

# 冻融对土壤团聚体特征以及可蚀性 $K$ 值的影响

赵恒策, 魏霞, 贺燕, 于文竹, 王涛

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘 要:**为明确冻融作用对土壤团聚体特征的影响,并探讨冻融破坏机理下土壤可蚀性变化,以河北省深州市土壤为研究对象,分析研究了 0—10, 10—20 cm 深度土壤水稳性团聚体中各粒径团聚体含量、0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA、团聚体平均质量直径 MWD、团聚体几何平均直径 GMD、分形维数  $D$  和可蚀性  $K$  值之间变化。结果表明:含水量是影响土壤水稳性团聚体含量的直接因素之一;冻融作用使大团聚体破解、分离,导致团粒结构比例失调,土层自上而下团粒呈逐渐细化状态;分形维数  $D$  表明 2~1 mm 粒径团聚体含量对 0—20 cm 深度土壤稳定性起关键因素;可蚀性  $K$  值表明,冻融作用降低了土壤抗侵蚀能力,沿土层深度方向,土壤可蚀性  $K$  值逐渐增加,抗侵蚀能力逐渐降低。冻融作用使团聚体破碎,土壤可蚀性增加。本研究为冻融作用机理下土壤侵蚀预报提供科学参考。

**关键词:**冻融作用;水稳性团聚体;分形维数  $D$ ;可蚀性  $K$  值

中图分类号:S152.4; S158.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0001-06

## Effects of Freeze-Thaw on Soil Aggregate Characteristics and Erodibility Factor $K$

ZHAO Hengce, WEI Xia, HE Yan, YU Wenzhu, WANG Tao

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of freeze-thaw on soil aggregate characteristics, and to explore the changes of soil erodibility under freeze-thaw damage mechanism, the soil in Shenzhou, Hebei province was selected as the research sample. We analyzed the changes of the contents of aggregates, 0.25 mm water stability aggregate content, mean weight diameter, geometric mean diameter, fractal dimensions  $D$  of the aggregates and soil erodibility factor  $K$  in the soil water-stable aggregates of 0—10 cm and 10—20 cm depths. Soil moisture content is one of the direct factors which influence the content of aggregates; the freeze-thaw action cracked and separated the aggregate, resulting in the imbalance of the structure of aggregate and thus caused soil layers to gradually refine with increase of soil depth. Fractal dimension  $D$  indicates that the aggregate content of 2~1 mm diameter is a critical factor on the soil stability in 0—20 cm depth. The erodibility factor  $K$  shows that the freeze-thaw action reduces the soil erosion resistance. Along the direction of soil depth, the  $K$  value of soil erodibility gradually increases and the erosion resistance gradually decreases. The freeze-thaw effect breaks the soil aggregate and increases the erodibility. This study can provide scientific reference for the prediction of soil erosion under the influence of freeze-thaw action.

**Keywords:** freeze-thaw action; water-stable aggregate; fractal dimension  $D$ ; erodibility factor  $K$

冻融是指日、年和多年发生在高海拔、中高纬度或温带地区的气候变化现象,可导致特定气候区域地球表层一定范围内的环境介质冻结和融化<sup>[1]</sup>。随全球气候变暖,冻融对人类生存与发展的影响已逐渐凸显并引起人们广泛关注<sup>[2]</sup>。在我国 75% 以上的国土

面积都会发生冻融,冻融现象已是北方地区重要的气候特征<sup>[3]</sup>。

土壤团聚体作为重要土壤物理参数之一<sup>[4]</sup>,是土壤养分的储存库<sup>[5]</sup>,是衡量土壤健康程度与土壤质量的重要指标<sup>[6]</sup>。土壤团聚体对完善土壤功能、改善土壤的理

收稿日期:2018-11-24

修回日期:2018-12-08

资助项目:兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金(lzujbky-2018-kb01);国家自然科学基金(41001154);中国博士后科学资助项目(20110490862);中央高校基本科研业务费专项资金资助(lzujbky-2015-149)

第一作者:赵恒策(1992—),男,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:zhaohc16@lzu.edu.cn

通信作者:魏霞(1980—),女,陕西扶风人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等方面的研究。E-mail:weix@lzu.edu.cn

