# 冻融循环对五台山典型植被土壤微团聚体的影响

李杨波[1]，刘 楠[1]，韩进斌[2]，郭勇强[2]，李变华[2]，申彦科[3]

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院，山西 太原 030024；2. 山西省林业厅，山西省五台山树木园，山西 忻州 035500；3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300220)

**摘 要**：[目的] 研究气候变化背景下季节性冻融对土壤微团聚体的作用，为影响林线附近土壤地球生物化学过程的相关研究提供参考。[方法] 选择五台山林线附近 3 种典型植被：草甸、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和云杉(*Picea meyeri*)覆盖下的土壤，通过土柱野外原位培养，测定不同时期土壤各粒径微团聚体含量以及土壤分形维数($D$)。[结果] 在培养期内，3 个样地的 2～0.25 mm 和0.25～0.05 mm 团聚体含量变化趋势各不相同；0.05～0.02 mm(先降后增再降)，0.02～0.002 mm(先降后增，华北落叶松样地除外)，<0.002 mm(先增后降)团聚体含量变化趋势基本一致。在初冻期和融化期，季节性冻融导致 3 个样地土壤微团聚体含量发生显著变化($p<0.05$)，深冻期无显著变化($p>0.05$)。生长季同样发生了土壤微团聚体含量的显著变化($p<0.05$)。不同样地植被组成的差别造成了土壤微团聚体含量差异显著($p<0.05$)，体现在初冻期和融化期。季节性冻融期间，土壤微团聚体分形维数逐渐增加，而此时云杉样地土壤微团聚体分形维数最低；生长季期间，微团聚体分形维数逐渐降低，草甸样地土壤微团聚体分形维数最低，但在生长季末期，则是华北落叶松样地最低；但 3 个样地土壤微团聚体分形维数仅在生长季末期存在显著差异($p<0.05$)，且培养期结束时的土壤分形维数与开始时无显著差异($p>0.05$)。[结论] 季节性冻融对 3 个样地土壤微团聚体含量都具有显著影响，且 3 种植被下土壤结构对季节性冻融的响应也明显不同，主要发生在初冻期和融化期；在培养期内，虽在冻融作用下土壤微团聚体分形维数增加，但进入生长季后都逐渐减少至培养前水平，3 个样地土壤结构性和团聚能力均呈周期性变化，具有一定的自我恢复能力。

**关键词**：冻融循环；林线；土壤微团聚体；分形；五台山

**文献标识码**：A **文章编号**：1000-288X(2018)05-0021-07 **中图分类号**：S714，S718.5

**文献参数**：李杨波，刘楠，韩进斌，等.冻融循环对五台山典型植被土壤微团聚体的影响[J].水土保持通报，2018，38(5)：21-27. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.004. Li Yangbo，Liu Nan，Han Jinbin，et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil micro-aggregates in typical vegetations of Wutai mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(5)：21-27.

# Effects of Freeze-thaw Cycles on Soil Micro-aggregates in Typical Vegetations of Wutai Mountain

LI Yangbo[1]，LIU Nan[1]，HAN Jinbin[2]，GUO Yongqiang[2]，LI Bianhua[2]，SHEN Yanke[3]

(1. *College of Water Resources Science and Engineering，Taiyuan University of Technology，Taiyuan，Shanxi* 030024，*China*；2. *Shanxi Provincial Department of Forestry，Shanxi Wutai Mountain Arboretum，Xinzhou，Shanxi* 035500，*China*；3. *Beifang Investigation，Design & Research Co. Ltd，Tianjin*，300222，*China*)

**Abstract**：[Objective] The effect of seasonal freeze-thaw on soil micro-aggregates in the context of climate change was studied in order to provide references for the reserch of soil biochemical processes near the timberline. [Methods] Soil samples from three typical vegetation types (meadow，*Larix principis-rupprechtii* and *Picea meyeri*) near the timberline of Wutai Mountain were collected for soil column in situ experiment. Soil micro-aggregates contents and fractal dimensions ($D$) were measured. [Results] The variations of 2～0.25

**收稿日期**：2018-03-12 **修回日期**：2018-04-13

**资助项目**：国家自然科学基金项目“基于水文过程和冻融循环的高山植被土壤氮动态研究”(31400618)；国家留学基金管理委员会资助(201708140203，留金法[2017]5087 号)；国家自然科学基金项目(41572239，41502243)

