积的变化规律基本一致,即无水分补充的各处理 D 值均有所降低,降低幅度为1.22%~6.14%,促进了干筛团聚体的团聚,其中无水冻融时差异达显著水平($P<0.05$),有水分补充的冻融交替处理 D 值增加了1.22%,加剧了干筛团聚体的分散;而无论有没有水分补充,有没有冻融发生,都将显著促进水稳性团聚体的团聚, D 值降幅为1.02%~3.40% ($P<0.05$).

2.3 不同处理土壤团聚体特征指标的相关性

对土壤团聚体不同特征指标进行相关性分析,结果表明,所分析的5个土壤团聚体特征指标 $PA_{0.25}$ 、 $PA_{1.0}$ 、平均质量直径、平均质量比表面积、 D 之间存在极显著的线性关系($P<0.001$).可见, $PA_{1.0}$

表 2 不同处理土壤团聚体特征指标线性拟合结果
Tab.2 R^2 of linear fitting of soil water-stable aggregate indices under different treatments

	$PA_{0.25}$	$PA_{1.0}$	D_{mm}	SA_{mm}	D
$PA_{0.25}$	1				
$PA_{1.0}$	0.933 **	1			
D_{mm}	0.915 **	0.997 **	1		
SA_{mm}	-0.996 **	-0.960 **	-0.945 **	1	
D	-0.979 **	-0.973 **	-0.960 **	0.990 **	1

* * $P<0.01$.

不仅可以反映土壤抵抗击溅侵蚀的能力,而且能够与 $PA_{0.25}$ 、平均质量直径、平均质量比表面积和 D 一起作为分析、研究典型黑土区土壤团聚体特征的有效指标.

3 结 论

典型黑土区耕地土壤 0 ~ 10 cm 团聚体组成:干筛团聚体以>2 mm 粒级的团聚体为主,而水稳性团聚体则随着粒级的减小,比例逐渐增加;冻融交替频率、程度及水分条件的差异对典型黑土的团聚体组成、分布及分形特征产生不同的影响:无水分补充时,显著增加了>5 mm 干筛团聚体和>0.25 mm 水稳性团聚体的含量;有水分补充时则加剧了团聚体的拆分作用,显著增加了<2 mm 干筛团聚体和 0.25 ~ 1 mm 水稳性团聚体的含量. 平均质量直径、平均质量比表面积和 D 的变化趋势相似,团聚体分布、分形特征明显. 无水分补充时,干筛和水稳性团聚体的平均质量直径与对照相比均有所增加,增加幅度分别为 7.98% ~ 29.41% 和 36.11% ~ 44.44%;有水分补充时则表现为降低趋势. 平均质量比表面积与 D 的变化规律基本一致,干筛团聚体在无水分补充时降低,有水分补充时增加;无论有无水分补充,有无冻融发生,都将促进水稳性团聚体的团聚. 冻融交替能够显著降低 $PAD_{0.25}$,并以季节性冻融降低的幅度最大,达 33.45% ($P<0.05$);同时发现季节冻融后的 $PAD_{1.0}$ 并没有发生变化,而有遮盖处理的少水冻融 $PAD_{1.0}$ 与对照相比有小幅增加($P<0.05$). 可见,在典型黑土区广泛存在的季节性冻融交替现象并没有削弱土壤的抗溅蚀能力,反而还可以提高土壤团聚体的水稳定性. $PA_{0.25}$ 、 $PA_{1.0}$ 、平均质量直径、平均质量比表面积、 D 之间存在极显著的线性关系, $PA_{1.0}$ 不仅可以反映土壤抵抗击溅侵蚀的能力,而且能够与 $PA_{0.25}$ 、平均质量直径、平均质量比表面积和 D 一起作为分析、研究典型黑土区土壤团聚体的有效指标.

参考文献

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

[2] 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)

[3] 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)

[4] Zhang Y-G (张永光), 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)

[5] 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

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

[7] 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

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

[9] Sharma S, Szele Z, Schilling R, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**: 2148-2154

[10] 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

[11] Lehrs GA, Sojka RE, Carter DL, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, **55**: 1401-1406

[12] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to run off and erosion: Validation at

- several levels. *Catena*, 2002, **47**: 133–149
- [13] Shi Y (史 奕), Chen X (陈 欣), Shen S-M (沈善敏). Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(11): 1495–1498 (in Chinese)
- [14] Shi Y (史 奕), Chen X (陈 欣), Shen S-M (沈善敏). Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(11): 1491–1494 (in Chinese)
- [15] Wang L-F (王连峰), Cai Y-J (蔡延江), Xie H-T (解宏图). Relationship 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)
- [16] Gong Z-T (龚子同). Classification System of Chinese Soil: Theories, Methods and Practice. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [17] Liu X-Y (刘孝义). Soil Physics and Research Methods of Soil Improvement. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981 (in Chinese)
- [18] Chen L-X (陈立新). Course of Soil Experimentation and Practices. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2005 (in Chinese)
- [19] Wang T-J (王铁宇), Yan L (颜 丽), Wang J-K (汪景宽), *et al.* Index variations of structure and quality of black soil with a long-term located monitoring. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2004, **12**(4): 138–141 (in Chinese)
- [20] Huang Q-R (黄欠如), Hu F (胡 锋), Yuan Y-H (袁颖红). Effects of long-term fertilization on aggregates characteristic of red paddy soil. *Soils* (土壤), 2007, **39**(4): 608–613 (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 Ecologica Sinica* (土壤学报), 2007, **144**(4): 577–583 (in Chinese)
- [22] Yang P-L (杨培岭), Luo Y-P (罗远培), Shi Y-C (石元春). Fractal features of soils characterized by weight distribution. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1993, **38**(20): 1896–1899 (in Chinese)
- [23] Zhou Y-Y (周一杨), Wang E-H (王恩姮), Chen X-W (陈祥伟). Splash erosion and selective characteristics of aggregate for typical black soil under artificial rainfall condition. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(6): 176–179 (in Chinese)
- [24] Wang E-H (王恩姮), Zhao Y-S (赵雨森), Chen X-W (陈祥伟). Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically. *Acta Ecologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(2): 241–247 (in Chinese)
- [25] Guber AK, Pachepsky YA, Levkovsky EV. Fractal mass-size scaling of wetting soil aggregates. *Ecological Modelling*, 2005, **182**: 317–322

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