化环境也具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。团聚体作为土壤结构的基本单元,易受到人类活动和自然因素的影响<sup>[9]</sup>。在天然状态下,交替冻融会对土壤产生不稳定效应,影响土壤团聚体结构稳定性,进而改变土壤团粒结构的颗粒组成<sup>[10]</sup>。土壤结构的稳定性是根据土壤抵御外界破碎营力的大小而定,包括土壤机械稳定性和土壤团聚体的水稳定性<sup>[11]</sup>。土壤团聚体水稳定性在一定程度上影响着土壤抗侵蚀能力,通过提高土壤团聚体的水稳定性和团聚体的数量、质量可以增加土壤抗侵蚀能力<sup>[12]</sup>。因此,土壤团聚体是土壤可蚀性评价的重要因子之一<sup>[13]</sup>。土壤可蚀性是土壤性质的一个重要方面;是评价土壤是否易受侵蚀营力破坏的性能;是土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性<sup>[14]</sup>;是影响土壤侵蚀量的内在因素;是定量研究土壤侵蚀的基础<sup>[15]</sup>。因此,土壤可蚀性研究是土壤侵蚀研究中的一个重要的内容<sup>[16]</sup>。目前,国内外学者针对不同植被类型、不同土地利用方式下土壤团聚体的稳定性特征、差异方面以及土壤可蚀性进行了大量的研究<sup>[17-20]</sup>,但有关天然状态下冻融作用对土壤水稳性团聚体粒径和土壤可蚀性的研究开展较少。

本研究以天然状态下冬季冻融与秋季未冻融土壤互为对照,探讨冻融作用对土壤水稳性团聚体的影响,分析了各粒径水稳性团聚体含量分布、0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA、团聚体平均质量直径 MWD、几何平均直径 GMD 和分形维数  $D$  以及土壤可蚀性  $K$  值变化趋势。旨在分析天然状态下交替冻融对土壤水稳性团聚体粒径以及土壤可蚀性的影响,以期冻融条件下的土壤侵蚀预报提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区位于河北省深州市大冯营乡(115°45'14"E, 38°1'43"N),地处河北平原东南部,气候属温带大陆性季风气候,光照充足,雨热同期。年平均温度在 13.4℃左右,年平均降雨量约为 481.7 mm,无霜期 195 d,年均蒸发量 1 242 mm。深州市属于浅层季节冻土区,冻融期发生日冻融循环,土壤在 12 月中旬开始,3 月中旬结束,冻融循环历时 90 多天。深州市北部的土壤,主要由滹沱河冲积物形成,多为砂壤土。

### 1.2 样品采集与分析

于 2017 年 1 月 23 日至 2 月 16 日冬季土壤冻融期间和 10 月 6 日秋季未冻融期间进行土样采集,具体取样时间为 1 月 23 日,1 月 26 日,1 月 29 日,2 月 1 日,2 月 4 日,2 月 7 日,2 月 10 日,2 月 13 日,2 月 16 日和 10 月 6 日。其中,1 月 23 日—2 月 16 日为

冻融试验组,于上午 9:00—11:00 进行取样,室外温度 0~8℃,夜间温度范围 -8~-2℃。10 月 6 日为对照组,于上午 9:00—10:00 进行取样,室外温度约为 19℃,夜间温度约为 12℃。采样点土地利用类型为耕地,种植作物玉米已在秋季收获,土壤表层无秸秆覆盖,采样期间无积雪覆盖。在同一坡度、坡向的地段上设置代表性土壤剖面,其剖面分为 2 个深度(0—10,10—20 cm),每个深度取 2 个重复。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定。湿筛法使用团聚体分析仪,其测定流程:先称取过 6 mm 筛孔的风干土样 25 g,将土样平铺于土壤团聚体分析仪的套筛中(孔径依次为 4, 2, 1, 0.25, 0.038 mm),用水浸没 10 min,之后以 30 次/min 频率上下震动 10 min。筛分结束后,烘干称重记为  $W_x$ 。将各级筛中土样洗入到 5 mol/L 六偏磷酸钠溶液铝盒中,放入恒温摇床振荡 12 h,再把土样置于相同孔径筛子过滤、烘干并称重,记为  $W_y$ 。

各个粒径团聚体重量  $W_z$  由公式(1)获得:

$$W_z = W_x - W_y \quad (1)$$

$W_i$  为  $i$  粒径团聚体重量所占的比例,由公式(2)获得:

$$W_i = \frac{W_z}{25} \times 100\% \quad (2)$$

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:

$$WSA = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{r<0.25}}{M_T} \quad (3)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{x_i} w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \overline{x_i}}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (5)$$

分形维数  $D$  的计算采用杨培岭<sup>[21]</sup>推导的公式:

$$\frac{M(r < \overline{x_i})}{M_T} = \left[ \frac{\overline{x_i}}{\overline{x_{\max}}} \right]^{3-D} \quad (6)$$

对式中:两边取对数,可得:

$$\lg \left[ \frac{M(r < \overline{R_i})}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left[ \frac{\overline{R_i}}{\overline{R_{\max}}} \right] \quad (7)$$

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总和; $\overline{x_i}$  为土壤某粒径的平均直径; $M(r < \overline{R_i})$  为粒径小于  $\overline{R_i}$  的团聚体质量; $\overline{R_i}$  为某级团聚体的平均直径; $\overline{R_{\max}}$  为最大粒径团聚体平均直径;利用公式(7)对试验数据进行数学拟合,即可

