

## 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响\*

王 展<sup>1</sup> 张玉龙<sup>1†</sup> 张 良<sup>2</sup> 党秀丽<sup>1</sup>

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

(2 沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳 110866)

**摘 要** 为了研究冻融作用对土壤微团聚体特征和分形维数的影响, 本试验以东北地区典型土壤-棕壤为研究对象, 通过室内人工控温冻融培养, 测定分析不同含水量条件下, 不同冻融频次处理后土壤水稳性微团聚体组成、平均质量比表面积 (MWSSA)、平均质量直径 (MWD) 和分形维数 ( $D$ ) 等特征指标。结果表明: 供试土壤经冻融循环处理后, 不同粒级微团聚体含量的变化趋势不尽相同, 除 0.005 ~ 0.001 mm 外, 含水量对其他粒级微团聚体含量的影响均达到了显著或极显著影响, 冻融次数对各级微团聚体含量均达到了显著或极显著影响; 土壤平均质量比表面积随着冻融次数和土壤含水量的增加先减小后增加; 土壤平均质量直径随冻融次数的增加先增加后减小, 随土壤含水量的增加先减小后增加; 分形维数随着冻融次数的增加先减小后增加, 随土壤含水量的增加呈波动式变化。冻融处理使土壤微团聚体的稳定性先增强后减弱, 适宜含水量可增加土壤微团聚体的稳定性。

**关键词** 冻融作用; 土壤; 微团聚体; 分形维数**中图分类号** S152.4 **文献标识码** A

土壤微团聚体是有机-无机复合体经过多次聚合而形成, 以不同粒级微团聚体的形式组合在土体内, 可以反映土壤团聚程度和黏粒行为, 其化学结构和组成特点对土壤物理和化学过程有重要的影响<sup>[1-2]</sup>。作为土壤结构的基本单元, 土壤团聚体受到人类活动和自然因素的影响。冻融是中高纬度和高海拔地区一个重要的气候现象, 会对土壤产生不稳定效应, 影响土壤团聚体的结构, 改变土壤团聚体颗粒的组成<sup>[3-4]</sup>。冻融对土壤团聚体的影响, 受土壤起始含水量、土壤压实、冻融次数、冻融速率的影响<sup>[5-7]</sup>。关于冻融对土壤团聚体的影响存在不同的观点, 秦胜金等<sup>[8]</sup>, 王恩姮等<sup>[9-10]</sup>, Lehrsch<sup>[11]</sup>等研究表明冻融促进了团聚体的团聚作用, 增强了团聚体的稳定性。Lehrsch 等<sup>[6]</sup>发现冻融 1 ~ 3 次提高了田间持水量土壤团聚体的稳定性, 到冻融 5 次有所降低。Mostaghimi 等<sup>[12]</sup>、王恒松等<sup>[13]</sup>和 Oztas 等<sup>[7]</sup>认为冻融促进了土壤团聚体的破碎, 降低了团聚体的稳定性。冻融过程对团聚体的物理破坏有累积作用, 且对大团聚体破坏作用更为强烈<sup>[14]</sup>, 目前关于冻融作用对土壤团聚体

的研究多集中在大团聚体上, 而对于微团聚体及其分形维数影响的报道较少。本文以典型冻融地区土壤为研究对象, 分析含水量和冻融次数对各级土壤微团聚体的影响, 探讨冻融过程对土壤结构的影响, 从而为冻融地区土壤质量评价和生态恢复工作提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于沈阳市东郊 (41°82'N, 123°57'E) 的沈阳农业大学试验基地, 前期作物为玉米。沈阳地区属于暖温带半湿润大陆性气候, 年平均气温 7 ~ 8℃, 每年 10 月份开始冻结, 次年 4 月份开始融化, 每年约 6 个月经历冻融循环作用。土壤类型为棕壤, 是在暖温带湿润半湿润大陆季风气候、落叶阔叶林下, 发生较强淋溶作用和黏化作用形成的土壤。土壤剖面通体无石灰反应, 呈酸性。

### 1.2 土壤样品采集

2009 年秋季取样, 取样深度为 0 ~ 20 cm, 样品

\* 国家 973 项目 (No. 2004CB418504) 资助

† 通讯作者, E-mail: ylzsau@163.com

作者简介: 王 展 (1979—), 女, 辽宁大连人, 博士研究生, 讲师, 主要研究领域土壤改良、环境保护。E-mail: zhanwanglv1979@163.com

