

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220729.001.

丁慧慧, 陈文盛, 李江荣. 季节性冻融对色季拉森林土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 120-127.  
DING Huihui, CHEN Wensheng, LI Jiangrong. Effect of Seasonal Freeze-Thaw on the Stability of Soil Aggregates in the Forest of Sergyemla Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 120-127.

# 季节性冻融对色季拉森林土壤团聚体稳定性的影响

丁慧慧<sup>1,2,3,4</sup>, 陈文盛<sup>1,2,3,4</sup>, 李江荣<sup>1,2,3,4</sup>

(1.西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2.西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 3.西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000; 4.西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏 林芝 860000)

**摘 要:**为分析季节性冻融对土壤团聚体稳定性的影响,以藏东南色季拉山森林土壤为研究对象,通过野外控制性试验利用湿筛法测定团聚体组成,分析了 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 深度土层各粒径团粒结构变化,以及土壤含水量(SWC), 0.25 mm 水稳性团聚体含量(WSA)、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、分形维数  $D$ 、可蚀性  $K$  值各指标之间的关系。结果表明:(1) 季节性冻融导致大团粒含量减少,小团粒含量增加,土壤结构失调。(2) 含水量是影响团聚体稳定性的重要因素之一。(3) 季节性冻融作用整体上导致 MWD, GMD 变小,  $D$  值与  $K$  值变大,降低了土壤团聚体稳定性。(4) 当土壤冻融次数在一定范围内 STF-One 中, WSA 有所增加,土壤稳定性有所增强。(5) 土壤团聚体 WSA, MWD 和 GMD 均与  $D$  值和  $K$  值呈负相关。(6) 在 SFT-Ys 类型土壤中土壤结构变化, 0.5 mm 粒级是重要临界点。综上, 研究为季节性冻融对土壤稳定性的影响提供数据支持,为冻土潜在受侵蚀情况提供理论依据。

**关键词:**季节性冻融; 土壤团聚体; 湿筛法; 土壤稳定性; 色季拉山

中图分类号: S152.4      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2023)01-0120-08

## Effect of Seasonal Freeze-Thaw on the Stability of Soil Aggregates in the Forest of Sergyemla Mountain

DING Huihui<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Wensheng<sup>1,2,3,4</sup>, LI Jiangrong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. *Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China*; 2. *Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education, Nyingchi, Tibet 860000, China*; 3. *National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment, Nyingchi, Tibet 860000, China*; 4. *Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Tibet, Nyingchi, Tibet 860000, China*)

**Abstract:** The forest soil of Sergyemla Mountain in southern Tibet was used as the study object to examine the influence of seasonal freezing and thawing on the stability of soil aggregates, and the composition of aggregates was measured by using the wet sieving method in field controlled trials. The structure of each particle-sized aggregate changes, soil water content (SWC), 0.25 mm water stability aggregate content (WSA), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), the fractal dimension  $D$ , the erodibility index  $K$  value, and the relationship between these parameters in 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm of the soil layers were analyzed. The results show that: (1) seasonal freezing and thawing resulted in the decrease in the content of big aggregates, the increase in the content of tiny aggregates, and an imbalance in soil structure; (2) water content is a crucial component influencing aggregate stability; (3) the seasonal freeze-

thaw effect affected the stability of soil aggregates by decreasing MWD and GMD and increasing  $D$  and  $K$  values; (4) when the number of soil freezing and thawing events in STF-One fell within a particular range, WSA rose and soil stability improved; (5) correlation analysis of the indicators revealed that the values of WSA, MWD, and GMD were negatively linked with the  $D$  and  $K$  values; (6) the 0.5 mm particle size is an essential key point in the soil structure modification in SFT-Ys type soil. These research results can provide evidence to support the impacts of seasonal freezing and thawing on soil stability as well as a theoretical basis for permafrost erosion.

**Keywords:** seasonal freezing and thawing; soil aggregate; wet screening method; soil stability; Sergyemla

季节性冻融是指由于一年四季与昼夜温度的变化,反映在多尺度土层上反复冻结—融冻的过程<sup>[1]</sup>,这种情况主要出现在高纬度地区如我国东北地区<sup>[2-3]</sup>以及高海拔地区如我国青藏高原地区<sup>[4]</sup>,是全球普遍存在的一种自然现象。秋冬季节,温度降低,土层普遍由上至下冻结,春夏季节,温度升高,土层普遍由上至下冻融<sup>[5]</sup>。季节性冻融变化作为气候变化的一个指示器,其通过对地表能量、水和碳循环的影响,从而在局地 and 全球气候及陆地生态系统中发挥作用<sup>[5-6]</sup>。