求得团聚体分形维数  $D$ 。

Shiriza M.A.and Boerama L<sup>[22]</sup> 建议土壤无充分资料的情况下,采用公式(8) 计算土壤可蚀性  $K$  值,公式如下:

$$K=7.954 \times \{0.0017+0.0494 \times \exp[-0.5 \times (\frac{\lg \text{GMD}+1.675}{0.6986})^2]\} \quad (8)$$

### 1.3 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理;采用 IBM SPSS Statistics 19 对土壤含水量和团聚体性质进行相关性分析,利用 Pearson 相关系数评价各指标间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻融期间 0—20 cm 深度土壤各粒径团粒变化

冻融期间,土壤各粒径团聚体含量均发生改变(图 1)。0—10 cm 深度土壤,6~4 mm 粒径团聚体含量范围为 0.00%~1.75%,平均值为 0.29%;4~2 mm 粒径团聚体含量范围为 1.68%~7.77%,平均值为 3.70%;2~1

mm 粒径团聚体含量范围为 2.05%~4.91%,平均值为 3.55%;1~0.25 mm 粒径团聚体含量范围为 4.68%~18.12%,平均值为 11.52%;0.25~0.038 mm 粒径团聚体含量范围为 3.15%~7.01%,平均值为 5.90% (图 1A)。可以看出,冻融期间 0—10 cm 深度土壤团聚体多集中在 2~0.038 mm 粒径之间,6~4 mm 粒径团聚体所占整体比例相对较少。10—20 cm 深度土壤中,6~4 mm 粒径团聚体含量范围为 0.00%~0.25%,平均值为 0.05%;4~2 mm 粒径团聚体含量范围为 0.44%~2.21%,平均值为 1.20%;2~1 mm 粒径团聚体含量范围为 0.32%~3.56%,平均值为 1.50%;1~0.25 mm 粒径团聚体含量范围为 3.12%~11.93%,平均值为 7.42%;0.25~0.038 mm 粒径团聚体含量范围为 4.16%~8.63%,平均值为 6.48% (图 1B)。可以得出,10—20 cm 深度土壤各粒级团聚体含量相对较少,其中 6~2 mm 粒径团聚体含量极少,<1 mm 粒径团聚体所占比例相对较多,这主要是因为冻融对土壤团聚体产生破解作用,造成土壤大团粒结构分布较少,而小粒级团粒含量分布较多。

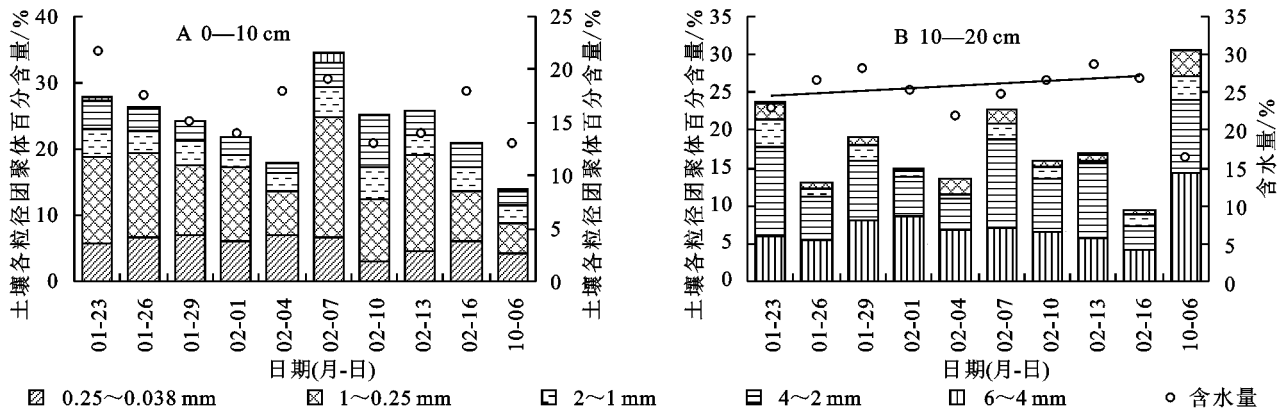


图 1 0—20 cm 土层深度土壤各粒径团聚体以及含水量分布

### 2.2 土壤含水量与团粒之间关系

通过对土壤各粒级团聚体含量与含水量之间相关分析(表 1),其结果表明:0—10 cm 深度土壤含水量与总团聚体含量无显著性相关,与各粒径团聚体含量无显著性相关。10—20 cm 深度土壤含水量与总团聚体含量呈显著负相关( $R=-0.67$ ),与 4~2 mm 粒径团聚体含量呈极显著相关( $R=-0.90$ ),与 0.25~0.038 mm 粒径团聚体呈显著负相关( $R=-0.74$ )。由图 1A 和表 1 可以得出,10—20 cm 深度土壤中随水分的增加,其团聚体含量逐渐减小。说明土壤水分是影响团聚体含量的因素之一。冻融作用通过影响水分的相态变化进而影响土壤团聚体的含量,其表现为含水量越高,冻融作用越明显,水分相变越剧烈,其团聚体含量越低。相较于未冻融土壤,10—20 cm 深度土壤团聚体含量明显低于未冻融团聚体含量,这主要是因