**第一作者**：李杨波(1989—)，男(汉族)，河北省邯郸市人，硕士研究生，研究方向为水土保持。E-mail：liyangbo0298@link.tyut.edu.cn。

**通讯作者**：刘楠(1983—)，男(汉族)，河北省石家庄市人，讲师，博士，主要从事水土保持及生态水文工作。E-mail：lntx617129@126.com。

mm and 0.25～0.05 mm aggregate contents were different among the three plots. The content of 0.05～0.02 mm aggregate reduced initially, then increased and finally reduced. The content of 0.02～0.002 mm aggregate reduced initially and then increased (except in *Larix principis-rupprechtii* plot), and the content of <0.002 mm micro-aggregates increased firstly and then reduced. The content of micro-aggregates changed significantly ($p<0.05$) due to seasonal freeze-thaw events in initial freezing and thawing periods, while there was no significant change in deep freezing period ($p>0.05$). Soil micro-aggregate contents also changed significantly ($p<0.05$) in the growing season. Different vegetation compositions caused significant differences ($p<0.05$) among micro-aggregate contents in three plots, especially, in initial freezing and thawing periods. During the freezing-thawing period, $D$ values were increased, and that of *Picea meyeri* plots was the lowest. In growing season, $D$ values were decreased, and that of meadou plots was the lowest. Significant differences ($p<0.05$) of $D$ values among three researched plots were only observed in the late growing season, and the least $D$ value is obtained in *H. principis-rupprechtii*. [Conclusion] Freeze-thaw cycles have great impacts on soil micro-aggregate contents. The responses of soil structures to seasonal freeze-thaw events are significantly different, and mainly occur in initial freezing period and thawing period. The $D$ values of all plots are increased by freeze-thaw cycles. Although the $D$ value of soil microaggregates increased during the incubation period, it gradually decreased to the pre-incubation level after entering the growing season. Soil aggregations and structures of all three plots vary periodically and have certain self-recovery capabilities.

**Keywords: freeze-thaw cycles; timberline; soil micro-aggregates; fractal; Wutai Mountain**

中高纬度和高海拔地区随着温度的改变,晚秋到早春会出现土壤冻融现象,使其土壤团聚体组成改变[1-3]。高山林线附近区域是全球变暖的敏感指示体,又是生态交错带,在气候变化背景下,该区气候、植被覆盖情况、覆雪深度等都可能发生变化,进而影响该区土壤冻融循环频率和强度,导致土壤团聚体组成及分形维数等土壤结构指标改变[4-7],最终可能影响与之相关的生物地球化学过程及坡面稳定,特别是在秋冬、冬春两个季节交替时期。然而,季节性冻融对高山林线附近土壤结构的影响仍有待进一步研究。因此,本研究拟选择山西五台山林线附近典型植被草甸(CD)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*, HL)和云杉(*Picea meyeri*, YS),采用土柱野外原位培养法,探索冻融作用对其土壤的影响,以期为该区气候变化背景下的土壤生态研究提供基础数据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

五台山位于山西省东北部(38°27′—39°15′N, 112°48′—113°55′E),山体横跨五台县、代县和繁峙县,属太行山系的北段,是太行山系支脉,位于黄土高原东部的森林草原交错地带,海河流域上游。其主峰北台(叶斗峰)海拔3 061.1 m,是华北最高峰。

五台山位于暖温带湿润半湿润气候区,山顶属于高寒气候。根据多年观测数据,中台气象站(海拔高度2 895.8 m)年均气温为-4.2 ℃,极端最低气温为-44.8 ℃,年均降雨量880.6 mm,是太行山气温最低、降水量最高,湿度和风力最大的地区[8-10]。五台山具有较完整的植被垂直带谱,植被带从山麓至山顶依次为:灌草丛及农田带—山地灌丛带—针、阔叶混交林带—针叶林带—亚高山灌丛带—亚高山、高山草甸带[11]。五台山植被对调节区域气候、涵养水源、水土保持、保持生物多样性等方面有着举足轻重的作用。

## 1.2 试验方案

(1) 样地选择。样地分草甸(CD)、华北落叶松(HL)和云杉(YS)3个典型植被样地,样地具体信息见表1。

**表1 样地基本信息**

| 样地名称 | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 土壤容重/(g·cm$^{-3}$) | 郁闭度/% | 草本盖度/% | 枯落物厚度/cm | 季节性冻融期平均积雪厚度/cm | 土壤类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CD | 2 500 | 北 | 19.6 | 0.90 | — | 100 | 无明显积累 | 14.5 | 亚高山草甸土 |
| HL | 2 440 | 北 | 21.5 | 0.95 | 81.93 | 92 | 1.06 | 51.9 | 棕 壤 |
| YS | 2 400 | 北 | 27.5 | 0.90 | 75.04 | 90 | 2.81 | 65.6 | 棕 壤 |

注:CD为草甸样地;HL为华北落叶松样地;YS为云杉样地。下同。

(2) 采样点的布置。土柱:在每个群落内,分别在坡上、坡中、坡下设置一个 20 m×20 m 的固定样地,每个样地设置 2 个原位观测点,每个点设置 7 根土柱(PVC 管,内径 10 cm,长 20 cm)。土柱垂直打入土壤中,尽量不破坏土壤的原状结构。

纽扣式温度记录仪(iButton DS1 992 L):在每个群落布置 2 个温度记录仪(埋在土壤 10 cm 深处),每小时自动监测土壤温度。根据温度记录仪记录的温度,得出图 1。

