



马鹤逍,师晶晶,张向前,路战远,李娟,张德健,张健伟,刘凌悦,罗方,李淑梅.作物轮作与秸秆还田对土壤孔隙度和有机碳分布的影响[J].中国农业大学学报,2026,31(02):38-51.

MA Hexiao, SHI Jingjing, ZHANG Xiangqian, LU Zhanyuan, LI Juan, ZHANG Dejian, ZHANG Jianwei, LIU Lingyue, LUO Fang, LI Shumei. Influence of crop rotation and straw returning to the field on soil porosity and organic carbon distribution[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 38-51.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.04

## 作物轮作与秸秆还田对土壤孔隙度和有机碳分布的影响

马鹤逍<sup>1</sup> 师晶晶<sup>1</sup> 张向前<sup>2,3\*</sup> 路战远<sup>1,2</sup> 李娟<sup>1</sup> 张德健<sup>1\*</sup> 张健伟<sup>2</sup>  
刘凌悦<sup>4</sup> 罗方<sup>4</sup> 李淑梅<sup>5</sup>

- (1. 内蒙古大学 生命科学院/牧草与特色作物生物技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010020;  
2. 内蒙古自治区农牧业科学院 农业农村部黑土地保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010031;  
3. 内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010018;  
4. 内蒙古自治区呼伦贝尔市阿荣旗农业事业发展中心, 内蒙古 呼伦贝尔 162750;  
5. 内蒙古自治区通辽市农牧业发展中心, 内蒙古 呼伦贝尔 028001)

**摘 要** 为探究作物长期轮作对土壤物理结构和有机碳的影响,于2022和2023年在内蒙古自治区呼伦贝尔市阿荣旗土壤管理与生态修复科学观测试验基地设置马铃薯连作(对照)、玉米连作、大豆连作、大豆-玉米轮作、大豆-马铃薯轮作、玉米-玉米-马铃薯轮作及大豆-玉米-马铃薯轮作共7个处理,系统分析作物收获期不同处理下土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、有机碳含量、有机碳储量及有机碳层化率变化的差异。结果表明:与马铃薯连作处理相比,玉米-玉米-马铃薯轮作、大豆-玉米轮作及玉米连作处理可显著降低0—10、10—20、20—40 cm土层土壤容重,不同土层分别显著降低13.96%~19.94%、13.05%~21.83%、12.53%~22.72%;40—60 cm土层大豆-玉米轮作处理及玉米连作处理显著降低了12.46%~17.47%( $P<0.05$ );玉米-玉米-马铃薯轮作、大豆-玉米轮作及玉米连作处理可显著提高0—10、10—20、20—40 cm土层土壤总孔隙度,不同土层分别显著提高了7.57%~10.82%、7.35%~12.56%、7.42%~13.35%,40—60 cm土层大豆-玉米轮作处理及玉米连作处理显著提高了7.42%~10.64%( $P<0.05$ )。0—10 cm土层玉米-玉米-马铃薯轮作、大豆-玉米轮作处理土壤毛管孔隙度显著提高了5.37%~7.86%( $P<0.05$ );0—10 cm土层大豆-玉米-马铃薯轮作、玉米-玉米-马铃薯轮作处理土壤有机碳含量显著提高了10.23%~36.78%;10—20 cm土层玉米-玉米-马铃薯轮作处理显著提高了16.65%~33.77%;20—40 cm土层玉米-玉米-马铃薯轮作及大豆-玉米-马铃薯轮作处理显著提高了28.74%~53.66%;60—80 cm土层大豆-玉米-马铃薯轮作处理显著提高了10.89%~13.00%;80—100 cm土层大豆-玉米轮作处理显著提高了16.67%~19.28%( $P<0.05$ );大豆-玉米-马铃薯轮作、大豆-马铃薯轮作处理可提高0—10、0—20 cm深度土层有机碳储量,大豆-玉米-马铃薯轮作、玉米-玉米-马铃薯轮作可提高0—40、0—60、0—80、0—100 cm深度土层有机碳储量;玉米-玉米-马铃薯轮作、大豆-玉米-马铃薯轮作处理第一层化率及第二层化率降低,玉米-玉米-马铃薯轮作处理第三层化率、第四层化率升高。综上所述,内蒙古农牧交错黑土区最佳轮作模式为大豆-玉米轮作,其次为大豆-玉米-马铃薯及玉米-玉米-马铃薯轮作。