收稿日期: 2012-03-08; 收到修改稿日期: 2012-08-20

自然风干,去除植物残体、砾石,过 2 mm 筛,备用。同时测定土壤的基本理化性质,容重采用容重环法,机械组成采用吸管法,有机质采用元素分析仪

(Elementar Vario EL III,德国产)测定,pH 用 pH 计测定(水:土质量比=2.5:1),CEC 采用乙酸铵交换法。土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

pH	有机质 Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	阳离子交换量 CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	机械组成 Texture (%)		
				2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
5.70	13.24	1.36	14.10	42.0	28.0	30.0

### 1.3 土壤样品的冻融处理

称取过 2 mm 筛的土样 500 g,置于塑料自封袋内,向塑料袋内加入去离子水使土壤的含水量分别为田间持水量(田间持水量为 28.6%)的 10%、40%、70%、100%、120%,记为 W1 (2.86%)、W2 (11.44%)、W3 (20.02%)、W4 (28.6%)、W5 (34.32%)。充分混匀土水,使土壤含水量均匀。在室温下陈化培养 24 h,然后将不同含水量的土壤放在超低温冰箱内冷冻培养(-30℃)24 h,再放入生化培养箱内融化培养(20℃)24 h,此为一个冻融周期。本试验共设定 5 个冻融次数梯度,分别为 0 次、1 次、3 次、6 次、9 次,记为 F0、F1、F3、F6、F9。试验设计为 2 因素、5 水平,全排列,共 25 个处理,每个处理 3 次重复。

### 1.4 测定项目及计算方法

**1.4.1 微团聚体的测定** 土壤微团聚体的测定采用吸管法,分别测定了 >0.25 mm、0.25~0.05 mm、0.05~0.01 mm、0.01~0.005 mm、0.005~0.001 mm、<0.001 mm 不同粒级的微团聚体含量。在此基础上计算了土壤微团聚体的平均质量比表面积(MWSSA)、平均质量直径(MWD)和分形维数(D)。

**1.4.2 土壤平均质量比表面积的计算** 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<sup>[15]</sup>,能够作为分析和研究土壤团聚体特征的有效指标。按下述公式计算了土壤团聚体平均质量比表面积(MWSSA)。平均质量比表面积  $MWSSA = \sum_{i=1}^n \frac{6w_i}{\rho_i d_i}$ ;其中,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  $\rho_i = \rho_n = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ;  $\bar{d}_i$  为两筛分粒级  $d_i$  和  $d_{i+1}$  的平均值,  $w_i$  为与  $\bar{d}_i$  相对应的筛分粒级的质量百分比。

**1.4.3 平均质量直径的计算** 平均质量直径  $MWD = \sum W_i X_i$ ,  $W_i$  为第  $i$  级团聚体的平均直径,  $X_i$  为第  $i$  级团聚体的质量百分率。

**1.4.4 分形维数的计算** 根据杨培岭等<sup>[16]</sup>的分形维数公式

$$(3-D) \lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max}) = \lg[W(\delta < \bar{d}_i)/W_0]$$

分别以  $\lg[W(\delta < \bar{d}_i)/W_0]$ 、 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  为纵、横坐标,不难看出  $3-D$  是  $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  和  $\lg[W(\delta < \bar{d}_i)/W_0]$  的实验直线的斜率,  $D$  为土壤分形维数。式中以  $\bar{d}_i$  表示两筛分粒级  $d_i$  与  $\bar{d}_{\max}$  间粒径的平均值;  $W(\delta > \bar{d}_i)$  为大于  $\bar{d}_i$  的累积土粒质量;  $W_0$  表示土壤各粒级质量的总和;  $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径。  $D$  即可用回归分析方法得到。

### 1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 和 SPSS 13.0 统计分析软件进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融作用对土壤微团聚体组成的影响

