

# 东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析

冯晓彤, 翟车宇, 刘昌杰, 张娟, 孟庆峰\*

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:**“漫川漫岗”是东北黑土区典型地貌,其典型黑土土壤结构受径流、冻融等作用影响。为探明东北黑土坡耕地土壤团聚体分布特征,选取坡耕地的坡下、坡中、坡上位置采集土壤样品,测定不同坡位下水稳性团聚体粒径分布、稳定性指标及土壤性质,分析水稳性大团聚体与土壤pH、有机质、钙镁比关系及稳定性指标与团聚体粒径关系。结果表明,不同坡位下水稳性团聚体粒径分布均表现为<0.25 mm团聚体含量占比最高,>2 mm团聚体含量占比最少。<0.25 mm团聚体表现为坡下位显著高于坡中位及坡上位( $P<0.05$ ),0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、>2 mm团聚体均表现为坡上位显著高于坡下位( $P<0.05$ )。平均重量直径和几何平均直径均表现为坡上>坡中>坡下,其中坡下位与坡上位、坡中位存在显著差异( $P<0.05$ ),团聚体水稳性表现为坡上>坡中>坡下。平均重量直径、几何平均直径均表现为与>0.25 mm团聚体呈正相关,与<0.25 mm团聚体呈负相关,其中受>2 mm团聚体影响最大( $P<0.01$ )。有机质、pH、钙镁比均与>0.25 mm团聚体呈正相关关系( $P<0.05$ )。因此,典型黑土坡耕地较高的有机质含量、pH、钙镁比有利于土壤团聚,促进>0.25 mm团聚体形成,提高团聚体水稳性。

**关键词:**水稳性大团聚体;坡耕地;平均重量直径;几何平均直径;黑土

**中图分类号:** S155.2<sup>+</sup>7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-9369(2024)01-0043-07

冯晓彤, 翟车宇, 刘昌杰, 等. 东北典型黑土坡耕地不同坡位土壤团聚体特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(1): 43-49.  
DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2024.01.005.

Feng Xiaotong, Zhai Cheyu, Liu Changjie, et al. Analysis of characteristics of soil aggregates at different slope positions of typical black soil sloping farmland in Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(1): 43-49. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2024.01.005.

Analysis of characteristics of soil aggregates at different slope positions of typical black soil sloping farmland in Northeast China/FENG Xiaotong, ZHAI Cheyu, LIU Changjie, ZHANG Juan, MENG Qingfeng(School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** "Manchuan Mangang" is a typical landform in the black soil area of Northeast China, and its typical black soil structure is seriously affected by runoff, freeze-thaw and other effects. In order to explore the distribution characteristics of soil aggregates in black soil sloping farmland in Northeast China, soil samples were collected from bottom slope position, middle slope position and top slope position. Water stable aggregates particle size distribution, stability index and soil properties under different slope positions were investigated. The relationship among water stable macroaggregate, soil pH, organic matter and calcium-magnesium ratio, and the relationship between stability index and

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2022YFD1500104-2)

作者简介: 冯晓彤(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤退化及其环境效应。E-mail: fengxiaotong2023@163.com

\*通信作者: 孟庆峰, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土壤退化及其环境效应。E-mail: qfengmeng@yeah.net

aggregate particle size were analyzed. The results showed that the water stable aggregates particle size under different slope positions all dominated by <0.25 mm aggregate and the aggregate content of >2 mm accounts for the least. Aggregates with the size of <0.25 mm are significantly higher in the bottom slope than in the middle and top slope ( $P<0.05$ ), and aggregates with the size of 0.25-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-2 mm and >2 mm were significantly higher in the top slope than in the bottom slope ( $P<0.05$ ). The average weight diameter and geometric average diameter were top slope > middle slope > bottom slope, among which the bottom-position of the slope was significantly different from the top position and the middle position of the slope ( $P<0.05$ ), and the water stability of aggregates was top slope > middle slope > bottom slope. Average weight diameter and geometric average diameter were positively correlated with >0.25 mm aggregates and negatively correlated with <0.25 mm aggregates, among which >2 mm aggregates were the most affected ( $P<0.01$ ). Soil organic matter, pH and calcium-magnesium ratio were positively corrected with >0.25 mm aggregates ( $P<0.05$ ). Therefore, the high organic matter content was conducive to the formation of >0.25 mm aggregates on typical black soil sloping farmland, improving the water stability of aggregates.