土壤团聚体不仅是土壤结构的基础单位,也是土壤的主要组成元素和土壤营养物质的主要来源,同时也是评价土壤质量和健康状况的重要标志<sup>[7-9]</sup>。通过土壤对外界挤压作用大小判断土壤结构的稳定与否,其中主要包括土壤结构的机械稳定性和土壤结构的水稳性<sup>[10]</sup>。土壤团聚体作为评价土壤侵蚀性的重要因素之一<sup>[9]</sup>,提高土壤团聚体水稳性和土壤团聚体的数量、质量可以增强土壤抗侵蚀能力<sup>[11]</sup>。就目前来看,土壤含水量(SWC)、0.25 mm 水稳性团聚体含量(WSA)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数  $D$ 、可蚀性  $K$  值等是衡量土壤团聚体稳定性的一个重要指标<sup>[12-13]</sup>。一般认为,随着 0.25 mm 水稳性团聚体含量,平均质量直径、平均几何直径指数的增加,土壤团粒的分布情况和稳定性都会相应的降低与提高<sup>[2,14]</sup>。此外,分形维数愈低,则愈有利于土壤结构的稳定及耐侵蚀能力<sup>[15]</sup>。土壤使用模式会改变土壤结构、有机胶结物质和土壤微生物的活性,从而使土壤有机质重新分布,进而对土壤的稳定性产生不利的影响<sup>[16-17]</sup>。

本文通过对比 3 个不同处理类型土壤 STF-Un (未经季节性冻融),STF-One(经一年季节性冻融),STF-Ys(经多年季节性冻融),分别探讨 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 深度土壤在冻融作用下土壤水稳性团聚体所受到的影响,主要分析各个深度土壤粒径团粒含量的分布情况,以及冻融对土壤水稳性团

粒含量、平均质量直径、平均几何直径、分形维数  $D$  和土壤可蚀性  $K$  值的变化趋势进行比较分析。研究季节性冻融对土壤稳定性的影响,为研究冻融环境下土壤侵蚀的预报提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

色季拉山(93°12′—95°35′E, 29°10′—30°15′N)位于青藏高原东南部西藏自治区林芝市巴宜区境内,属念青唐古拉山脉与喜马拉雅山脉的交汇处,是尼洋河流域与雅鲁藏布江的分水岭,呈东北—西南走向,最高海拔约 5 200 m。该地区气候主要受印度洋西南季风的影响<sup>[18]</sup>,冬暖夏凉,干湿季节区分明显。降雨主要集中在 6—9 月,占全年降雨量的 75%~82%,年均相对湿度 78.83%,年均气温 -0.73℃,最热月(7 月)均温 9.23℃,最冷月(1 月)均温 -13.98℃,年日照时数 1 151 h,其中日照时数最高的出现 12 月(151.7 h)<sup>[19]</sup>。研究区土壤为棕壤,土层较厚,pH 值的变化范围在 4~6,偏酸性<sup>[20]</sup>。

### 1.2 样品采集

在利用不同的海拔气候条件下,进行 3 种不同类型土壤对比,在海拔 4 300 m 处取样作为经多年季节性冻融土壤(SFT-Ys),在海拔 3 500 m 处取样作为未经季节性冻融土壤(STF-Un)类型,利用 PVC 管(直径 20 cm,深度 35 cm)将 3 500 m 处土壤搬移至 4 300 m 处进行野外控制性试验持续时间为 1 a,并随机选取 4 个样品作为一年季节性冻融(STF-One)。样点用地类型为林地,取样时间为 2021 年 6 月 22 日 1 个冻融期结束。每个海拔分 3 个样地,每个样地取 4 个样,共 84 个样。取样时,要仔细清除地表上的植物和杂草,取样深度分别为 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm,所取的原状土带回实验室,并用硬塑料盒子装好避免在途中发生破坏。对于 STF-One 处理类型土壤取样,在 4 300 m 海拔处 4 个样地中各取一个 PVC 管进行对比。

### 1.3 分析方法

试验中,用湿筛法进行了土壤团聚体试验。通过对砂砾石、侵入体和粗有机质的捡除,并在自然风干过程中沿着土壤断裂面上,进行将其分拣为直径 10 mm 大小的土块。在土壤样品充分干燥后,对其中的一部分进行湿筛法分离用于研究土壤团聚体水稳性<sup>[21-22]</sup>。筛分时,将 50 g 干燥的土壤称重,放入 5 mm 的土筛中,用蒸馏水浸泡 5 min,接着用 3 mm,2 mm,1 mm,0.5 mm,0.25 mm 土筛让土样依次通过<sup>[23]</sup>。然后,以 30 次/min 的频率上下振动 10 min,把残留在每一个筛网上的泥土冲入铝盒,进行烘干和称重<sup>[24]</sup>。每个样品重复检测 3 次取平均值。

土壤含水量 SWC 采用便捷式土壤水分、温度检测仪(Moisture Meter type HH2)。另外水稳性团聚体百分含量 WSA、团聚体平均质量直径 MWD、团聚体几何平均直径 GMD 和分形维数  $D$ 、土壤可蚀性  $K$  值,指标的具体计算公式如下:

$$WSA = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

式中: $M_{r>0.25}$  为粒径  $>0.25$  mm 团聚体累计质量; $M_T$  为土壤各粒径团聚体质量之和<sup>[10-11]</sup>;