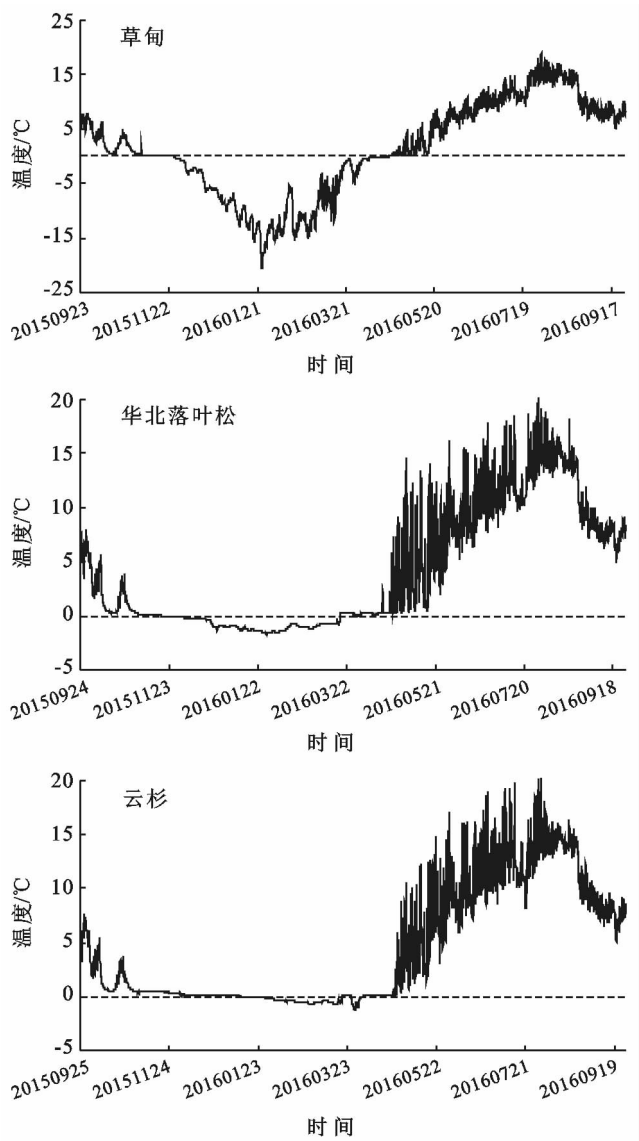



**图 1　样地土壤温度记录**

取样时间涵盖了整个变化周期,包括初冻期、深冻期、融化期,以及生长季。土柱 7 个采集时间点为:2015 年 9 月 26 日,2015 年 10 月 30 日,2015 年 12 月 20 日,2016 年 3 月 15 日,2016 年 5 月 20 日,2016 年 7 月 26 日,2016 年 9 月 26 日。取样时间点表示一个时段的起始和结束,该时间点对应的微团聚体含量代表微团聚体含量经过一个时间段后的含量,如(20151030)表示生长季末期结束和初冻期起始,该时间点对应的微团聚体含量为经过生长季末期后最终含量。7 个时间采集点将培养期分成 6 个时间段。详细情况见表 2。

**表 2　研究取样时间每段时期的分类**

| 取样时间 | 取样时段 | |
|---|---|---|
| 20160520—20160726 | 生长季前期 | 生长季 |
| 20160726—20160926 | 生长季中期 | |
| 20150926—20151030 | 生长季末期 | |
| 20151030—20151220 | 初冻期 | 季节性冻融期(非生长季) |
| 20151220—20160315 | 深冻期 | |
| 20160315—20160520 | 融化期 | |

### 1.3　样品检测

使用烘干法检测土壤含水量,用密度计法进行土壤微团聚体的测量。

### 1.4　分形维数的计算

根据杨培岭等[12]的分形维数公式:

$$D=3-\lg(w_i/w_0)\lg(d_i/d_{max})$$

式中:$D$——土壤粒径结构分形维数;$d_i$——第 $i$ 级粒径和第 $i+1$ 粒径平均值(mm);$d_{max}$——最大粒级土粒平均直径(mm);$w_i$——直径小于 $d_i$ 的累积质量(g);$w_0$——土壤样品总质量(g)。土壤样品分形维数计算方法为:首先求出土壤样品不同粒径($d_i$)的 1 g($d_i/d_{max}$)和 1 g($w_i/w_o$)值,然后以前者为横坐标,后者为纵坐标做散点图,直线回归后求得斜率($K$)最终用公式 $D=3-K$ 求出土壤质量分形维数。