供试棕壤的微团聚体组成中 >0.25 mm 粒径的含量范围 2.61%~4.88%,平均值 3.49%; 0.25~0.05 mm 粒径的含量范围 67.91%~84.57%,平均值 79.57%; 0.05~0.01 mm 粒径的含量范围 4.00%~15.39%,平均值 10.13%; 0.01~0.005 mm 粒径的含量范围 1.19%~4.00%,平均值 2.72%; 0.005~0.001 mm 粒径的含量范围 2.03%~5.765%,平均值 4.00%; <0.001 mm 粒径的含量范围 1.60%~2.86%,平均值 1.90%。供试棕壤微团聚体中各粒级组成绝大部分集中在 0.25~0.05 mm 之间,而最大粒级和较小粒级所占的比例均较少。图 1 为各级微团聚体含量随冻融作用的变化。

>0.25 mm 粒级含量随冻融次数的增加低含水量处理 (W1、W2) 表现为增加趋势, 高含水量处理 (W3、W4、W5) 表现出降低的趋势, 且高含水量处理低于低含水量处理; 0.25 ~ 0.05 mm 粒级含量随冻融次数呈现波动性的变化趋势, 随含水量的增加先减小后增加; 0.05 ~ 0.01 mm 粒级含量随冻融次数的增加表现出降低的趋势, 随含水量的增加先增加后降低; 0.01 ~ 0.005 mm 粒级含量随冻融次数增加的变化

呈现波动性的变化趋势, 随含水量的变化在不同冻融阶段变化趋势不同; 0.005 ~ 0.001 mm 粒级含量随冻融次数增加逐渐降低, 随含水量变化不明显; <0.001 mm 粒级含量随冻融次数先减小后增加, W4 处理高于其他处理。方差分析结果表明, 除 0.005 ~ 0.001 mm, 含水量对其他粒级土粒含量的影响均达到了显著或极显著水平; 冻融次数对各粒径含量影响均达到了显著或极显水平。