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2)$$

式中: $X_i$  表示每层团聚体的平均直径(mm); $W_i$  表示每层团聚体粒级的团聚体质量所占百分比比例<sup>[25]</sup>。

$$GMD = e^{\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (3)$$

式中: $X_i$  表示每层团聚体的平均直径(mm); $W_i$  表示每层团聚体粒级的团聚体质量所占百分比比例<sup>[26]</sup>。

分形维数计算方法采用杨培培<sup>[27]</sup>推导的分形维数

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left( \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

对上式两边取对数可得公式如下:

$$\lg \left[ \frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left( \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中: $\bar{x}_i$  为某级团聚体的平均直径(mm); $M(r < \bar{x}_i)$  为直径小于的团聚体质量; $M_T$  为团聚体总质量; $x_{\max}$  为团聚体的最大直径(mm)。利用上述公式对试验进行数学拟合,从而求得  $D$  值。

Shiriza 等建议在没有充足土壤资料的情况下<sup>[28]</sup>,可采用公式(6)计算土壤可蚀性  $K$  值,公式如下:

$$K = 7.954 \times \left[ 0.0017 + 0.0494 \times e^{-0.5 \times \left( \frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2} \right] \quad (6)$$

式中: $GMD$  为公式(3)中所求出的值。

### 1.4 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理;采用 IBM SPSS Statistics 25 对土壤含水量和团聚体性质进行相关性分析,并使用 Origin 2021 进行制图。

## 2 结果与分析

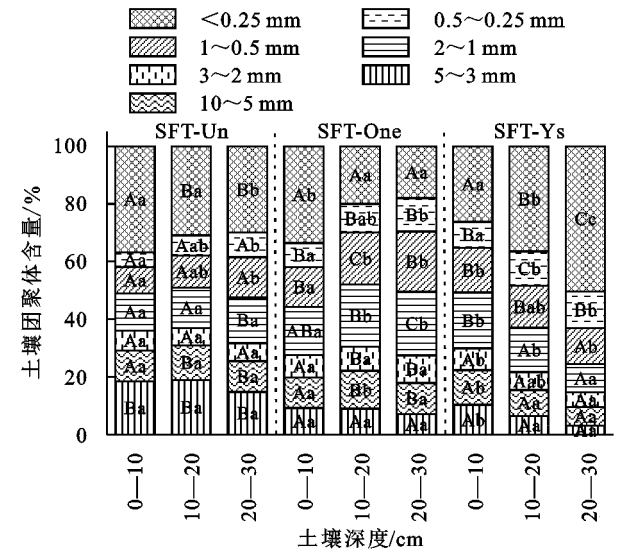
### 2.1 土壤各粒径团粒变化情况

如图 1 所示,在 STF-Un 类型土壤中,各团粒含量占比在不同土层中的比较,其中 10~5 mm 和 0.25~0 mm 粒径团粒含量所占比例最大,范围在 10%~37%,3~2 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径团粒含量所占比例较低。在 1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 粒径范围在不同深度土壤中,差异较为明显( $p < 0.05$ ),在其余粒径范围中差异不明显( $p > 0.05$ )。

在 STF-One 类型土壤中,各团粒含量占比在不同土层中进行比较,其中 2~1 mm,1~0.5 mm 和 0.25~0 mm 粒径团粒含量所占比例较大,分布范围在 13~34%,3~2 mm 粒径团粒含量分布比例较少。在不同土层深度,10~5 mm,3~2 mm 团粒差异不显著( $p > 0.05$ ),5~3 mm 粒径中 10—20 cm 深度的含量占比较多,2~1 mm 粒径中 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm 并且差异显著( $p < 0.05$ ),1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径中 0—10 cm 深度含量最低,0.25~0 mm 粒径中 0—10 cm 深度含量最高。

在 STF-Ys 类型土壤中,各团粒含量占比在不同土层深度比较,其中 0.25~0 mm 粒径团粒含量所占比例较大,分布范围在 26%~51%,10~5 mm 粒径团粒含量占比较小。在不同土层深度中,0.25~0 mm 粒径中 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm 并且差异显著( $p < 0.05$ ),在其余粒径范围中各土层有较为显著的差异( $p < 0.05$ )。

同一土层不同处理差异性分析,在 0—10 cm 深度土层 10~5 mm,5~3 mm,3~2 mm,0.25~0 mm 粒径团粒含量占比之间无显著差异( $p > 0.05$ ),2~1 mm 粒径团粒含量中 STF-Ys 含量较高,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 粒径团粒含量占比中,STF-Un 含量较少。在 10—20 cm 深度土壤中,在 1~0.5 mm 粒径范围中 STF-Un > STF-Ys > STF-One,在 0.5~0.25 mm 粒径范围里 STF-Ys > STF-One > STF-Un 并且差异显著( $p < 0.05$ ),在其余粒径中也存在较为显著的差异( $p < 0.05$ )。在 20—30 cm 深度的土壤中,在 2~1 mm 粒径范围里 STF-One > STF-Un > STF-Ys,在 0.25~0 mm 粒径范围中 STF-Ys > STF-Un > STF-One 且差异显著( $p < 0.05$ )。