**关键词** 农牧交错黑土区;轮作;土壤物理结构;土壤有机碳;有机碳层化率

中图分类号 S153

文章编号 1007-4333(2026)02-0038-14

文献标志码 A

收稿日期:2025-03-28;接受日期:2025-06-18

基金项目:农牧交错区耕地保育与产能提升创新人才团队项目(2025TYL09);内蒙古自治区科技计划(2022YFDZ0071,2022YFDZ0060-2,2025YFDZ0059);中央引导地方科技发展资金(2022ZY0216)

第一作者:马鹤逍(ORCID:0009-0009-0100-4939),硕士研究生,E-mail:17836227607@163.com

通讯作者:张向前(ORCID:0000-0001-5957-7646),研究员,主要从事土壤耕作与农业生态等研究,E-mail:zhangxiangqian\_2008@126.com

张德健(ORCID:0000-0002-2287-787x),教授,主要从事旱作农业与农田生态治理研究,E-mail:zhangdejian00@163.com

## Influence of crop rotation and straw returning to the field on soil porosity and organic carbon distribution

MA Hexiao<sup>1</sup>, SHI Jingjing<sup>1</sup>, ZHANG Xiangqian<sup>2,3\*</sup>, LU Zhanyuan<sup>1,2</sup>, LI Juan<sup>1</sup>,  
ZHANG Dejian<sup>1\*</sup>, ZHANG Jianwei<sup>2</sup>, LIU Lingyue<sup>4</sup>, LUO Fang<sup>4</sup>, LI Shumei<sup>5</sup>

(1. College of Life Sciences/Key Laboratory of Forage and Special Crop Biotechnology of Ministry of Education, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China;

2. Key Laboratory of Black Soil Protection and Utilization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;

3. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

4. Agricultural Development Center of Arong Banner, Hulun Buir City, Inner Mongolia Autonomous Region, Hulun Buir 162750, China;

5. Agricultural and Animal Husbandry Development Center of Tongliao City, Inner Mongolia Autonomous Region, Hulun Buir 028001, China)

**Abstract** To explore the effects of long-term crop rotation on soil physical structure and organic carbon, a total of seven treatments, namely potato continuous cropping, maize continuous cropping, soybean continuous cropping, soybean-maize rotation, soybean-potato rotation, maize-maize-potato rotation, and soybean-maize-potato rotation, were set up at the Soil Management and Ecological Restoration Scientific Observation and Experiment Base located in Arong Banner, Hulun Buir City, Inner Mongolia Autonomous Region from 2022 to 2023 by taking potato continuous cropping as control. The effects of different treatments on soil bulk density, total porosity, capillary porosity, organic carbon content, organic carbon storage, and organic carbon stratification rate during harvest period were determined. The results showed that: Compared to the continuous cropping treatment of potatoes, maize-maize-potato rotation treatment, soybean-maize rotation treatment, and maize continuous cropping treatment significantly reduced the soil bulk density in the 0-10, 10-20, and 20-40 cm soil layers, which were respectively significantly reduced by 13.96% to 19.94%, 13.05% to 21.83%, and 12.53% to 22.72% in different soil layers ( $P<0.05$ ). The rotation treatment of soybean-maize and the continuous cropping treatment of maize in the 40-60 cm soil layer significantly reduced by 12.46% to 17.47% ( $P<0.05$ ). Maize-maize-potato rotation treatment, soybean-maize rotation treatment, and maize continuous cropping treatment could significantly increase the total soil porosity in the 0-10, 10-20, and 20-40 cm soil layers. The different soil layers were significantly increased by 7.57% to 10.82%, 7.35% to 12.56%, and 7.42% to 13.35%, respectively. The rotation treatment of soybean-maize and the continuous cropping treatment of maize in the 40-60 cm soil layer significantly increased by 7.42% to 10.64% ( $P<0.05$ ). The capillary porosity of the soil in the 0-10 cm soil layer treated with maize-maize-potato rotation and soybean-maize rotation increased significantly by 5.37% to 7.86% ( $P<0.05$ ). The soil organic carbon content significantly increased by 10.23% to 36.78% in the 0-10 cm soil layer treated with rotation of soybean-maize-potato and rotation of maize-maize-potato. The rotation treatment of maize-maize-potato in the 10-20 cm soil layer significantly increased by 16.65% to 33.77%. The rotation treatments of maize-maize-potato and soybean-maize-potato in the 20-40 cm soil layer significantly increased by 28.74% to 53.66%. The rotation treatment of soybean-maize-potato in the 60-80 cm soil layer significantly increased by 10.89% to 13.00%. The rotation treatment of soybean-maize in the 80-100 cm soil layer significantly increased by 16.67% to 19.28% ( $P<0.05$ ). Soybean-maize-potato rotation and soybean-potato rotation treatments increased the organic carbon storage in the soil layers at depths of 0-10 and 0-20 cm. Soybean-maize-potato rotation and maize-maize-potato rotation can increase the organic carbon storage in the soil layers at depths of 0-40, 0-60, 0-80, and 0-100 cm, respectively. The first and second stratification rate decreased in the maize-maize-potato rotation treatment and the soybean-maize-potato rotation treatment, while