为在冻融作用的影响下,土壤中水分相态变化剧烈,造成团聚体结构崩解破碎,说明冬季冻融对土壤团聚体产生破解作用,使得团聚体破碎分离为细小颗粒,从而降低了土壤中团聚体的含量。

### 2.3 土壤各粒径团聚体含量与 WSA, MWD, GMD 变化

0—10 cm 深度土壤 0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA 与 4~2 mm 粒径团聚体呈极显著正相关( $p<0.01$ ),随 4~2 mm 粒径团聚体含量的增加 WSA 呈增加趋势(图 2A)。表明在 0—10 cm 深度,土壤大团聚体主要集中在 4~2 mm 粒径之间,并对 WSA 起主导作用;土壤平均质量直径 MWD、几何平均直径 GMD 随 4~2 mm,2~1 mm 粒径团聚体含量的增加呈增长趋势,且呈显著正相关(图 2B,C);MWD 和 GMD 随 0.25~0.038 mm 粒径团聚体含量的增加呈降低趋势,二者呈极显著

负相关( $p<0.01$ )(图 2D)。通过对 0—10 cm 深度土壤中平均质量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 分析,土

壤大团粒结构中 4~1 mm 团聚体含量占主导因素,小团粒结构中 0.25~0.038 mm 粒径团聚体占主要因素。

表 1 0—20 cm 深度各粒径团聚体含量相关系数矩阵

| 参数            | 含水量    | 6~4<br>mm | 4~2<br>mm | 2~1<br>mm | 1~0.25<br>mm | 0.25~0.038<br>mm | 总团聚体<br>含量 | K 值      |
|---------------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------|------------|----------|
| 含水量           | 1      | 0.47B     | -0.90B**  | -0.55B    | -0.21B       | -0.74B*          | -0.67B*    | 0.33B    |
| 6~4 mm        | 0.47A  | 1         | 0.14B     | 0.36B     | 0.52B        | -0.29B           | 0.23B      | -0.62B   |
| 4~2 mm        | -0.09A | 0.07A     | 1         | 0.66B*    | 0.50B        | 0.63B            | 0.78B*     | -0.63B*  |
| 2~1 mm        | 0.31A  | 0.53A     | 0.79A**   | 1         | 0.06B        | 0.40B            | 0.77B*     | -0.78B** |
| 1~0.25 mm     | 0.36A  | 0.70A*    | 0.18A     | 0.39A     | 1            | 0.29B            | 0.82B*     | -0.68B*  |
| 0.25~0.038 mm | 0.60A  | 0.20A     | -0.57A    | -0.25A    | 0.23A        | 1                | 0.75B*     | -0.04B   |
| 总团聚体含量        | 0.46A  | 0.74A*    | 0.41A     | 0.66A*    | 0.94A**      | 0.21A            | 1          | -0.58B   |
| K 值           | 0.23A  | -0.23A    | -0.82A**  | -0.69A*   | -0.28A       | 0.75A*           | -0.40A     | 1        |

注:A 组数据表示 0—10 cm,B 组数据表示 10—20 cm; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