注:(1) STF-Un 为未经季节性冻融土壤;STF-One 为经一年季节性冻融土壤;STF-Ys 为经多年季节性冻融土壤。(2) 同列数据后标不同小写字母表示同一土壤处理类型不同土层之间差异显著( $p < 0.05$ );同列数据后标不同大写字母表示同一土层不同土壤处理类型之间差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图 1 不同处理类型土壤不同土层土壤团粒含量变化

2.2 不同类型土壤不同土层各指标间变化分析

由表 1 可得,从同一处理类型土壤不同土层分析,未冻融土壤类型中,SWC,WSA,MWD,GMD、分形维数  $D$ 、可蚀性  $K$  值 6 个指标在三层土层深度中

表 1 不同类型土壤不同土层各指标间变化分析

类型	土层	SWC	WSA	MWD	GMD	分形维数 $D$	可蚀性 $K$ 值
STF-Un	0—10 cm	15.22±5.52Aa	63.17±16.61Aa	1.9±0.61Aa	1.06±0.4Aa	2.77±0.1Aa	0.04±0.02Aa
	10—20 cm	16.03±5.88Aa	69.09±6.77Aa	1.97±0.46Ba	1.1±0.29Ba	2.76±0.07Aa	0.04±0.01Aa
	20—30 cm	14.69±5.66Aa	70.05±6.27Ba	1.77±0.48Ba	1.02±0.34Ba	2.78±0.08Aa	0.04±0.01Aa
STF-One	0—10 cm	31.49±0.22Ba	66.43±11.66Aa	1.55±0.37Aa	0.89±0.24Aa	2.82±0.06Aa	0.04±0.01Aa
	10—20 cm	48.81±0.17Bb	80.02±7.55Bb	1.73±0.33Ba	1.09±0.25Ba	2.77±0.06Aa	0.03±0.01Aa
	20—30 cm	51.18±0.13Bc	82.05±6.58Cb	1.6±0.34Ba	1.04±0.26Ba	2.78±0.07Aa	0.04±0.01Aa
STF-Ys	0—10 cm	51.84±9.34Cab	73.77±6.89Ac	1.69±0.27Ac	1.01±0.18Ac	2.79±0.05Aa	0.04±0.01Aa
	10—20 cm	57.84±8.22Cb	63.5±13.68Ab	1.31±0.39Ab	0.77±0.24Ab	2.85±0.06Bb	0.05±0.02Bb
	20—30 cm	47.47±11.53Ba	49.65±13.44Aa	0.95±0.34Aa	0.56±0.17Aa	2.91±0.05Bc	0.07±0.02Bc

在 STF-One 处理中(表 3),10~5 mm,5~3 mm 粒径含量与指标 MWD,GMD 呈显著正相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著负相关。随着 10~5 mm,5~3 mm 粒径含量的增加,MWD,GMD 呈增加趋势,而  $D$  值、 $K$  值呈减少趋势。5~3 mm 粒径含量与 WSA 呈正相关。3~2 mm 粒径团粒含量与 WSA 呈正相关,与  $K$  值呈负相关。2~1 mm 粒径含量与 SWC,WSA,GMD 呈显著正相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著负相关。1~0.5 mm 粒径团粒含量与 SWC,WSA 均呈正相关。0.5~0.25 mm 粒径团粒含量与 SWC 呈正相关,与 MWD 呈负相关。0.25~0 mm 粒径团粒含量与 6 个指标均有相关关系,其中与 SWC,WSA,MWD,GMD 均呈负相关,与

均无显著差异( $p > 0.05$ )。在经一年季节性冻融土壤中,SWC 在 20—30 cm 深度土壤含量最大并且不同土层深度之间差异显著( $p < 0.05$ ),WSA 在三层土壤中 0—10 cm 深度含量最小并且不同土层差异显著( $p < 0.05$ ),其余指标在不同土层中无显著差异( $p > 0.05$ )。在经多年季节性冻融土中,6 个指标在不同土层中均有显著差异性( $p < 0.05$ )。

从同一土层不同土壤处理类型进行分析,在 0—10 cm 深度土层中,SWC 在 3 个不同类型土壤之间皆差异显著( $p < 0.05$ ),其余指标在不同类型土壤之间无显著差异( $p > 0.05$ )。在 10—20 cm,20—30 cm 土层中,6 个指标在不同处理类型土壤中均存在显著差异( $p < 0.05$ )。

2.3 土壤团粒组成与各参数间相关性分析

相关性结果表明,在 STF-Un 处理中(表 2),10~5 mm,5~3 mm,3~2 mm 粒径含量分别于指标 WSA,MWD,GMD 呈显著正相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著负相关。随着各粒径团粒含量的增加,WSA,MWD,GMD 就越大, $D$  和  $K$  值就越小。2~1 mm 粒径团粒含量与 WSA 呈正相关。1~0.5 mm 粒径含量与 SWC 呈正相关。1~0.5 mm,0.5~0.25 mm,0.25~0 mm 粒径含量与 MWD,GMD 呈显著负相关,与  $D$  值均呈正相关。0.25~0 mm 粒径含量与 WSA 呈负相关,与  $K$  值呈正相关。

$D$  值、 $K$  值呈正相关。说明随着 0.25~0 mm 粒径团粒含量的增加 SWC,WSA,MWD,GMD 呈减少趋势, $D$  值、 $K$  值呈增加趋势。