### 1.5　数据处理

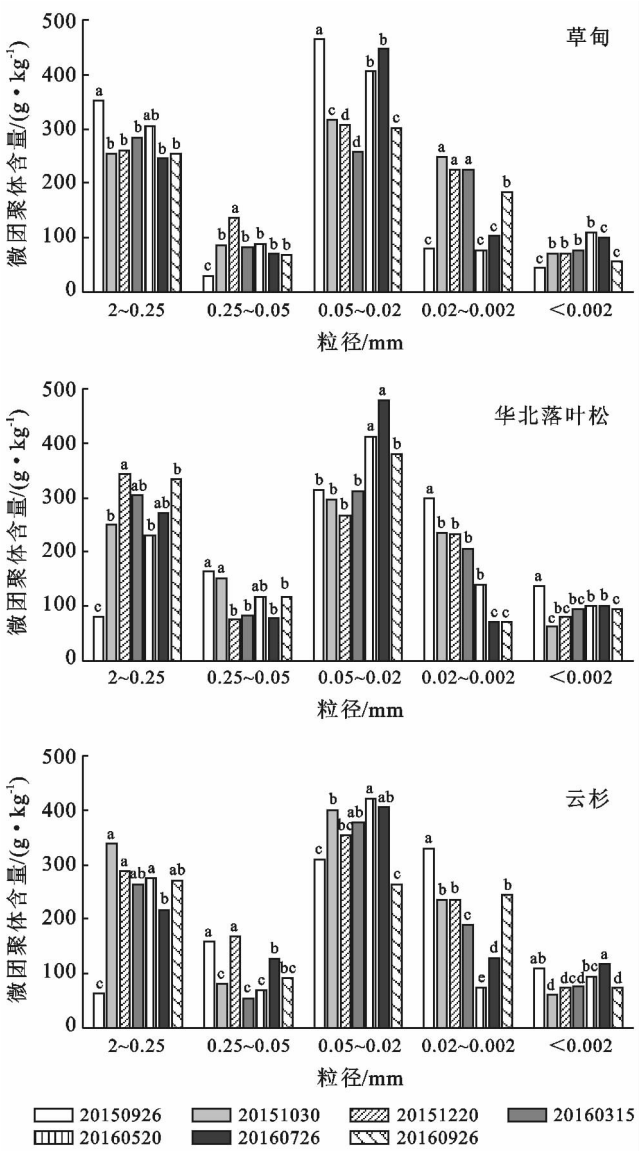
采用 Microsoft Office Excel 2013 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据分析处理。

## 2　结果与分析

### 2.1　季节性冻融对土壤微团聚体的影响

2.1.1　不同样地土壤微团聚体随时间变化特征　图 2 表明培养期内不同样地各粒径微团聚体含量变化。由图 2 得,在土壤温度变化剧烈的生长季末期、初冻期和融化期 3 个时期内,微团聚体含量发生显著变化,且不同样地微团聚体含量变化也不同。生长季末期,草甸样地 0.25～0.05 mm,0.02～0.002,<0.002 mm 微团聚体含量显著增加($p<0.05$),2～0.25 mm,0.05～0.02 mm 颗粒含量显著降低($p<0.05$);华北落叶松样地 2～0.25 mm 颗粒含量显著增加($p<0.05$),0.02～0.002 mm,<0.002 mm 微团聚体含量显著降低($p<0.05$);云杉样地 2～0.25 mm,0.05～0.02 mm,<0.002 mm 颗粒含量显著增加($p<0.05$),0.25～0.05 mm,0.02～0.002 mm 微

团聚体含量显著降低($p<0.05$)。可见在生长季末期,草甸样地较大粒径土壤颗粒有向更小粒径微团聚体转化的趋势,而华北落叶松和云杉样地正相反,虽然云杉样地0.05～0.02 mm,<0.002 mm微团聚体含量也显著增加,但其增长的绝对数量,远低于2～0.25 mm团聚体(图2)。




注:不同小写字母表示微团聚体含量在不同时段内差异性显著($p<0.05$)。

**图2 样地微团聚体含量随时间变化**

这与娄鑫等[13]的研究结果相似,温度变化剧烈,粒径较大的团聚体含量上升。但也有研究表明[14]土壤温度越稳定,越有利于土壤团聚体之间聚合,这可能是在其研究中,土壤温度(20 ℃左右)远高于冻融期,以及土壤含水量、有机碳等差异性所导致。而草甸样地微团聚体的变化,可能是由于在生长季末期植物出现凋零,其根系活性也随之下降,根对土壤颗粒的缠绕,特别是细根对土壤颗粒的缠绕减弱,致使较大粒径团聚体分散,土壤中粒径更小的微团聚体含量显著增加。随着土壤温度的下降,土壤动物、微生物活性的改变,也可能会造成草甸样地团聚体发生这种变化。对于云杉和华北落叶松样地,可能由于海拔低、枯落物较厚,再加上林木具有一定的郁闭度(表1),土壤外部环境可能较草甸样地稳定,所以这两个样地植物根系、土壤动物及土壤微生物的活性得以保持,且可能高于草甸样地,土壤颗粒间胶结物质,如生物分泌物等无明显减少,土壤颗粒间的作用力没有明显减弱,因此,华北落叶松和云杉两个样地土壤微团聚体可能会持续凝结,导致较大粒径团聚体含量增加(图2)。特别是对于海拔最低、枯落物层最厚的云杉样地(表1),其2～0.25 mm团聚体增加量明显高于华北落叶松样地(图2)。此外,土壤有机质含量及其随时间变化的差异性,也会造成研究区不同样地团聚体变化分异,彭新华等[15]和李鉴霖[16]认为土壤中有机质含量下降会使更小颗粒重新凝结,增大微团聚体粒径,但对于本研究区仍待进一步研究。