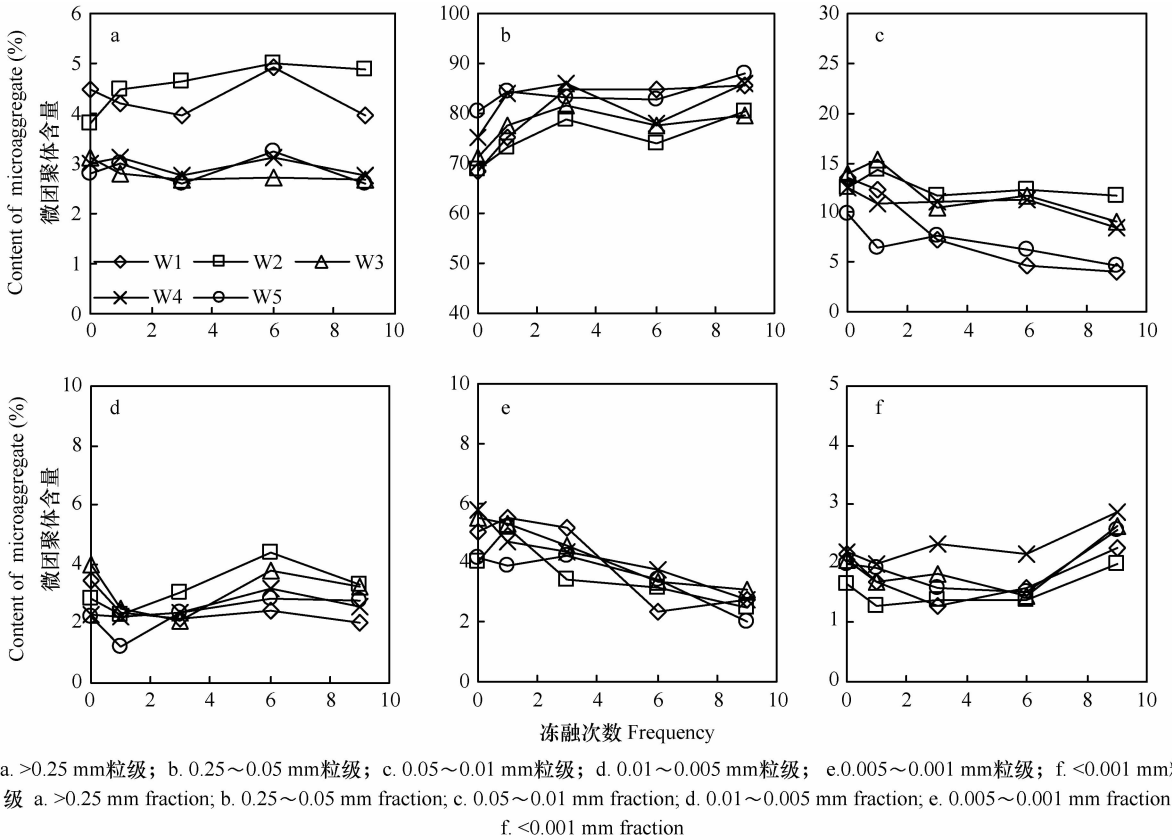


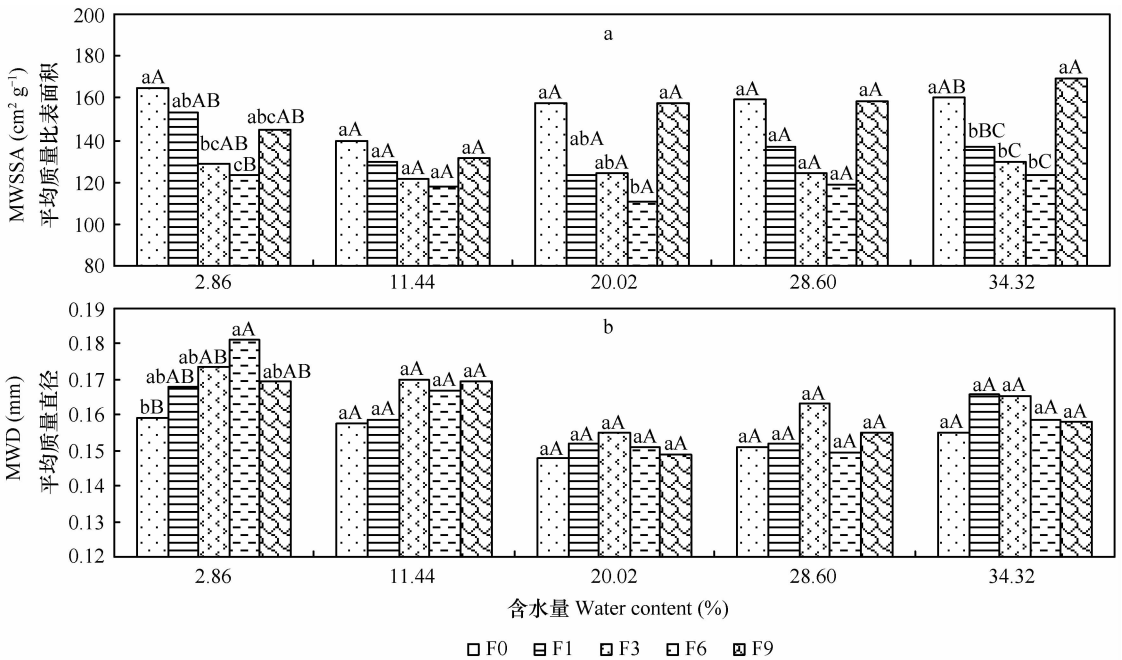
图 1 不同冻融次数和土壤含水量处理下土壤的微团聚体组成  
Fig. 1 Composition of soil microaggregates as affected by frequency of freezing and thawing and soil water content

### 2.2 冻融作用对土壤平均质量比表面积和平均质量直径的影响

从图 2a 中可以看出土壤平均质量比表面积随着冻融次数和土壤含水量的增加先降低后增加。不同土壤含水量处理均表现为在冻融处理 F6 处平均质量比表面积出现最低值。方差分析结果表明土壤含水量为 W1 时 F0、F1 和 F9 显著高于 F6, F0 显著高于 F3 和 F6; 土壤含水量为 W3 时, F0、F1、F3、F9 显著高于 F6; 土壤含水量为 W5 时, F0、F9 处理显著高于 F1、F3、F6; 当含水量为 W2 和 W4 时, 各冻融处理之间土壤微团聚体的平均质量比表面