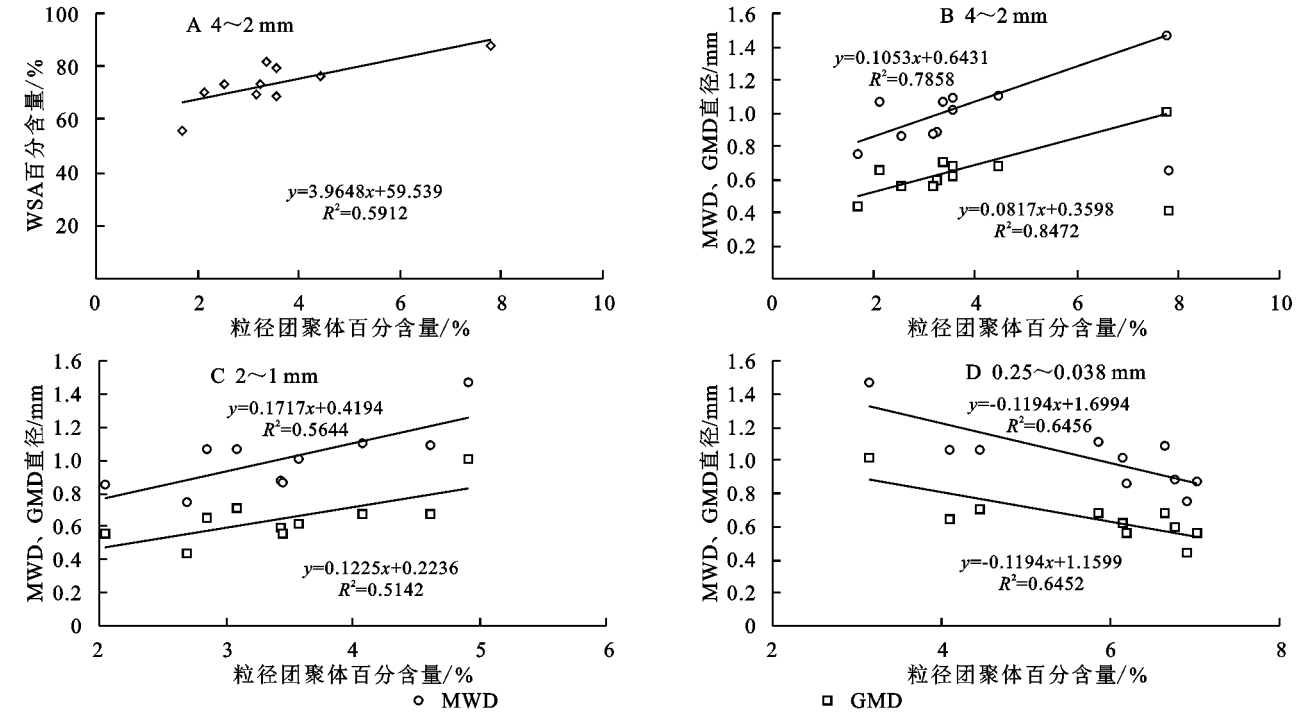


图 2 0—10 cm 深度土壤各粒径团聚体含量与 WSA,MWD,GMD 的关系

10—20 cm 深度土壤 WSA 与 1~0.25 mm 粒径团聚体呈极显著正相关( $p<0.01$ )(图 3A)。随 1~0.25 mm 粒径团聚体的增加 WSA 呈增长趋势,说明 1~0.25 mm 粒径团聚体含量对 WSA 含量起主导因素,虽然 6~4 mm 粒径大团聚体含量与 WSA 也呈显著正相关,但整体所占比例较少,其影响也相对较小。相比图 2A,0—10 cm 深度土壤 4~2 mm 粒径团聚体含量对 WSA 起主导因素,可以看出 0—10 cm 深度土壤大、中团聚体比例居多,10—20 cm 深度土壤小团聚体比例居多,在一定程度上也可以说明冻融使土壤团聚体结构比例失调,造成大团聚体结构呈逐渐细化的状态。MWD 与 4~2 mm 粒径团聚体呈极显著正相关( $p<0.01$ )(图 3B)。随 4~2 mm 粒径团聚体含量增加 MWD 呈现增加趋势,说明 4~2 mm 粒径团

聚体含量对 MWD 含量占主导因素。MWD,GMD 与 2~1 mm 粒径团聚体呈显著正相关( $p<0.05$ )(图 3C)。随 2~1 mm 粒径团聚体含量增加 MWD 与 GMD 均呈增加趋势。GMD 与 1~0.25 mm 粒径团聚体呈显著正相关( $p<0.05$ )(图 3D)。随 1~0.25 mm 粒径团聚体含量的增加 GMD 含量呈增加趋势。通过对 10—20 cm 深度土壤平均质量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 分析,可以发现土壤团粒结构中,2~1 mm 团聚体含量占主导因素。

2.4 土壤分形维数 D 与可蚀性 K 值的变化

土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,可以反映土壤的质地、均一程度、物理性状以及肥力特性,并揭示其变化规律性<sup>[23]</sup>。土壤中团粒结构粒径分布的分形维数反映大团聚体含量对土壤结构与



稳定性的影响趋势,即土壤质地越细,分形维数越高,土壤稳定性越差<sup>[24]</sup>。在表 2 中,0—10 cm 深度土壤分形维数  $D$  与 4~2 mm 粒径团聚体呈极显著负相关( $p<0.01$ ),与 2~1,0.25~0.038 mm 粒径团聚体显著相关( $p<0.05$ )与其他粒径团粒含量无显著相关性;10—20 cm 深度土壤分形维数  $D$  与 1~0.25 mm 粒径团聚体呈极显著负相关( $p<0.01$ ),与 6~4,2~1 mm 粒

径团聚体相关呈显著负相关( $p<0.05$ )。综上所述,0—10,10—20 cm 深度土壤分形维数  $D$  与 1~2 mm 粒径团聚体含量均呈显著负相关,即 2~1 mm 粒径团聚体含量越多,土壤团聚体分形维数越小,其土壤稳定性越好,即 2~1 mm 粒径团聚体含量对分形维数  $D$  起主导因素,说明 2~1 mm 粒径团聚体含量对 0—20 cm 深度土壤起稳定作用。