在 STF-Ys 处理中(表 4),10~5 mm,5~3 mm,3~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm 粒径含量与指标 WSA,MWD,GMD 呈显著正相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著负相关。而 0.5~0.25 mm,0.25~0 mm 粒径团粒含量与指标 WSA,MWD,GMD 呈显著负相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著正相关。其正负相关性以 0.5 mm 团粒粒级为界。

在 3 个不同处理类型土壤中,SWC,WSA,MWD,GMD, $D$ , $K$  这 6 个指标间的相关关系皆一



致。首先 SWC 与其余 5 个指标之间无显著相关。WSA 与 MWD 和 GMD 均呈显著正相关,MWD 与 GMD 呈显著正相关关系, $D$  值与  $K$  值呈正相关关

系。其次 WSA,MWD 和 GMD 均与  $D$  值与  $K$  值呈负相关,说明土壤团聚体的 WSA,MWD 和 GMD 越大, $D$  值与  $K$  值就越小。

表 2 SFT-Un 处理下不同类型土壤各粒径团粒含量与各指标间的相关性分析

参数	10~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0 mm	SWC	WSA	MWD	GMD	$K$	$D$
10~5 mm	1	0.579 **	0.040	-0.630 **	-0.715 **	-0.668 **	-0.496 **	-0.071	0.359 *	0.896 **	0.838 **	-0.671 **	-0.868 **
5~3 mm		1	0.391 *	-0.321	-0.511 **	-0.467 **	-0.464 **	-0.175	0.428 **	0.718 **	0.686 **	-0.643 **	-0.690 **
3~2 mm			1	0.473 **	0.140	0.010	-0.556 **	0.108	0.601 **	0.340 *	0.438 **	-0.508 **	-0.399 *
2~1 mm				1	0.868 **	0.668 **	-0.295	0.318	0.366 *	-0.395 *	-0.256	0.023	0.308
1~0.5 mm					1	0.867 **	-0.167	0.411 *	0.225	-0.570 **	-0.448 **	0.206	0.488 **
0.5~0.25 mm						1	-0.103	0.254	0.223	-0.506 **	-0.430 **	0.159	0.453 **
0.25~0 mm							1	-0.293	-0.932 **	-0.671 **	-0.749 **	0.851 **	0.731 **
SWC								1	0.245	-0.034	0.020	-0.094	-0.006
WSA									1	0.637 **	0.729 **	-0.864 **	-0.704 **
MWD										1	0.965 **	-0.888 **	-0.984 **
GMD											1	-0.867 **	-0.996 **
$K$												1	0.879 **
$D$													1

表 3 SFT-One 处理下不同类型土壤各粒径团粒含量与各指标间的相关性分析

参数	10~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0 mm	SWC	WSA	MWD	GMD	$K$	$D$
10~5 mm	1	0.576 **	-0.099	-0.020	-0.461 **	-0.628 **	-0.318	0.041	0.318	0.896 **	0.793 **	-0.600 **	-0.805 **
5~3 mm		1	0.152	0.472 **	-0.039	-0.285	-0.683 **	0.332	0.683 **	0.831 **	0.825 **	-0.850 **	-0.794 **
3~2 mm			1	-0.021	0.450 **	0.418 *	-0.472 **	0.292	0.472 **	0.160	0.250	-0.368 *	-0.233
2~1 mm				1	0.460 **	0.275	-0.720 **	0.715 **	0.720 **	0.300	0.450 **	-0.594 **	-0.430 **
1~0.5 mm					1	0.724 **	-0.571 **	0.607 *	0.571 **	-0.161	0.036	-0.249	-0.037
0.5~0.25 mm						1	-0.300	0.561	0.300	-0.410 *	-0.242	0.049	0.232
0.25~0 mm							1	-0.608 *	-1.000 **	-0.670 **	-0.805 **	0.917 **	0.794 **
SWC								1	0.608 *	0.265	0.374	-0.496	-0.366
WSA									1	0.670 **	0.805 **	-0.917 **	-0.794 **
MWD										1	0.968 **	-0.881 **	-0.963 **
GMD											1	-0.926 **	-0.997 **
$K$												1	0.908 **
$D$													1