积差异不显著。

从图 2b 中可以看出土壤微团聚体的平均质量直径随着冻融次数的增加先增加后减小, 而随着含水的增加先减小后增加。不同冻融次数处理之间土壤微团聚体平均质量直径的大小顺序在土壤含水量不同的表现不同。方差分析结果表明, 当土壤含水量为 W1 时, 土壤微团聚体平均质量直径在 F6 时达最大值, F6 显著高于 F0, 其他各处理之间差异不显著。当土壤含水量为 W2、W3、W4、W5 时各冻融次数处理之间差异均不显著。



注：相同含水量下不同小写字母表示不同冻融次数处理之间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ )，不同大写字母表示冻融处理之间差异达极显著水平 ( $p < 0.01$ ) Note: Different capital letters indicate significant difference at 5% level; different small letters indicate significant difference at 1% level in the different freezing-thawing treatments the same in soil water content

图 2 不同冻融次数和土壤含水量处理下土壤平均质量比表面积和平均质量直径

Fig. 2 Soil MWSSA and MWD as affected by freezing-thawing frequency and soil water content

2.3 冻融作用对土壤微团聚体分形维数的影响

图 3a 为土壤颗粒的分形维数  $D$  随冻融次数和土壤含水量的变化。可以看出,分形维数  $D$  随着冻融次数的增加先减小后增加。图 3b 为分形维数随土壤含水量的变化。可以看出,分形维数  $D$  随含水量的增加存在波动式的变化,先降低后增加又降低。说明在一定含水量范围内,土壤存在着对外界影响的缓冲作用。各粒径含量  $X$  与分形维数  $D$  进行相关分析发现,分形维数  $D$  与  $< 0.001$  mm 粒径的颗粒含量极显著正相关,二者的回归方程为:  $D = 14.96X - 34.57$  ( $r = 0.7195, p < 0.01$ );分形维数  $D$  与  $> 0.25$  mm 粒

径的颗粒含量显著负相关,二者的回归方程为:  $D = -12.20X + 33.08$  ( $r = 0.4320, p < 0.05$ )。

3 讨论

冻融次数和土壤含水量对供试土壤各级微团聚体含量的影响均达到显著或极显著水平(除  $0.005 \sim 0.001$  mm)。而 Sigrun 等<sup>[4]</sup>的研究表明含水量对土壤团聚体稳定性的影响不明显,可能是因为试验设计中土壤含水量的水平均较高,其差异性未表现出来。冻融次数和土壤含水量对各级微团聚

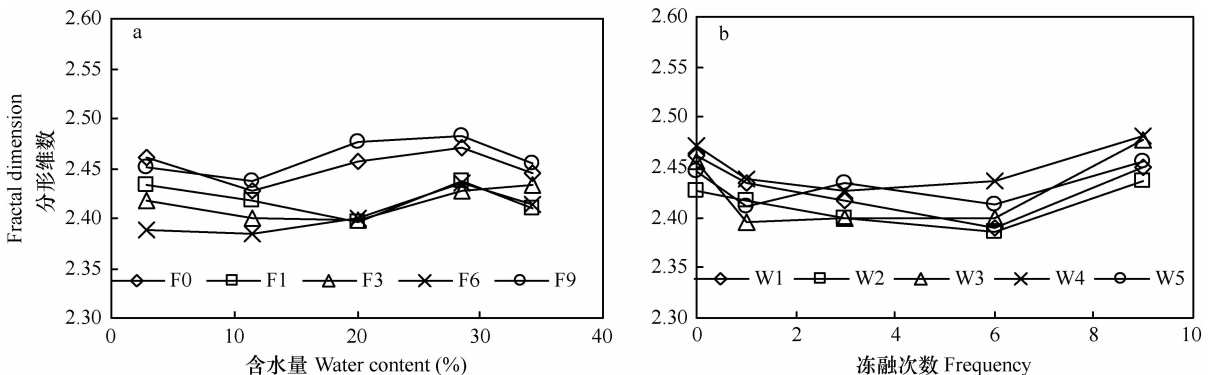


图 3 分形维数  $D$  随冻融次数和土壤含水量的变化

Fig. 3 Fractal dimension as affected by freezing-thawing frequency and soil water content

体含量的影响效果不尽相同。

平均质量比表面积(MWSSA)表现出土壤团聚体外界面的变化趋势,MWSSA 随着冻融次数的增加先减小后增加,说明了土壤经历冻融过程中小团聚体先聚集成大团聚体,之后又分散成小团聚体的过程。平均质量直径随冻融次数的变化趋势与平均质量比表面积的变化趋势相反。这是因为微团聚体的平均质量直径越大,颗粒就越大,而平均质量比表面积就越小。