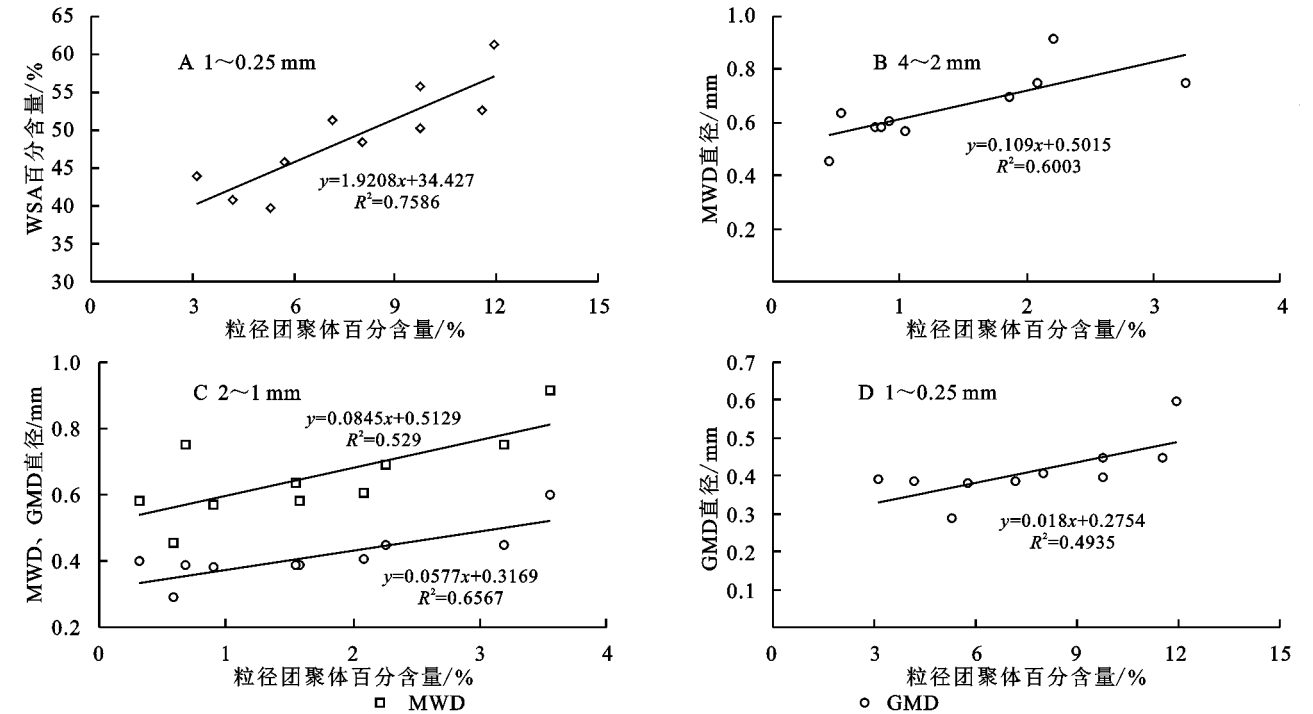


图 3 10—20 cm 深度土壤各粒径团聚体含量与 WSA,MWD,GMD 的关系

表 2 0—20 cm 深度土壤团粒分形维数  $D$  与各粒径团聚体含量  $W_i$  间线性关系

| 粒径/mm      | 0—10 cm                   |           | 10—20 cm                  |            |
|------------|---------------------------|-----------|---------------------------|------------|
|            | 回归模型                      | $R^2$     | 回归模型                      | $R^2$      |
| 6~4        | $D = -0.0324W_1 + 2.5991$ | 0.0349    | $D = -0.7037W_1 + 2.7851$ | -0.4415 *  |
| 4~2        | $D = -0.0477W_2 + 2.7592$ | -0.749 ** | $D = -0.045W_2 + 2.8162$  | 0.214      |
| 2~1        | $D = -0.069W_3 + 2.8302$  | -0.424 *  | $D = -0.0576W_3 + 2.8496$ | -0.5154 *  |
| 1~0.25     | $D = -0.009W_4 + 2.6881$  | 0.153     | $D = -0.0244W_4 + 2.9403$ | -0.7145 ** |
| 0.25~0.038 | $D = 0.0471W_5 + 2.3205$  | 0.468 *   | $D = 0.001W_5 + 2.746$    | 0.001      |

注: \* \* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

土壤可蚀性  $K$  值是土壤抵抗水蚀能力大小的一个相对综合指标, $K$  值越大,土壤抗侵蚀能力越弱。相反, $K$  值越小,土壤抗侵蚀能力越强<sup>[19]</sup>。土壤各粒径水稳性团聚体含量与可蚀性  $K$  值相关分析(表 1),0—10,10—20 cm 深度土壤中 4~2,2~1 mm 粒径团聚体含量与可蚀性  $K$  值均呈显著负相关( $p<0.05$ )。随 4~1 mm 粒径团聚体含量的增加,土壤可蚀性  $K$  值逐渐减小,其土壤抗蚀性能力越强,说明土壤 4~1 mm 粒径团聚体含量是影响土壤可蚀性因素之一。冻融作用对不同深度的土壤影响,10—20 cm 深度土壤可蚀性  $K$  值明显高于 0—10 cm 深度土壤