初冻期,草甸样地0.05～0.02 mm和华北落叶松样地0.25～0.05 mm微团聚体含量显著降低($p<0.05$);草甸样地和云杉样地0.25～0.05 mm微团聚体含量均显著增加($p<0.05$)。融化期,草甸样地和云杉样地0.02～0.002 mm微团聚体含量显著下降($p<0.05$),草甸样地和华北落叶松样地0.05～0.02 mm微团聚体含量显著增加($p<0.05$)。初冻期和融化期,季节性冻融对草甸样地土壤微团聚体的影响大于其余2个样地。可能是因为,草甸样地没有林木覆盖,且积雪较其余样地浅,基本没有枯落物覆盖,温度变幅较其余2个样地更剧烈,土壤水发生频繁相变,致使土壤微生物活性受到影响而降低。而对于华北落叶松和云杉样地,土壤表面枯落物和积雪作为保温层,使其土壤与外界环境隔绝,减少土壤温度变幅。同时,乔木层也作为保温层,一定程度上减少了下垫面热量向大气传输,致使这两个样地土壤生物所在环境也较为稳定,活性也相对较高。草甸样地土壤含水量与2～0.25 mm,0.05～0.02 mm和<0.002 mm微团聚体含量呈显著负相关关系($p<0.05$),与0.25～0.05 mm微团聚含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。而对于华北落叶松和云杉样地,其土壤微团聚体含量与土壤含水量之间无显著相关性,这可能是因为其土壤温度较草甸样地稳定,另一方面华北落叶松和云杉样地的样地条件(表1),使得积雪之下一些苔藓和地衣等在寒冷时期能够继续存活,土壤中的生物活性可能高于草甸样地,最终也许是因为这些原因的干扰,导致这2个样地土壤含水量与其土壤微团聚

体含量无显著相关。所以,在初冻期和融化期,草甸样地更多粒径团聚体含量变化显著。

深冻期样地土壤微团聚含量变化也相对稳定,只有草甸和云杉样地 0.25～0.05 mm,云杉样地 0.02～0.002 mm 微团聚体含量显著下降($p<0.05$)。深冻期初始阶段,云杉样地土壤温度在 0 ℃上下波动,而在深冻期内草甸样地土壤温度虽然始终处于 0 ℃以下,但也存在一定程度的波动(图 1),一方面土壤中未冻水和冰晶可能因此出现相变,特别是云杉样地,其土壤温度波动阶段,可能使得一部分积雪融化进入土壤表层,增加了其土壤含水量,接下来土壤温度又进入0 ℃以下,这部分水的相变将会引起土壤颗粒的变化;另一方面土壤中的生物活性可能因温度变化而改变,因为在深冻期这个全年温度最低、环境最严酷的时期,土壤生物活性对温度变化的敏感性可能增强。因此,导致这两个样地土壤微团聚体含量显著变化($p<0.05$,图 2)。

生长季前期,草甸样地<0.002 mm 微团聚体含量显著上升($p<0.05$);华北落叶松样地 0.02～0.002 mm 微团聚体含量显著下降($p<0.05$);云杉样地 2～0.25 mm 显著下降,0.25～0.05 mm,0.02～0.002 mm 和<0.002 mm 微团聚体含量显著上升($p<0.05$)。生长季中期,草甸样地 0.05～0.02 mm 微团聚体含量显著下降($p<0.05$),0.02～0.002 mm 微团聚体含量显著上升($p<0.05$);华北落叶松样地 0.05～0.02 mm 和<0.002 mm 微团聚体含量显著下降($p<0.05$);云杉样地 0.05～0.02 和<0.002 mm 微团聚体含量显著下降($p<0.05$),0.02～0.002 mm 微团聚体含量显著上升($p<0.05$)。生长季前、中期,土壤温度回升,土壤生物活性恢复。植物根系在土壤中穿插、网罗、固结、缠绕及其分泌物的胶黏作用,土壤动物和微生物的活动,使得土壤颗粒发生重新排列、组合[17-19]。同时,土壤有机质含量也随土壤生物活性变化而变化。这些都显著改变了各样地土壤微团聚体组成,也使该时期土壤微团聚体相比季节性冻融期间,出现了更加频繁而显著的变化。