表 4 SFT-Ys 处理下不同类型土壤各粒径团粒含量与各指标间的相关性分析

参数	10~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0 mm	SWC	WSA	MWD	GMD	K	D
10~5 mm	1	0.593 **	0.319	0.460 **	0.078	-0.665 **	-0.646 **	0.032	0.646 **	0.868 **	0.788 **	-0.727 **	-0.809 **
5~3 mm		1	0.718 **	0.720 **	0.341 *	-0.611 **	-0.848 **	0.120	0.848 **	0.880 **	0.891 **	-0.866 **	-0.885 **
3~2 mm			1	0.737 **	0.492 **	-0.490 **	-0.786 **	0.157	0.786 **	0.679 **	0.706 **	-0.785 **	-0.690 **
2~1 mm				1	0.688 **	-0.616 **	-0.925 **	-0.009	0.925 **	0.780 **	0.851 **	-0.866 **	-0.837 **
1~0.5 mm					1	-0.116	-0.675 **	-0.127	0.675 **	0.373 *	0.436 **	-0.576 **	-0.442 **
0.5~0.25 mm						1	0.582 **	-0.153	-0.582 **	-0.736 **	-0.752 **	0.634 **	0.743 **
0.25~0 mm							1	-0.011	-1.000 **	-0.917 **	-0.938 **	0.978 **	0.937 **
SWC								1	0.011	0.069	0.084	-0.022	-0.074
WSA									1	0.917 **	0.938 **	-0.978 **	-0.937 **
MWD										1	0.977 **	-0.954 **	-0.982 **
GMD											1	-0.935 **	-0.998 **
$K$												1	0.939 **
$D$													1

注：\* 表示显著相关( $p<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $p<0.01$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 团粒结构与含水量

土壤团聚体各团粒组成是影响土壤肥力的重要因素<sup>[7]</sup>。在土壤各深度土层中, SFT-Un 类型土壤团聚体多集中在 10~5 mm, 2~1 mm 与 0.25~0 mm 粒径中。SFT-One 类型土壤中团聚体主要集中在 2~1 mm 与 0.25~0 mm 的粒径范围中, SFT-Ys 类型土壤中团聚体主要集中在 2~1 mm, 1~0.5 mm 与 0.25~0 mm 粒径范围中。0.25~0 mm 粒径团粒含量占比在 10—20 cm 与 20—30 cm 深度中 3 种处理类型土壤具有显著差异。这主要是由于冻融会对土壤团粒结构产生一定的破解作用, 造成土壤中大团粒结构含量减少, 而小粒级团粒含量增加<sup>[29]</sup>。Oztas 等<sup>[30]</sup>认为冻融促进了土壤团聚体的破碎, 从而降低了团聚体的稳定性。牛浩等<sup>[31]</sup>2020 年在对黑龙江地区冻土与肖东辉等<sup>[32]</sup>对冻融情况下黄土的研究发现, 随着冻融过程的变化土壤结构中较大粒径组团粒呈逐渐减小的趋势, 而较小颗粒粒径组团粒则呈增加趋势, 其结果与本文研究结果基本一致。而文晶在对长江源北麓河流域冻土进行研究时发现<sup>[33]</sup>, 冻融导致表层土壤团粒出现粗粒化现象, 得出的结论与本文结论相反, 其原因可能是文晶的研究主要集中在草甸区域的多年冻土, 其主要原因可能是研究区域的植被类型不同。

在土壤含水量与土壤团聚体(0—30 cm)的相关分析中表明, SFT-Un 类型土壤中与 1~0.5 mm 粒径含量呈正相关。SFT-One 类型土壤 SWC 与 2~1 mm, 1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 粒径团粒含量呈正相关, 与 0.25~0 mm 粒径团粒含量呈负相关。SFT-Ys 类型土壤中 SWC 与各粒径含量均无显著相关。在赵恒策, 王展等<sup>[29, 34]</sup>的研究中表明, SWC 与土壤粒级团聚体含量会达到显著相关水平, 与本研究结果相似。在 SFT-Un 类型土壤中, 3 个深度土层之间的 SWC 指标差异不显著, 在 SFT-One 与 SFT-Ys 类型土壤中 3 个深度土层之间的 SWC 差异显著。可能的原因是冰雪的融化以及冰雪的冻结阻碍了水分在土壤中的流动等因素造成了温度升高冰雪融化土壤含水量的增加<sup>[35]</sup>。分别在三层不同深度土层中, 将 3 种处理类型的土壤进行比较时, 均具有显著差异。王洋等<sup>[36]</sup>研究发现冻融过程使得土壤水分显著提高, 并且对土壤结构和水分分布特征具有明显影响<sup>[37]</sup>, 与本文结果一致。

#### 3.2 0.25 mm 水稳性团聚体、土壤团聚体直径指标

许多研究表明<sup>[14, 25]</sup>, 0.25 mm 水稳性团聚体含量(WSA)和土壤团聚体直径指标(MWD, GMD)的值越大说明土壤团聚体稳定性越好。在 0—10 cm 深度土层中, 3 种类型土壤 WSA 大小表现为, SFT-Ys>SFT-One>SFT-Un 但其差异并不显著。文晶等<sup>[33]</sup>得出冻融会增加表层土壤团聚体稳定性的结论与该结论相一致。在 0—30 cm 深度土层中 SFT-One, SFT-Un 两种类型 WSA 大小均表现为 SFT-One>SFT-Un。在 10—20 cm, 20—30 cm 深度土层中, 3 种处理类型土壤表现为: SFT-One>SFT-Un>SFT-Ys 说明经过一年季节性冻融的土壤, WSA 有所增加, 一定程度上增加了 10—20 cm 深度土壤团聚体稳定性, 经多年季节性冻融的 WSA 显著低于其他两个类型。多年季节性冻融会降低 WSA, 从而降低了土壤团聚体的稳定性。Oztas 等<sup>[30]</sup>研究认为, 在湿筛处理下, 当土壤冻融次数在一定范围内, 其土壤增强土壤团聚体的稳定性。杨梅学等<sup>[38]</sup>通过在西藏那曲地区长时间监测得出这样的结论表明了土壤的冻融交替过程对不同深度土层的影响是不同的。