(图 4)。其原因是冻融作用的影响,10—20 cm 深度土壤抗侵蚀能力较弱,而 0—10 cm 深度土壤抗侵蚀能力较强,说明沿纵深方向,土壤的抗侵蚀能力逐渐降低。在天然冻融情况下土壤可蚀性  $K$  值分两个阶段,在 1 月中,可蚀性  $K$  值呈增加变化,其土壤抗蚀性减弱;在 2 月中,可蚀性  $K$  值呈降低变化,土壤抗蚀性增加。其原因是 2 月以后,气温回升,尤其表层土壤受冻融作用的影响明显减弱,土壤团聚作用增加,随之土壤抗蚀性逐渐增大。整体而言,0—10 cm 深度土壤可蚀性  $K$  均值为 0.056 8,未冻融土壤可蚀性  $K$  均值为 0.054 2,二者之间相差 0.002 6;10—20 cm 深度土壤可蚀性  $K$  均值

为0.087 9,未冻融土壤可蚀性  $K$  均值为0.078 2,二者之间相差0.009 7。可见,相较于未冻融土壤,冬季冻融期间可蚀性  $K$  值较高,抗侵蚀能力较弱。综上所述,冻融作用减弱了土壤抗侵蚀能力,并且其抗侵蚀能力沿深度方向逐渐降低。

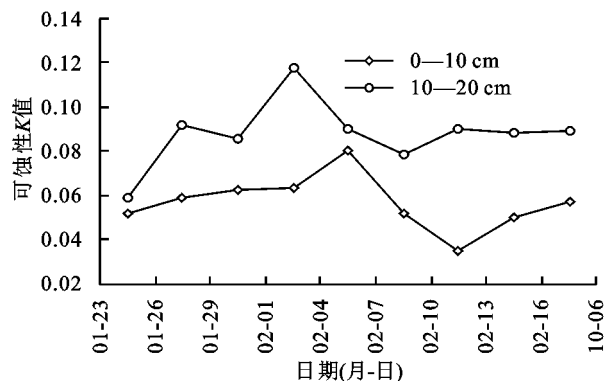


图4 土壤可蚀性  $K$  值变化

### 3 结论与讨论

(1) 冻融期间0—10 cm深度土壤的各粒径团聚体含量高于10—20 cm深度土壤,原因主要是表层土壤裸露于地表,有机物和无机物更容易与表层土壤颗粒胶结从而形成团粒,其各粒径团聚体含量较多;而较深层土壤由于受冻融作用影响,其各粒径团聚体含量较低。对于0—10 cm深度土壤冻融期间团聚体含量高于未冻融土壤,原因可能是秋季多雨且表层土壤团粒结构疏松多孔,在雨水打击等作用下受到破坏,土壤团聚体破碎产生更小的可移动颗粒,不仅易在土壤表层形成土壤结壳<sup>[11]</sup>,土壤的团聚作用降低,其团聚体含量减少。在土壤含水量与团聚体的相关分析中表明,由于0—10 cm深度土壤中的水分受到蒸散发因素干扰,故无显著相关性。10—20 cm深度土壤受冻融作用的影响,土壤含水量与4~2,0.25~0.038 mm和总团聚体含量均呈显著负相关。在王展等<sup>[9]</sup>的研究中表明,土壤含水量与供试土壤各级团聚体含量均达到显著水平,与本研究结果相似。Oztas等<sup>[25]</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。本文研究表明,冬季天然状态下冻融对土壤团聚体起到破解作用,使得团聚体破碎分离为细小颗粒,从而降低了土壤中团聚体的含量。

(2) 土壤各粒径团聚体含量与0.25 mm水稳性团聚体含量WSA、平均质量直径MWD和几何平均直径GMD的相关分析表明,随土层深度的逐渐增加,冻融作用使大团粒结构呈逐渐细化的状态。0—20 cm深度土壤各粒径团聚体对MWD和GMD的影响研究显示,0—10 cm土壤中,4~1,0.25~0.038 mm粒径团聚体含量占主导因素,说明0—10 cm深度土壤团粒分布较为

均匀;10—20 cm土壤中2~1 mm粒径团聚体含量占主要因素,说明冻融作用使10—20 cm深度土壤团聚体结构比例失调,其粒级分布较为单一。

(3) 0—10,10—20 cm深度土壤分形维数  $D$  与2~1 mm粒径团聚体含量均呈显著负相关( $p < 0.05$ ),即2~1 mm粒径团聚体含量越多,水稳性团聚体分形维数越小,土壤结构越稳定,说明2~1 mm粒径团聚体含量对0—20 cm深度土壤稳定性起关键因素。本文中通过对0—10,10—20 cm深度土壤可蚀性  $K$  值的分析表明,冻融减弱土壤抗侵蚀能力,在纵深方向上,土壤可蚀性  $K$  值逐渐增加,其抗侵蚀能力呈逐渐降低的趋势。在缪驰远<sup>[26]</sup>等研究东北典型黑土坡面特征和可蚀性研究中表明,不同土壤剖面土壤可蚀性因子  $K$  值均表现出随土层深度增加而呈现增大的趋势。