土壤颗粒分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,在维数上表现出质地越细,小粒级团聚体比例越大,分形维数越高。分形维数可以在一定程度上反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征,并揭示其变化规律性<sup>[17]</sup>,宫阿都等<sup>[18]</sup>研究表明土壤团粒分形维数与其结构及稳定性关系紧密,即团粒结构的分形维数越小,土壤越具有良好的结构与稳定性。本研究发现土壤颗粒的分形维数  $D$  随着冻融次数的增加先降低后增加,少次冻融循环提高了土壤微团聚体的稳定性,冻融次数继续增加则破坏土壤团聚体的稳定性。这与前人的研究结果一致<sup>[6,11]</sup>。分形维数  $D$  随含水量的变化表明,含水量过低(W1)或过高(W5)都会降低土壤的稳定性,而当土壤含水量为田间持水量(W4)或稍低于(W3)和高于田间持水量时(W5),土壤团聚体的稳定性有所增加。这与王风等<sup>[19]</sup>的研究结果相一致。但是也有研究表明,冻融时土壤团聚体稳定性与土壤含水量成反比<sup>[20-21]</sup>。可能与研究方法不同有关。Lehrsch 等<sup>[6]</sup>指出冰冻导致土壤团聚体稳定性的增强或降低,视冻结情况而定。在冰冻土壤样品时,一部分土壤会变得湿润而另外部分变得干燥。在土壤的湿润部分,由于冰晶粒在土壤孔隙中的扩张会减弱土粒间的结合力,此时冰冻会破坏土壤团聚体;而干燥会引起土粒收缩,增加土粒间结合力,这两个截然相反的过程作用于土壤的不同部位时,会分别对土壤团聚体稳定性的减弱或增加产生影响,因此,只有取这两个相反变化的平均值,才能正确判定土壤团聚体稳定性的变化。正是因为如此,才出现以往研究者因团聚体分级标准、冻融温度、冻融次数等研究方法不同而得到不一致甚至是相反的结论。

## 4 结 论

供试棕壤中微团聚体组成主要以 0.25 ~ 0.05 mm 为主,平均含量为 79.57%,最大粒级和较小粒级所占的比例均较小。土壤含水量和冻融次数对土壤

微团聚体各粒级含量的影响均达到了显著或极显著水平(除 0.005 ~ 0.001 mm 粒级),各粒级含量随土壤含水量和冻融次数的变化趋势不同。

土壤平均质量比表面积随着冻融次数和含水量的增加先减小后增加。土壤微团聚体的平均质量直径随着冻融次数的增加先增加后减小,随着含水量的增加先减小后增加。

土壤微团聚体的分形维数  $D$  随冻融次数的增加先减小后增加。说明本试验范围内,随着冻融次数的增加,小粒级微团聚体含量先减小后增加,推断出土壤微团聚体的稳定性先强加后减弱。各粒级含量  $X$  与分形维数  $D$  进行相关分析发现,分形维数  $D$  与 < 0.001 mm 粒径的颗粒含量极显著正相关( $p < 0.01$ );分形维数  $D$  与 > 0.25 mm 粒径的颗粒含量显著负相关( $p < 0.05$ )。

## 参 考 文 献

- [1] 王连峰,蔡延江,解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系. 应用生态学报,2007,18(10):2361—2366. Wang L F, Cai Y J, Xie H T. Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycles (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10):2361—2366
- [2] Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv Soil Sci,1985,1:277—294
- [3] Sahin U, Angin I, Kiziloglu F M. 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] Sigrun H K, Lillian Ø. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway. Catena, 2006, 67:175—182
- [5] Bryan R B. The influence of frost action on soil-aggregate stability. Transactions of the Institute of British Geographers, 1971, 54(12):71—88
- [6] Lehrsch G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. Soil Science Society of America Proceedings, 1991,55:1401—1406
- [7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. Catena, 2003,52:1—8
- [8] 秦胜金,刘景双,丁洪,等. 冻融对沼泽湿地土壤水稳性大团聚体的影响. 水土保持通报,2009,29(6):115—118. Qin S J, Liu J S, Ding H, et al. Effects of freezing-thawing on soil water-stable aggregates in fresh marsh (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(6):115—118
- [9] 王恩姬,赵雨森,陈祥伟. 季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响. 应用生态学报,2010,21(4):889—894. Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effects of seasonal freeze-thaw cycle on soil aggregate characters in typical phaeozem region of