**Key words:** water stable macroaggregate; sloping farmland; mean weight diameter; geometric mean diameter; black soil

土壤团聚体是土壤结构基本单元,也是土壤肥力物质基础<sup>[1]</sup>。土壤团聚体稳定性对土壤持水性、通透性、肥力、孔隙等具有重要影响<sup>[2]</sup>。目前,关于团聚体稳定性研究主要包括机械稳定性和水稳性,许多学者将土壤团聚体水稳性作为评价土壤可蚀性的重要指标<sup>[3-5]</sup>。Peng等表明土壤结构质量与团聚体粒级密切相关,>0.25 mm团聚体含量越高,土壤团聚体稳定性越高<sup>[6]</sup>。此外,平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)被广泛用于评价土壤团聚体稳定性,MWD、GMD含量越高,土壤团聚性越好,团聚体稳定性越强<sup>[7-8]</sup>。李禹江等研究表明,土壤团聚体稳定性受多种因素影响,如成土母质、有机质、气候条件、耕作方式、生物活动、地形因子等<sup>[9]</sup>。

东北黑土区是我国重要粮食基地<sup>[10]</sup>,其地形多为波浪起伏的漫川漫岗及台地低丘<sup>[11-12]</sup>,坡度为 $1^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ,坡长为500~2 000 m,最长可达4 000 m,具有坡缓坡长的特征<sup>[13]</sup>。随着开垦年限增加,由于自然因素及不合理利用,东北典型黑土区土壤退化问题严重,主要表现为土壤侵蚀、土壤肥力下降、土壤结构恶化<sup>[14]</sup>。水土流失主要来源于 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡耕地<sup>[15]</sup>,坡耕地水土流失是限制黑土区农业可持续发展的主要因素<sup>[16-17]</sup>。为探明黑土坡耕地水土流失内在规律,目前已有许多关于黑土坡耕地团聚

体研究,但大多为探究坡度、土层、开垦年限、耕作方式对团聚体水稳性的影响。东北黑土区坡耕地上不同坡位下团聚体水稳性研究较少。因此,本研究应用湿筛法对坡耕地不同坡位下土壤水稳性团聚体进行分析,探究不同坡位下,团聚体粒径分布及水稳性规律,以期为东北典型黑土坡耕地因地制宜、合理利用提供理论基础,为农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市东北农业大学实验与实习示范中心向阳基地( $45^{\circ}46'14.27''N$ ,  $126^{\circ}54'8.68''E$ ,海拔184 m),该地区属温带大陆性季风气候,年均气温 $4^{\circ}C$ ,年均降水量618.2 mm,降水集中于7~9月,无霜期135 d,年均日照2 500 h,为典型雨养农业。土壤类型为典型黑土,土壤质地为粉壤土(砂粒5.3%,粉粒66.5%,黏粒28.2%),试验地坡度约为 $10^{\circ}$ ,为漫川漫岗地势。

### 1.2 种植方式与土壤样品采集

试验选取坡长150 m,  $<10^{\circ}$ 坡耕地为研究对象,将坡面按照坡长平均划分为3个采样区域,距坡顶最近部分依次为坡上位、坡中位、坡下位。试验自2020年开始,顺坡起垄,玉米连作。为便