2.1.2　*不同样地微团聚体含量的差异性*　各样地土壤微团聚体含量在培养期间差异性见表 3。

**表 3　研究区不同样地微团聚体含量比较**

| 粒径/mm | 样地 | 20150926 | 20151030 | 20151220 | 20160315 | 20160520 | 20160726 | 20160926 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2～0.25 | CD | 352.033±41.001$^{B}$ | 255.648±32.487$^{A}$ | 259.624±49.281$^{A}$ | 285.219±21.137$^{A}$ | 303.667±43.707$^{A}$ | 246.981±29.980$^{A}$ | 253.930±30.455$^{A}$ |
| | HL | 342.500±84.940$^{B}$ | 297.104±7.353$^{A}$ | 279.169±40.511$^{A}$ | 262.056±36.586$^{A}$ | 261.909±51.204$^{A}$ | 251.761±29.170$^{A}$ | 81.081±13.215$^{B}$ |
| | YS | 64.158±17.276$^{A}$ | 338.908±47.276$^{A}$ | 287.403±15.147$^{A}$ | 264.231±63.424$^{A}$ | 275.405±40.164$^{A}$ | 215.197±17.054$^{A}$ | 270.006±74.811$^{A}$ |
| 0.25～0.05 | CD | 28.627±2.821$^{A}$ | 85.138±0.557$^{A}$ | 136.634±35.298$^{A}$ | 82.862±7.140$^{A}$ | 87.346±1.309$^{A}$ | 70.961±12.805$^{A}$ | 66.975±19.073$^{A}$ |
| | HL | 163.412±33.740$^{B}$ | 159.335±108.22$^{B}$ | 76.970±5.224$^{B}$ | 80.159±18.056$^{A}$ | 129.496±11.878$^{B}$ | 80.105±9.590$^{A}$ | 93.376±23.726$^{B}$ |
| | YS | 159.932±37.597$^{B}$ | 79.887±8.668$^{A}$ | 167.740±15.904$^{A}$ | 55.285±19.683$^{A}$ | 68.942±21.980$^{A}$ | 126.014±19.996$^{B}$ | 90.987±21.040$^{B}$ |
| 0.05～0.02 | CD | 465.128±56.95$^{A}$ | 315.226±4.204$^{A}$ | 306.63±8.179$^{A}$ | 257.794±30.110$^{A}$ | 404.744±26.000$^{B}$ | 447.159±1.157$^{A}$ | 302.957±19.826$^{A}$ |
| | HL | 489.750±42.356$^{A}$ | 448.306±23.943$^{B}$ | 313.025±68.010$^{A}$ | 309.911±6.133$^{A}$ | 302.523±49.070$^{A}$ | 299.802±44.059$^{B}$ | 266.671±6.740$^{A}$ |
| | YS | 311.105±35.705$^{A}$ | 398.846±0.302$^{B}$ | 352.851±36.645$^{A}$ | 378.315±11.683$^{A}$ | 421.543±31.333$^{B}$ | 405.409±74.352$^{A}$ | 264.319±48.796$^{A}$ |
| 0.02～0.002 | CD | 79.786±6.599$^{A}$ | 249.198±0.242$^{A}$ | 224.873±12.236$^{A}$ | 225.574±27.655$^{A}$ | 75.797±13.652$^{B}$ | 103.897±27.366$^{A}$ | 184.096±23.596$^{A}$ |
| | HL | 300.102±18.428$^{B}$ | 245.313±14.179$^{A}$ | 232.277±89.310$^{A}$ | 201.089±47.447$^{A}$ | 151.842±40.955$^{A}$ | 73.994±26.241$^{B}$ | 55.501±21.741$^{B}$ |
| | YS | 328.668±16.265$^{B}$ | 235.446±51.681$^{A}$ | 235.667±39.774$^{A}$ | 190.812±14.829$^{A}$ | 73.688±14.130$^{AB}$ | 129.300±12.617$^{A}$ | 243.700±35.737$^{A}$ |
| <0.002 | CD | 45.564±2.992$^{A}$ | 71.736±5.778$^{A}$ | 72.102±9.333$^{A}$ | 76.339±10.114$^{A}$ | 108.260±15.257$^{A}$ | 101.943±8.589$^{B}$ | 56.312±5.184$^{A}$ |
| | HL | 136.601±20.451$^{B}$ | 67.755±3.431$^{A}$ | 81.581±7.595$^{A}$ | 94.371±19.948$^{A}$ | 108.738±7.462$^{A}$ | 103.446±21.516$^{B}$ | 74.576±14.760$^{B}$ |
| | YS | 109.536±15.550$^{B}$ | 61.632±6.084$^{A}$ | 73.473±16.078$^{A}$ | 76.706±15.435$^{A}$ | 93.183±18.330$^{A}$ | 117.286±9.180$^{A}$ | 74.342±16.500$^{B}$ |

注:不同大写字母表示在同一时间点不同样地之间微团聚体含量差异显著($p<0.05$)。

生长季,各级微团聚体含量在样地之间都有显著差异($p<0.05$);初冻期和深冻期,除 0.25～0.05 mm 和 0.05～0.02 mm 微团聚体外($p<0.05$),样地间土壤微团聚体含量无显著差异;融化期,仅有华北落叶松样地0.25～0.05 mm,0.05～0.02 mm 和 0.02～0.002 mm 微团聚体含量与其余样地之间有显著差异($p<0.05$)。可见,3 个样地在生长季土壤微团聚体含量的差异明显多于季节性冻融期间,这可能是植被组成的不同,以及由此引起的土壤生物活性与有机质含量的差异,最终导致不同样地间土壤微团聚体含量和组成的显著差异。

## 2.2　冻融循环对土壤微团聚体分形维数的影响

由图 3 可知,在生长季末期,各样地土壤微团聚体质量分形维数减小,表明此时土壤的孔隙度增加,结构性变好,但是在初冻期、深冻期和融化期,土壤温度在 0 ℃上下变化以及降低至 0 ℃以下,土壤分形维数逐渐增加,表明在整个冻融期内样地土壤结性逐渐减弱。这与王恩姮等[20-21]的研究结果相似,然而,Lehrsch等[22-23]、王展等[24]却得出相反结果,土壤经历一次冻融循环后,土壤微团聚体分形维数降低,微团聚体稳定性和结构性变好。原因可能是本研究与王恩姮同样采用野外原位培养法,且试验样地植被相似;而