3 个处理类型下, 0—10 cm 深度中 MWD, GMD 指标差异均不显著, 在 10—30 cm 深度中 MWD, GMD 指标 SFT-Ys 子集小于 SFT-One、SFT-Un 子集间, 差异显著。在 SFT-Ys 类型土壤中随深度的加深, MWD, GMD 呈逐渐减少的趋势, 土壤稳定性逐渐减弱。表明土壤经过多年季节性冻融后, MWD, GMD 数值变小, 土壤稳定性变差, 这与刘绪军等<sup>[39]</sup>研究结果基本一致。而与李嘉<sup>[40]</sup>的研究结果相反, 其研究发现经过季节性冻融华北落叶松林和云杉 × 华北落叶松混交林 MWD 和 GMD 显著增加, 从而增加了土壤稳定性。此外王恩姮等<sup>[41]</sup>研究发现季节性冻融促进了典型黑土区土壤水稳性团聚体的团聚, 提高了土壤团聚体水稳性, 这也与本文得出的结果相反, 原因可能是色季拉山海拔高冻结温度更低, 冻结程度较大, 植被类型的不同, 枯落物厚度的不同, 另外研究区的土壤类型也有所不同, 已有相关研究表明土壤团聚体水稳性会随土壤黏粒的变化而变化<sup>[42]</sup>。

#### 3.3 分形维数 $D$ 与可蚀性 $K$ 值

土壤分形维数( $D$ )能够反映土壤的质地、均匀性、物理特性和肥力特性等, 通过分析不同粒径团粒分布情况, 得到的  $D$  值大小可以说明大团粒含量对土壤结构和稳定性的影响,  $D$  值越高, 其土壤稳定性就越差<sup>[13]</sup>。土壤可蚀性  $K$  值作为评价土壤抵抗水蚀能

力大小的重要指标,其中  $K$  值越小说明土壤抵抗侵蚀的能力越强,反之则土壤抗侵蚀能力越弱<sup>[43]</sup>。本研究表明3种不同处理下分形维数  $D$  与可蚀性  $K$  值, SFT-Ys 子集大于 SFT-One、SFT-Un 子集间,差异显著,表明经多年季节性冻融的影响,  $D$  值与  $K$  值显著增大,土壤稳定性变差,土壤的抗侵蚀能力减弱。在 SFT-Ys 类型土壤中随深度的加深,  $D$  值、 $K$  值呈逐渐增加的趋势,土壤稳定性逐渐减弱。这与赵恒策<sup>[29]</sup>、缪驰远<sup>[44]</sup>等对东北典型黑土等的研究结果一致。

其中在 SFT-Ys 类型土壤中各粒径含量与指标之间的相关性分析,10~5 mm,5~3 mm,3~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm 粒径含量与指标 WSA,MWD,GMD 呈显著正相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著负相关,而 0.5~0.25 mm,0.25~0 mm 粒径团粒含量与指标 WSA,MWD,GMD 呈显著负相关,与  $D$  值、 $K$  值呈显著正相关。其正负相关性以 0.5 mm 团粒粒级为界,说明在冻融作用下土壤团聚体变化过程中,0.5 mm 粒级是关键的临界点。牛浩等<sup>[25,31]</sup>也研究认为 0.5 mm 粒级在土壤结构变化中起到重要的作用,从而进一步土壤团聚体稳定性。在 SFT-Un,SFT-One 类型土壤中团粒与各指标的正负性主要是以 1 mm 粒级为分界线。

在3个不同处理类型土壤中,SWC,WSA,MWD,GMD, $D$ , $K$  共6个指标间的相关关系皆一致。其中 SWC 与其余5个指标之间无显著相关。WSA 与 MWD 和 GMD 均呈显著正相关,MWD 与 GMD 呈显著正相关关系, $D$  值与  $K$  值呈正相关关系。而 WSA,MWD 和 GMD 均与  $D$  值、 $K$  值呈负相关,说明土壤团聚体的 WSA,MWD 和 GMD 越大, $D$  值与  $K$  值就越小。

## 4 结论

(1) 季节性冻融作用导致土壤团粒结构产生一定破解作用,土壤中大团粒结构分布减少,而小粒级团粒含量分布增加。季节性冻融增加了土壤含水量,在 SFT-Un,SFT-One 两种类型土壤中 SWC 与粒径团粒含量间总体呈显著正相关。

(2) 季节性冻融作用使得 MWD,GMD 数值总体上变小, $D$  值与  $K$  值变大,土壤团聚体稳定性有所降低。在 SFT-Ys 类型土壤中随采样深度增加,土壤稳定性逐渐降低,抗侵蚀能力也呈逐渐减弱的趋势。

(3) 相关性分析结果表明,3 种类型土壤中 WSA,MWD 和 GMD 均与  $D$  值与  $K$  值呈负相关。在 SFT-Ys 类型土壤中土壤结构变化,0.5 mm 粒级