于研究不同坡位土壤团聚体, 本试验未施加肥料。

2021年5月初, 用铁铲在不同坡位采集0~20 cm原状土壤样品, 装入袋中并编号, 每个坡位样品采集重复3次。将土样运至实验室后, 将小石块和植物根系沿土块自然裂隙剔除, 放置于通风阴凉处, 自然风干, 将较大土块按其自孔隙轻轻剥为直径<1 cm团块, 按照四分法将一部分原状土装入塑料盒中, 贴签标记, 用于测定土壤团聚体, 剩余土壤样品分别过1 mm和0.25 mm筛, 用于测定土壤有机质、pH、交换性Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>含量。

### 1.3 方法

重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量。土壤pH采用2.5:1水土比, PHS-3C型pH计测定。交换性Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>采用乙酸铵浸提, 原子吸收分光光度法测定。

采用湿筛法测定土壤水稳定性团聚体含量。将套筛(从上至下为2、1、0.5、0.25 mm)放入湿筛桶中, 称取风干土样100 g平铺放在最上层筛面上, 沿筛桶桶壁缓慢倒入去离子水, 使筛子移动至最高位时最上层土样刚好被水淹没, 套筛以30次·min<sup>-1</sup>速度震荡30 min, 将各筛层土样洗入铝盒烘干称重M<sub>i</sub>。

计算各粒级水稳性团聚体含量W<sub>i</sub>:

$$W_i = \frac{M_i}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M<sub>i</sub>为筛后对应第i粒级土壤团聚体质量(g); M为测定团聚体总质量(g)。

计算土壤平均重量直径:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

式中,  $\bar{X}_i$ 为第i粒级土壤团聚体平均直径(mm); W<sub>i</sub>为相对应粒级团聚体占总团聚体质量百分比(%); n为分离出的团聚体份数。

计算土壤几何平均直径:

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad (3)$$

式中,  $\bar{X}_i$ 为第i粒级土壤团聚体平均直径(mm); W<sub>i</sub>为相对应粒级团聚体占总团聚体质量百分比(%); n为分离出的团聚体份数。

### 1.4 数据处理与分析

利用SPSS 21.0统计分析数据, 用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行数据间比较分析, 采用Duncan法测定其差异显著性, 显著水平P<0.05。土壤性质、水稳性团聚体分布及团聚体水稳性指标间关系采用岭回归分析。运用Excel 2016绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳性团聚体分布特征

表1为不同坡位下土壤水稳性团聚体分布。所有粒级均表现为坡下与坡上存在显著性差异(P<0.05)。不同坡位均为<0.25 mm粒级团聚体所占比例最高(均大于62%), 其中坡下为88.72%, 坡中为70.15%, 坡上为62.41%。不同坡位均表现为>2 mm粒级团聚体含量最低(均小于2%), 其中坡下为0.07%, 坡中为0.78%, 坡上为1.89%。0.25~0.5 mm, 0.5~1 mm, 1~2 mm, >2 mm团聚体的含量, 在不同坡位下均表现为坡上>坡中>坡下。

表1 不同坡位水稳定性团聚体分布

Table 1 Distribution of water stable aggregates at different slope positions

坡位 Slope position	不同坡位水稳定性团聚体分布 Distribution of water stable aggregates at different slope positions				
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
坡下 Bottom slope position	0.07±0.05b	1.03±0.65b	4.66±1.53b	5.51±4.20b	88.72±5.98a
坡中 Middle slope position	0.78±0.27ab	5.16±2.32ab	12.33±2.24a	11.58±2.75ab	70.15±5.77b
坡上 Top slope position	1.89±0.93a	6.20±3.11a	16.42±5.19a	13.06±1.61a	62.41±9.17b