#### 参考文献:

- [1] Hobbie S E, Iii F S C. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics [J]. Biogeochemistry, 1996, 35(2): 327-338.
- [2] 魏霞,丁永建,李勋贵.冻融侵蚀研究的回顾与展望[J].水土保持研究,2012,19(2): 271-275.
- [3] 王娇月,宋长春,王宪伟,等.冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J].冰川冻土,2011,33(2): 442-452.
- [4] 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.
- [5] 安韶山,张扬,郑粉莉.黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J].中国水土保持科学,2008,1(2): 66-70.
- [6] 孙辉,秦纪洪,吴杨.土壤冻融交替生态效应研究进展[J].土壤,2008,40(4): 505-509.
- [7] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等.植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J].生态学报,2008,28(2): 702-709.
- [8] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等.土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J].中国水土保持科学,2011,09(3): 106-113.
- [9] 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.
- [10] Joseph G, Hal H. Soil nitrogen leaching losses in response to freeze-thaw cycles and pulsed warming in a temperate old field[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(7): 1947-1953.
- [11] 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,2004,41(4): 618-623.
- [12] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,11(1): 46-50.
- [13] 徐灿.基于分形维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.

- bon, phosphorus, and potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(5):647-654.
- [9] Zhang J H, Ni S J, Su Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(2):165-176.
- [10] Zhang J H, Li F C, Wang Y, et al. Soil organic carbon stock and distribution in cultivated land converted to grassland in a subtropical region of China[J]. *Environmental Management*, 2014, 53(2):274-283.
- [11] De Alba S, Borselli L, Torri D, et al. Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany(Italy) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85(1/2):123-142.
- [12] Zhang J H, Jia L Z, Zhang Z H, et al. Effect of the soil-implement contact area on soil translocation under hoeing tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 183:42-50.
- [13] 李富程,花小叶,王彬.紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀特征[J].*中国水土保持科学*, 2016, 14(1):71-78.
- [14] 李富程,花小叶,黄强.耕作深度对紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的影响[J].*水土保持研究*, 2016, 23(4):1-5.
- [15] 李富程,花小叶,江仁涛,等.紫色土坡地土壤性质对耕作侵蚀的影响[J].*水土保持通报*, 2016, 36(4):152-157.
- [16] 李富程,花小叶,赵丽,等.紫色土坡地犁耕方向对耕作侵蚀的影响[J].*水土保持学报*, 2015, 29(6):35-40.
- [17] 李富程,江仁涛,花小叶.等高犁耕朝向对紫色土坡面土壤再分布的影响[J].*水土保持研究*, 2016, 23(3):106-111.
- [18] Xu H C, Jia L Z, Zhang J H, et al. Combined effects of tillage direction and slope gradient on soil translocation by hoeing[J]. *Catena*, 2019, 175:421-429.
- [19] Li F C, Jiang R T, Ju Li. 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.
- [20] Zhang J H, Wang Y, Jia L Z, et al. An interaction between vertical and lateral movements of soil constituents by tillage in a steep-slope landscape[J]. *Catena*, 2017, 152:292-298.
- [21] Wang Z L, Shao M A, Li Y. Study on the soil redistribution induced by tillage erosion in loess region of China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):168-172.

~~~~~

(上接第 6 页)

- [14] Bouyoucos G J. Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1935(9):738-741.
- [15] 姜小三,潘剑君,杨林章,等.土壤可蚀性  $K$  值的计算和  $K$  值图的制作方法研究:以南京市方便水库小流域为例[J].*土壤*, 2004, 36(2):177-180.
- [16] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究述评[J].*干旱区地理*, 2006, 29(1):124-131.
- [17] 徐俏,崔东,王兴磊,等.冻融对伊犁草地土壤水稳性大团聚体的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2017, 35(6):244-251.
- [18] 张海欧,解建仓,南海鹏,等.冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J].*水土保持学报*, 2016, 30(3):273-278.
- [19] 曾全超,李娅芸,刘雷,等.黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J].*草地学报*, 2014, 22(4):743-749.
- [20] 孙娇.黄土丘陵区植被恢复下土壤团聚体稳定性及其化学计量特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [21] 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.
- [22] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1):142-147.
- [23] 周萍,刘国彬,候喜禄,黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J].*中国水土保持科学*, 2008, 6(2):75-82.
- [24] 宁丽丹,石辉,周海军,等.岷江上游不同植被下土壤团聚体特征分析[J].*应用生态学报*, 2005, 16(8):1405-1410.
- [25] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. *Catena*, 2003, 52(1):1-8.
- [26] 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.