Lehrsch、王展则采用室内冻融循环试验，样地为农田。再者本试验样地土壤含水量远高于王展试验样地土壤含水量，也可能是造成结果不一致的原因。

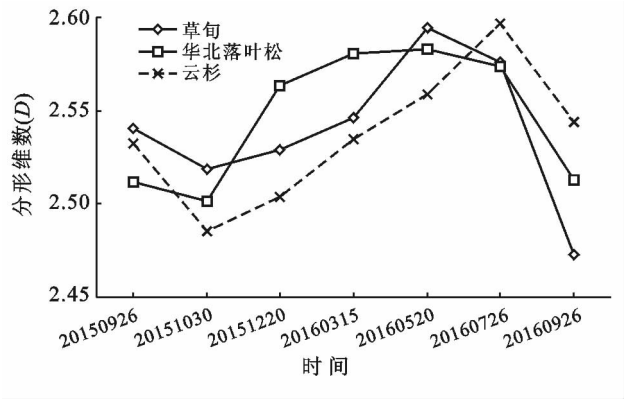



**图 3 研究区样地土壤分形维数变化趋势**

生长季，植物根系的活性逐渐恢复，对土壤结构改善具有促进作用。而且土壤动物和微生物活性也得以恢复。首先，土壤动物活动频繁，土壤受到扰动发生破碎和移动[20]；动物排泄物会增加，土壤有机物含量升高，从而使得土壤微团聚体稳定性增强，土壤结构性增强[25-26]。其次，微生物如细菌、真菌等自身的菌丝缠绕和它们自身释放的化学物质与土壤颗粒相结合[27]，从而使得草甸和华北落叶松样地土壤微团聚体分形维数降低，土壤的结构性增强，然而在生长季初期，云杉样地却出现土壤微团聚体分形维数增加的趋势，祝忆伟等[28]也得出了相似的结论，其研究表明，样地土壤＜0.002 mm 和 0.02～0.002 mm 微团聚体含量与土壤分形维数呈正相关关系，而本研究云杉样地土壤分形维数同 0.02～0.002 mm 微团聚体也呈极显著正相关关系($p<0.01$)。此外，由图 2 可知，生长季初期，云杉样地 0.02～0.002 mm 微团聚体含量显著增加($p<0.05$)，致使其土壤分形维数逐渐增加，也表明在此阶段，云杉样地土壤分形维数主要受 0.02～0.002 mm 微团聚体含量控制，与其余径级微团聚体含量无关。

总之，3 个样地土壤微团聚体分形维数均具有周期性变化特征，即在经历了季节性冻融期的逐步增加之后，于生长季期间又逐渐降低，恢复至原有水平附近。从图 3 还可看出，云杉样地土壤微团聚体分形维数在季节性冻融期间总是小于其余两个样地，而华北落叶松样地土壤微团聚体分形维数虽然在深冻期超过了草甸样地，但是进入融化期又变得小于草甸样地，表明冻融作用对云杉样地土壤结构破坏性要小于草甸和华北落叶松样地，这主要与云杉样地优越的样地环境有关(表 1)。进入生长季前期和中期，则是草甸样地的土壤微团聚体分形维数小于其余两个样地，可能是草甸样地在该时期大量的草本植物活性恢复，且高于其余 2 个样地，而乔木根系在表层土壤中有可能少于草本植物，因此根系对草甸表层土壤作用较强，优化了草甸土壤结构。在生长季末期则相反，草甸样地的土壤微团聚体分形维数大于其余两个样地，华北落叶松样地最小，可能因为郁闭度、枯落物厚度等原因，华北落叶松和云杉样地土壤温度得以较好的保持，不易随外界温度变化而剧烈变化，草甸样地则不然，因此，其草本植物根系活性下降较其余两个样地大，导致其土壤微团聚体分形维数较高，但这更能体现出草本植物根系对表层土壤结构的作用。然而，3 个样地土壤微团聚体分形维数仅在生长季末期开始时存在显著差异($p<0.05$)，其余无显著差异。这与胡小兰[29]、甘凤玲等[30]的研究一致，可能是不同植被覆盖下的土壤中＜0.002 mm 和 0.02～0.002 mm 微团聚体含量差异显著($p<0.05$)引起的(表 3)，且以上两者研究结果都表明土壤分形维数都与＜0.002 mm 和 0.02～0.002 mm 微团聚体含量呈显著的正相关关系($p<0.05$)，且 0.02～0.002 mm 与土壤分形维数的相关系数(0.962 6)大于＜0.002 mm 微团聚体(0.713 7)。