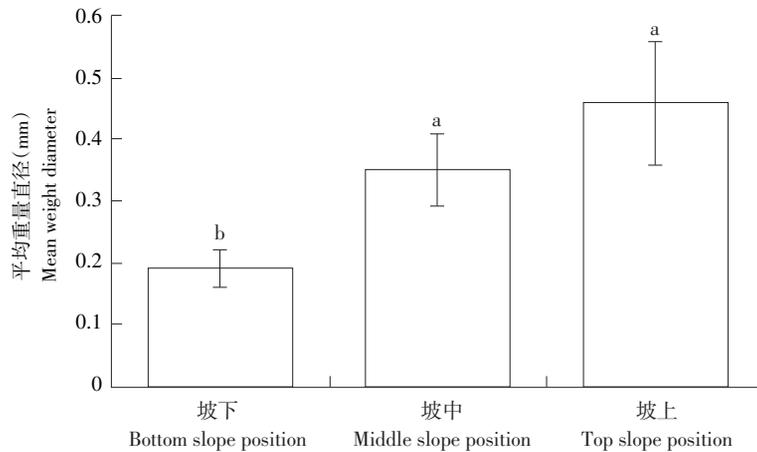
注: 不同小写字母表示同一粒级不同坡位间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at P<0.05 level between different slope positions of the same grain size.

### 2.2 土壤团聚体平均重量直径

图1为不同坡位水稳性团聚体平均重量直径。团聚体MWD表现为MWD坡上>MWD坡中>MWD

坡下。其中坡上MWD值为0.46，坡中MWD值为0.35，坡下MWD值为0.19。坡下团聚体平均重量直径显著低于坡中及坡上( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示水稳性团聚体平均重量直径在不同坡位间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate that the mean weight diameter of water stable aggregates varies significantly among different slope positions ( $P<0.05$ ). The same as below.

图1 不同坡位水稳性团聚体平均重量直径

Fig. 1 Average weight diameter of water stable aggregates at different slope positions

### 2.3 土壤团聚体几何平均直径

图2为不同坡位水稳性团聚体几何平均直径。团聚体GMD表现为GMD坡上>GMD坡中>GMD坡

下。其中坡上GMD值为0.25，坡中GMD值为0.21，坡下GMD值为0.15。坡下团聚体几何平均直径显著低于坡中及坡上( $P<0.05$ )。

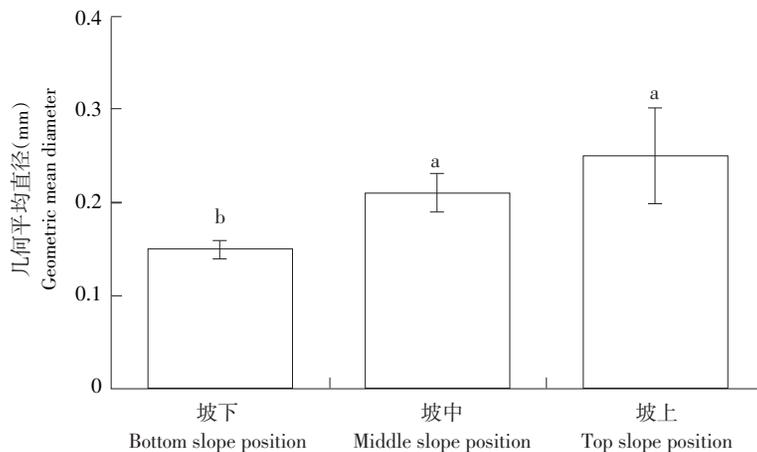


图2 不同坡位水稳性团聚体几何平均直径

Fig. 2 Geometric mean diameter of water stable aggregates at different slope positions

### 2.4 土壤性质

表2为不同坡位土壤有机质、pH、钙镁比。不同坡位土壤有机质差异不显著( $P>0.05$ )。有机质表现为坡中>坡下>坡上，变化范围为32.32~

42.94  $g \cdot kg^{-1}$ 。其中有机质在坡中位含量最高为42.94  $g \cdot kg^{-1}$ ，其次是坡下位为34.28  $g \cdot kg^{-1}$ ，坡上位有机质含量最低为32.32  $g \cdot kg^{-1}$ 。