是重要临界点。

(4) 一年的冻融周期下,WSA 值有所增加,土壤稳定性相对增强。但 SFT-One 与 SFT-Un 其余指标间均无显著差异,可能的原因是一年的冻融期时间较短,对土壤团聚体稳定性的影响较小,需持续进行试验进行长期观测研究。

## 参考文献:

- [1] Ren J, Song C, Hou A, et al. Shifts in soil bacterial and archaeal communities during freeze-thaw cycles in a seasonal frozen marsh, Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2018,625:782-791.
- [2] 张海鸥.冻融交替作用对土壤理化性质的影响研究进展[J].农业与技术,2021,41(4):33-36.
- [3] Zhe C, Yang S, Zhang A, et al. Nitrous oxide emissions following seasonal freeze-thaw events from arable soils in Northeast China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018,17(1):231-246.
- [4] Wang Q, Zhang T, Jin H, et al. Observational study on the active layer freeze-thaw cycle in the upper reaches of the Heihe River of the north-eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Quaternary International, 2017,440:13-22.
- [5] Zhang L, Ren F, Li H, et al. The influence mechanism of freeze-thaw on soil erosion: a review[J]. Water, 2021,13(8):1010.
- [6] Luo S, Wang J, Pomeroy J W, et al. Freeze-thaw changes of seasonally frozen ground on the Tibetan Plateau from 1960 to 2014[J]. Journal of Climate, 2020,33(21):9427-9446.
- [7] 刘双.柑橘园土壤团聚体及有机碳分布特征[D].长沙:湖南农业大学,2020.
- [8] 刘波,吴礼树,鲁剑巍,等.不同耕作方式对土壤理化性质影响研究进展[J].耕作与栽培,2010(2):55-58.
- [9] 张彧行,翁白莎,严登华.基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J].地球科学进展,2022,37(4):429-438.
- [10] 于卫洁.黄土丘陵沟壑区退耕坡面植被与土壤恢复力评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [11] 徐灿.基于分形维数的土壤团聚体稳定性评价及其与可蚀性的关系[D].武汉:长江科学院,2015.
- [12] 于文竹,魏霞,赵恒策,等.青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征[J].水土保持学报,2020,34(6):301-308.
- [13] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.
- [14] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.

- [15] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [16] 许燕琳.祁河流域不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性和养分分布特征[D].济南:山东师范大学,2021.
- [17] 韩露,万忠梅,孙赫阳.冻融作用对土壤物理、化学和生物学性质影响的研究进展[J].土壤通报,2018,49(3):736-742.
- [18] 万丹,梁博,聂晓刚,等.西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性[J].生态学报,2018,38(3):1065-1074.
- [19] 任毅华,侯磊,方江平,等.不同时间尺度上西藏色季拉山急尖长苞冷杉林下倒木空间格局分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(8):78-84,92.
- [20] 李江荣,高郅,郑维列,等.急尖长苞冷杉4种林型土壤养分特征[J].中南林业科技大学学报,2021,41(11):108-119.
- [21] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998,62(5):1367-1377.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978:77-88.
- [23] 晓利,何园球,李成亮,等.不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J].土壤学报,2008,45(3):459-465.
- [24] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [25] 牛浩.冻融过程对东北黑土团聚体稳定性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [26] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持通报,2009,29(5):114-117.
- [27] 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[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [28] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Science Society of America-journal, 1984,48(1):142-147.
- [29] 赵恒策,魏霞,贺燕,等.冻融对土壤团聚体特征以及可蚀性K值的影响[J].水土保持研究,2019,26(5):1-6.
- [30] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1):1-8.
- [31] 牛浩,罗万清,王晋峰,等.冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响[J].土壤通报,2020,51(4):841-847.
- [32] 肖东辉,冯文杰,张泽.冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J].冰川冻土,2014,36(4):147-152.
- [33] 文晶,王一博,高泽永,等.北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析[J].冰川冻土,2013,35(4):929-937.
- [34] 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.
- [35] 龚家栋,祁旭升,谢忠奎,等.季节性冻融对土壤水分的作用及其在农业生产中的意义[J].冰川冻土,2012,19(4):328-333.
- [36] 王洋,刘景双,王全英.冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1269-1274.
- [37] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(5):977-986.
- [38] 杨梅学,姚檀栋.青藏高原表层土壤的日冻融循环[J].科学通报,2006,51(16):1974-1976.
- [39] 刘绪军,景国臣,杨亚娟,等.冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(1):42-46.
- [40] 李嘉,刘楠,韩进斌,等.冻融对五台山典型林线植被土壤水稳性大团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(5):140-146.
- [41] 王恩姮,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[J].应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.
- [42] Lehrsch G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability[J]. Soil Science, 1998,163(1):63-70.
- [43] Li F C, Jiang R T, Ju L. Influences of tillage operations on soil translocation over sloping land by hoeing tillage[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018,64(3):430-440.
- [44] 缪驰远,刘宝元,刘刚,等.东北典型黑土区剖面粒径分布特征及其可蚀性研究[J].水土保持学报,2008,22(3):18-23.