3 个样地土壤含水量与土壤微团聚体分形维数之间存在显著负相关关系($p<0.05$)。结合图 3—4 可知，研究区土壤微团聚体分形维数，即土壤结构性的周期性变化，与土壤含水量在季节性冻融循期的周期性变化密切相关。因为在季节性冻融期内，植物根系、土壤动物和微生物活性降低，对土壤颗粒的作用效果不显著，此时，含水量和温度可能是影响土壤分形维数的两个主要因素。而在生长季，土壤温度逐渐升高至合适水平，再加上恰当的土壤含水量，有利于植物、土壤动物和微生物活性恢复，因而它们对土壤颗粒作用效果较显著，土壤结构性明显增强，分形维数降低。

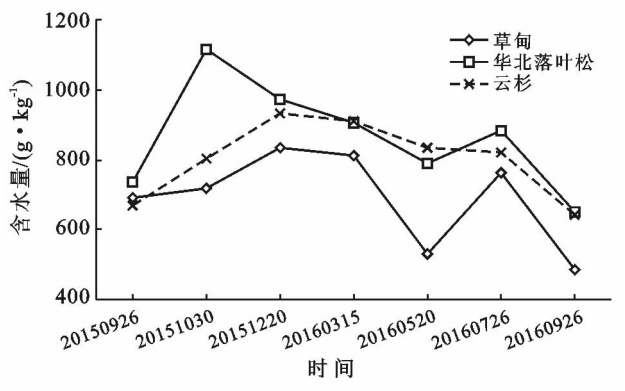



**图 4 研究区样地土壤含水量变化趋势**

## 3　结 论

(1) 3 个样地土壤微团聚体含量受到季节性冻融的影响发生改变,但比生长季土壤微团聚体的变化要少,且主要发生在初冻期和融化期。不过在深冻期,由于土壤温度波动和积雪保温作用,草甸样地和云杉样地土壤微团聚体含量也发生显著变化,但其变化仍然不及初冻期和融化期。

(2) 季节性冻融期间,样地植被不同造成的土壤微团聚体含量差异主要发生在融化期,而这一因素的影响在生长季期间表现的更加明显。

(3) 3 个样地土壤微团聚体分形维数呈现一致变化趋势,都是在季节性冻融期间增加,进入生长季减少,体现出周期性变化规律和一定土壤结构恢复能力。

[ 参 考 文 献 ]


[1] Kvðernø 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(3):175-182.

[2] 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[J]. Soil & Tillage Research, 2008,99(2):254-260.

[3] 刘亚红.冻融作用对土壤含水率、pH 值、电导率的影响[J].山西科技,2010,25(2):78-79.

[4] 暴路敏,刘小燕,刘廷玺,等.科尔沁沙地坨甸相间地区土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].中国农村水利水电,2014(11):77-85.

[5] 陈杰,龚子同,阮心玲,等.南极半岛海洋气候区的土壤(Ⅲ):冻—融作用与水分状况[J].土壤,2004,36(1):5-11.

[6] 张立新,徐学祖,韩文玉.景电灌区次生盐渍化土壤冻融特征[J].土壤学报,2002,39(4):513-516.

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

[8] 张弁,程永明,杨梅红.五台山站气候资料均一性检验及气候变化趋势分析[J].中国农学通报,2016,32(7):168-173.

[9] 刘鸿雁,曹艳丽,田军,等.山西五台山高山林线的植被景观[J].植物生态学报,2003,27(2):263-269.

[10] 戴君虎,潘媛,崔海亭,等.五台山高山带植被对气候变化的响应[J].第四纪研究,2005,25(2):216-223.

[11] 马子清.山西植被[M].北京:中国科学技术出版社,2001:41-44.

[12] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[13] 娄鑫,谷岩,张军辉,等.冬季积雪与冻融对土壤团聚体稳定性的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(4):63-70.

[14] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对塿土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.

[15] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,4:618-623.

[16] 李鉴霖.缙云山土地利用方式对土壤团聚体及其碳氮的影响[D].重庆:西南大学,2014.

[17] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物—土壤—微生物互作关系研究进展与展望[J].植物生态学报,2014,38(3):298-310.

[18] 魏艳春,马天娥,魏孝荣,等.黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(2):305-313.

[19] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.

[20] 王恩姮,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[J].应用生态学报,2010,21(4):889-894.

[21] 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.

[22] Lehrsch G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1991,55(5):1401-1406.

[23] Lehrsch G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability[J]. Soil Science, 1998,163:63-70.

[24] 王展,张玉龙,虞娜,等.冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J].土壤学报,2013,50(1):83-88.

[25] Brown G G, Barois I, Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains [J]. European Journal of Soil Biology, 2000,36:177-198.

[26] Schrader S, Zhang Haiquan., Earthworm casting: Stabilization or destabilization of soil structure? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997,29(3/4):469-475.

[27] Ternan J L, Williams A G, Elmes A, et al. Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management [J]. Earth Surface Processes Land. 2015, 21(2):181-193.

[28] 祝忆伟,张志铭,赵勇,等.不同林龄栓皮栎林下土壤颗粒分形及养分特征研究[J].河南农业大学学报,2017,51(5):634-639.

[29] 胡小兰.淮河流域 3 个小流域不同植物群落下土壤粒径分布与分形特征[D].山东 泰安:山东农业大学,2011.

[30] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].水土保持研究,2018,25(1):84-91.