坡中位pH显著高于坡上位pH( $P<0.05$ )，坡中

位与坡下位 pH 差异小。pH 表现为坡中>坡下>坡上，变化范围为 6.03~6.27。其中 pH 在坡中位最高为 6.27，其次是坡下位为 6.10，坡上位 pH 最低为上，变化范围为 6.03~6.27。其中 pH 在坡中位最高 6.03。

表 2 不同坡位土壤有机质、pH、钙镁比

Table 2 Soil organic matter, pH, Ca/Mg at different slope positions

坡位 Slope position	有机质 Soil organic matter	pH	钙镁比 Ca/Mg
坡下 Bottom slope position	34.28±1.96a	6.10±0.16ab	5.03±0.17a
坡中 Middle slope position	42.94±8.89a	6.27±0.03a	5.31±0.14a
坡上 Top slope position	32.32±6.36a	6.03±0.01b	5.01±0.17a

注：不同小写字母表示土壤有机质、pH、钙镁比在不同坡位间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate that the soil organic matter, pH, Ca/Mg varies significantly among different slope positions ( $P<0.05$ ).

不同坡位土壤钙镁比差异不显著( $P>0.05$ )。钙镁比表现为坡中>坡下>坡上，变化范围为 5.01~5.31。其中交换性钙镁比在坡中位最高为 5.31，其次是坡下位为 5.03，坡上位钙镁比最低为 5.01。

2.5 团聚体、土壤性质及水稳性相关性分析

表 3 为土壤性质与大团聚体关系。如表 3 所示，水稳性大团聚体与有机质呈正相关，有机质含量越高，水稳性大团聚体含量越多( $P<0.05$ )。水稳性大团聚体与 pH 呈正相关，水稳性大团聚体含

量随 pH 增大而增加( $P<0.05$ )。钙镁比越大，土壤水稳性大团聚体含量越高( $P<0.05$ )。

表 4 为平均重量直径、几何平均直径与各粒径关系。如表 4 所示，利用岭回归分析发现 MWD、GMD 均表现为与 >0.25 mm 大团聚体呈正相关，与微团聚体呈负相关，其中受 >2 mm 团聚体影响最大( $P<0.01$ )。MWD 与 >2 mm 团聚体回归系数为 0.04，与 <0.25 mm 团聚体回归系数为 -0.002。GMD 与 2 mm 团聚体回归系数最大，为 0.10。

表 3 土壤性质与大团聚体关系

Table 3 Relationship between soil properties and >0.25 mm water stable aggregates

项目 Item	回归方程 Regression equation
水稳性大团聚体与有机质关系 Relationship between $WSAs_{>0.25}$ and SOM	$y_{WSAs>0.25}=0.684x_{SOM}$
水稳性大团聚体与 pH 关系 Relationship between $WSAs_{>0.25}$ and pH	$y_{WSAs>0.25}=4.277x_{pH}$
水稳性大团聚体与钙镁比关系 Relationship between $WSAs_{>0.25}$ and Ca/Mg	$y_{WSAs>0.25}=5.119x_{Ca/Mg}$

注： $y_{WSAs>0.25}$  为 >0.25 mm 水稳性团聚体； $x_{SOM}$  为土壤有机质； $x_{pH}$  为土壤 pH； $x_{Ca/Mg}$  为钙镁比( $P<0.05$ )。

Note:  $y_{WSAs>0.25}$  means >0.25 mm water stable aggregates;  $x_{SOM}$  means soil organic matter;  $x_{pH}$  means soil pH;  $x_{Ca/Mg}$  means Ca/Mg ( $P<0.05$ ).