- Northeast China ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4):889—894
- [10] 王恩焄,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):1 744—1 750. Wang E H,Zhao Y S. Chen X W. Responses of soil structure to seasonal freezing-thawing in a typical black soil cultivated region ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7):1 744—1 750
- [11] Lehrs G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability. Soil Science, 1998, 163:63—70
- [12] Mostaghimi S, Young R A, Wilts A R, et al. Effects of frost action on soil aggregate stability. Trans ASAE, 1988, 31(2):435—439
- [13] 王恒松,熊康宁,刘云.喀斯特地区冻融作用对土壤物理特性的影响.水土保持研究,2009,16(2):101—106. Wang H S, Xiong K N, Liu Y. Freezing and thawing action on soil physical characters in Karst areas-with a special reference to Wangjiazhai and Yangchangdong catchments of Qingzhen, Guizhou ( In Chinese ). Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2):101—106
- [14] Six J, Bossuyt H, Degryse S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil & Tillage Research, 2004, 79:7—31
- [15] 秦耀东.土壤物理学.北京:高等教育出版社,2003. Qin Y D. Soil physics ( In Chinese ). Beijing: Higher Education Press, 2003
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征.科学通报,1993,38(20):1 896—1 899. Yang PL, Lou Y P, Shi Y C. Fractal features of soils characterized by weight distribution ( In Chinese ). Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20):1 896—1 899
- [17] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体结构分形特征.中国水土保持科学,2008,6(2):75—82. Zhou P, Liu G B, Hou X L. Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the hilly-gully region of Loess Plateau ( In Chinese ). Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2):75—82
- [18] 宫阿都,何毓蓉.金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究.水土保持学报,2001,15(3):112—115. Gong A D, He Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River ( In Chinese ). Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3):112—115
- [19] 王风,韩晓增,李良皓,等.冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响.冰川冻土,2009,31(5):915—919. Wang F, Han X Z, Li L H, et al. The Effect of freezing and thawing processes on black soil aggregate stability ( In Chinese ). Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5):915—919
- [20] Perfect E, van Loon W K P, Kay B D, et al. Influence of ice segregation and solutes on soil structural stability. Canadian Journal of Soil Science, 1990,70:571—581
- [21] Staricka J A, Benoit G R. Freeze-drying effects on wet and dry soil aggregate stability. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59:218—223

## EFFECTS OF FREEZING-THAWING ON CHARACTERISTICS AND FRACTAL DIMENSION OF SOIL MICROAGGREGATES

WangZhan<sup>1</sup> Zhang Yulong<sup>1†</sup> Zhang Liang<sup>2</sup> Dang Xiuli<sup>1</sup>

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

(2 College of Biological Science and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract** In order to study effects of freezing-thawing on characteristics and fractal dimensions of soil microaggregates, samples of brown soil, typical of Northeast China, were collected and subjected to an indoor artificial freezing and thawing test for analysis and determination of composition, mean weight soil surface area (MWSSA), mean weight diameter (MWD) and fractal dimension ( $D$ ) of soil microaggregates as affected by frequency of freezing and thawing and water content. Results show that changes in these characteristics of soil microaggregates after the treatment varied from fraction to fraction of particle-size. The effect of water content on content of soil microaggregates was significant or extremely significant in all fractions, except the fraction of 0.005 ~ 0.001 mm, and so was the effect of the frequency of freezing and thawing. WMSSA first decreased and then increased with increasing freezing-thawing frequency and soil water content. WMD first increased and then decreased with increasing freezing-thawing frequency, but went the other way round with increasing soil water content. And  $D$  first decreased and then increased with increasing freezing-thawing frequency, and fluctuated with increasing soil water content. It was found that the treatment first enhanced and then undermined the stability of soil microaggregates and a proper soil water content could improve the stability.

**Key words** Freeze-thawing; Soil; Microaggregate; Fractal dimension