表 4 土壤团聚体稳定性与粒径关系

Table 4 Relationship between soil aggregates stability and particle size of soil aggregates

项目 Item	回归方程 Regression equation
平均重量直径与团聚体粒径关系 Relationship between MWD and aggregate size	$y_1=0.317+0.040x_1+0.010x_2+0.004x_3+0.003x_4-0.002x_5$
几何平均直径与团聚体粒径关系 Relationship between GMD and aggregate size	$y_2=0.202+0.100x_1+0.004x_2+0.002x_3+0.001x_4-0.001x_5$

注： $y_1$  为平均重量直径； $y_2$  为几何平均直径； $x_1$  为 >2 mm 团聚体； $x_2$  为 1~2 mm 团聚体； $x_3$  为 0.5~1 mm 团聚体； $x_4$  为 0.25~0.5 mm 团聚体； $x_5$  为 <0.25 mm 团聚体。

Note:  $y_1$  means mean weight diameter;  $y_2$  means geometric mean diameter;  $x_1$  means >2 mm aggregate;  $x_2$  means 1~2 mm aggregate;  $x_3$  means 0.5~1 mm aggregate;  $x_4$  means 0.25~0.5 mm aggregate;  $x_5$  means <0.25 mm aggregate.

### 3 讨论

#### 3.1 大团聚体与有机质、pH、交换性钙镁比的关系

本研究结果发现,有机质与水稳性大团聚体间为正相关( $P<0.05$ )。这与刘晶等研究发现 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量随有机质含量增加而增加的结论一致<sup>[18]</sup>。主要是因为有机质是土壤团聚体形成和稳定的重要因素<sup>[19]</sup>,有机质含量增加可增强团聚体胶结作用,胶结作用是团聚体形成重要途径<sup>[20]</sup>。有机质含量减少,促使水稳性团聚体间胶结物质分散,大团聚体分解为小粒级团聚体,从而降低团聚体水稳性。

本试验pH为6.03~6.27(见表2),土壤类型为酸性土壤<sup>[21]</sup>。本研究发现水稳性大团聚体与pH呈正相关。与姚俊红研究发现,黑土pH下降会提高微团聚体含量,减少 $>2$  mm团聚体含量结果一致<sup>[22]</sup>。可能是酸性土壤pH降低,导致有机质含量降低,团聚体稳定性下降<sup>[23-24]</sup>。

本研究发现水稳性大团聚体与钙镁比呈正相关,与刘欣萌等研究结果一致<sup>[25]</sup>。可能是团聚体的胶结物质主要是有机物质与交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 相结合,其次是有机物质与交换性 $\text{Mg}^{2+}$ 相结合<sup>[26]</sup>。 $\text{Ca}^{2+}$ 是土壤中的胶结物质,通过桥接作用,促进有机-无机配合物生成<sup>[27]</sup>,从而增加土壤大团聚体含量, $\text{Ca}^{2+}$ 通过絮凝作用促进土壤团聚和稳定性<sup>[28]</sup>。土壤交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 均与MWD呈正相关<sup>[25]</sup>,但因 $\text{Mg}^{2+}$ 水合半径比 $\text{Ca}^{2+}$ 大,与土壤胶体的吸附力比 $\text{Ca}^{2+}$ 弱。因此土壤钙镁比增大,有利于土壤团聚,提高土壤水稳性大团聚体含量。

#### 3.2 大团聚体与水稳性关系

本研究发现,不同坡位水稳性团聚体分布特征均表现为大团聚体含量较少, $<0.25$  mm粒级团聚体占主体,如表1所示。主要是因为在水的崩解作用下,破坏水稳性大团聚体,转化为更小粒级团聚体,增加微团聚体比例<sup>[29]</sup>。坡下水稳性团聚体与坡上水稳性团聚体存在显著差异( $P<0.05$ ),水稳性微团聚体含量随坡位降低而增加,坡上大粒级团聚体含量最高。这不同于闫雷等研究发现,0~20 cm土层坡上位的水稳性微团聚体的数量高于坡下位和坡中位<sup>[30]</sup>。坡下位水稳性微团聚体含量高于坡中位是因坡下地势低,易受到水流侵蚀,土

壤水稳性较差,且因沉积作用,微团聚体聚集于坡下,导致坡下位水稳性微团聚体含量高于坡中位。但不同耕作方式、地形等因素导致坡地团聚体组成及稳定性不同<sup>[31]</sup>。

利用团聚体MWD、GMD两个指数评价土壤团聚体水稳性,进一步掌握试验地不同坡位团聚体水稳性状况(见图1、2)。本研究发现,湿筛法测定的GMD、MWD均表现为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下,这表明团聚体水稳性为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下。与何舫得出漫川漫岗区水稳性团聚体MWD和GMD表现为坡上位显著性高于坡中位及坡下位的研究结果一致<sup>[32]</sup>。可能是坡上位受径流冲刷较轻,土壤团聚体稳定性较强。

利用岭回归分析发现MWD、GMD均表现为与 $>0.25$  mm大团聚体呈正相关,与微团聚体呈负相关。与任立军等研究发现GMD、MWD与 $<0.053$  mm、 $0.053\sim 0.250$  mm团聚体呈负相关结果一致<sup>[33]</sup>。这是因水稳性微团聚体含量越高,土壤水稳性越差<sup>[34-35]</sup>。林杰等研究表明, $>0.25$  mm水稳性团聚体含量增加有利于优化土壤结构,提高土壤抗侵蚀能力,与本研究结果一致<sup>[36]</sup>。

### 4 结论

a. 在典型黑土坡耕地不同坡位下,水稳性团聚体粒级分布均表现为微团聚体占比最高, $>2$  mm粒级团聚体占比最低。坡下位微团聚体含量显著高于坡中位及坡上位。

b. 不同坡位下,团聚体水稳性表现为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下,坡下位MWD、GMD显著低于其他坡位。团聚体水稳性与微团聚体呈负相关,与大团聚体呈正相关。

c. 水稳性大团聚体与有机质、pH、钙镁比呈正相关。有机质、pH、钙镁比增加可促进土壤颗粒产生团聚作用,增加水稳性大团聚体数量,提高团聚体水稳性。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张逸飞,汪零,徐玲,等. 降雨驱动下红壤团聚体的溅蚀特征及周转过程[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 27-33, 41.
- [2] 邱琛,韩晓增,陆欣春,等. 秸秆还田对农田黑土团聚体稳定性及孔隙结构的影响[J]. 土壤与作物, 2023, 12(2): 170-178.

- [ 3 ] 梁春林, 王彬, 张文龙. 东北黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与结构特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 43–52.
- [ 4 ] 赵桂茹, 安瞳昕, 欧阳铖人, 等. 青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 72–79.
- [ 5 ] 姜佰文, 梁世鹏, 张迪, 等. 耕作与施肥对黑土团聚体粒级分布及水稳定性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(7): 76–86.
- [ 6 ] Peng J, Wang J G, Yang Q S, et al. Spatial variation in soil aggregate stability and erodibility at different slope positions in four hilly regions of northeast China[J]. *Catena*, 2024, 235: 107660.
- [ 7 ] 张秀芝, 李强, 高洪军, 等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1214–1223.
- [ 8 ] Cheng Y T, Xu G C, Wang X K, et al. Contribution of soil aggregate particle size to organic carbon and the effect of land use on its distribution in a typical small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110988.
- [ 9 ] 李禹江, 张荣, 王琴, 等. 坡向和坡位对夹金山灌丛土壤团聚体稳定性的影响[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(3): 522–532.
- [ 10 ] Zhang C, Zhao X, Liang A J, et al. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via bio-char addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling[J]. *Environmental Research*, 2023, 228: 115895.
- [ 11 ] Cui H, Zhu H, Brian S, et al. Soil aggregate-driven changes in nutrient redistribution and microbial communities after 10-year organic fertilization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119306.
- [ 12 ] 于博威, 张晴雯, 郝卓, 等. 东北黑土区长缓坡耕地横坡垄作与地形对土壤可蚀性的交互作用[J]. 中国农业科学, 2023, 56(23): 4706–4716.
- [ 13 ] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495–504.
- [ 14 ] 闫雷, 李思莹, 孟庆峰, 等. 秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(12): 58–67.
- [ 15 ] 高佳, 朱耀辉, 赵荣荣. 中国黑土地保护: 政策演变、现实障碍与优化路径[J]. 东北大学学报: 社会科学版, 2024, 26(1): 82–89.
- [ 16 ] 苑佰飞, 崔海峰, 李猛, 等. 不同水土保持措施对东北黑土区坡耕地产流产沙的影响[J]. 中国水土保持, 2024(2): 61–65.
- [ 17 ] 张兴义, 李健宇, 郭孟洁, 等. 连续 14 年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 44–50.
- [ 18 ] 刘晶, 陈一民, 付岩梅, 等. 长期施肥下不同有机质含量的农田黑土水稳性团聚体中氮、磷的分布特征[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 140–146.
- [ 19 ] Sonsri K, Watanabe K. Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 232: 105774.
- [ 20 ] 喻武, 任德智, 杨文姬, 等. 西藏米拉山土壤团聚体垂直地带性特征[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(7): 59–69.
- [ 21 ] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [ 22 ] 姚俊红. 酸化对黑土团聚体有机碳含量及微生物群落的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [ 23 ] 尚小萱. 黑土酸化与土壤有机碳变化关系的模拟研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [ 24 ] 耿明昕, 关松, 孟维山, 等. 秸秆还田与生物炭施用影响黑土有机质并缓解土壤酸化[J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(2): 178–187.
- [ 25 ] 刘欣萌, 姜涵, 魏文良, 等. 秸秆与秸秆生物炭还田对石灰性潮土有机碳固定的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1316–1325.
- [ 26 ] 赵硕. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土壤团聚体稳定性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2024.
- [ 27 ] Boiteau R M, Kukkadapu R, Cliff J B, et al. Calcareous organic matter coatings sequester siderophores in alkaline soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138250.
- [ 28 ] 陶澍, 马东豪, 张丛志, 等. 石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系[J]. 土壤, 2021, 53(4): 715–722.
- [ 29 ] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 98–105.
- [ 30 ] 闫雷, 喇乐鹏, 董天浩, 等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 125–132.
- [ 31 ] 谭凯亮, 苏远航, 刘滨辉. 林带对黑土坡耕地土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(3): 93–98, 108.
- [ 32 ] 何舫. 典型黑土区坡耕地土壤团聚体有机碳变化特征[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [ 33 ] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 756–763.
- [ 34 ] 李春越, 常顺, 钟凡心, 等. 种植模式和施肥对黄土旱塬农田土

- [21] Meng F, Cai J, Wang C, et al. Single nucleotide polymorphism-based analysis of the genetic structure of the Min pig conserved population[J]. *Animal Bioscience*, 2022, 35(12): 1839-1849.
- [22] 刘晨龙, 卢丹, 周泉勇, 等. 利用高密度SNP芯片分析杭猪的群体遗传结构[J]. *畜牧兽医学报*, 2022, 53(8): 2502-2513.
- [23] 焦扬, 葛慧玲. 聚类分析在李品种谱系分析中的应用[J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(5): 72-76.
- [24] 蔡春波, 张雪莲, 张万峰, 等. 运用SNP芯片评估马身猪保种群体的遗传结构[J]. *畜牧兽医学报*, 2021, 52(4): 920-931
- [25] 周隽, 覃星文, 吴细波, 等. 基于SNP芯片对陆川猪进行遗传多样性与遗传结构分析的研究[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(8): 257-263.
- [26] Lynch M, Burger C R. Mutation accumulation and the extinction of small populations[J]. *American Naturalist*, 1995, 146(4): 489-518.

---

(上接第49页)

- 壤团聚体及其碳分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 191-200.
- [35] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: The role of different straws returning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [36] 林杰, 张阳, 朱艳芳, 等. 淮北土石山区不同土地利用方式对土壤团聚体组成的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(4): 133-142.