the third and fourth stratification rate increased in the maize-maize-potato rotation treatment. To sum up, the optimal crop rotation model for the black soil agro-pastoral ecotone in Inner Mongolia is soybean-maize rotation, followed by the soybean-maize-potato and maize-maize-potato rotations.

**Keywords** the black soil agro-pastoral ecotone; crop rotation; soil physical structure; soil organic carbon; organic carbon stratification rate

玉米、大豆及马铃薯作为中国重要的粮食作物,其稳产和高产是保障国家粮食供给安全的重要基石。我国玉米种植地主要以东北、内蒙古及宁夏为主,占全国种植面积的36%<sup>[1]</sup>;大豆种植地主要集中在东北、内蒙古、山西及河北,其种植面积约占全国种植总面积的41%<sup>[2]</sup>;马铃薯种植地主要集中在东北、内蒙古、山西及河北,其种植面积约占全国种植总面积的42%<sup>[3]</sup>。东北及内蒙古等地构成了中国农牧交错黑土区的核心地带,是我国粮畜产品生产的重要基地,全国25%的粮食均产于黑土区,自然黑土土壤结构良好、腐殖质层深厚、含丰富的有机质,具有高肥力、高适耕性的特点。长期以来农牧交错黑土区一直以玉米、大豆单作种植方式为主<sup>[4]</sup>,然而随土地开垦程度加大,黑土地肥力不断下降,土壤结构变差<sup>[5]</sup>。在长期单作种植情况下,作物根系在土壤中形成特定分布模式影响土壤结构,增加了土壤容重<sup>[6]</sup>,尤其在马铃薯长期连作情况下,土传病害增加,土壤结构改变,透气性下降,使土壤更加紧实<sup>[7]</sup>。自2017—2019年东北黑土区开始推广玉-豆轮作用地养地结合模式<sup>[4]</sup>。研究表明通过不同作物的轮作,丰富生物多样性,有利于提高土壤生态系统稳定性,改善土壤质量<sup>[8]</sup>。

土壤容重是衡量土壤物理性质的重要指标之一,其影响土壤有机碳储量的时空分布<sup>[9]</sup>,反映土壤紧实度、孔隙状态及持水能力等指标<sup>[10]</sup>。过高的土壤容重不利于植物根系的生长及土壤养分的循环利用<sup>[11]</sup>。合理的轮作模式可以降低土壤容重,疏松土质,有利于作物根系发育<sup>[12]</sup>。孙继英等<sup>[13]</sup>在玉米、大豆及马铃薯轮作研究中发现,轮作可有效降低土壤容重,提高作物产量。吴金芝等<sup>[14]</sup>对玉米-小麦轮作研究中发现,0—40 cm土层土壤容重有效降低了4.9%~11.5%。樊博等<sup>[15]</sup>及Yue等<sup>[16]</sup>对玉米及大豆生长根系研究中发现,两者根系在土壤中的生长均可增加土壤孔隙度,改善土壤物理结构。王籽懿等<sup>[17]</sup>研究表明玉米-马铃薯轮作有利于降低0—40 cm土层土壤容重、增加土壤孔隙度。土壤有机碳储量可很好反映土壤有机碳储存能力<sup>[18]</sup>。

已有研究表明轮作可以有效提升土壤有机碳含量,尤其对表层有机碳含量影响更为显著<sup>[19-21]</sup>,同时可有效改善土壤物理结构,增加土壤透气性及孔隙度,改善土壤质量。但目前的研究主要集中在玉米-大豆轮作模式,且关于内蒙古农牧交错黑土区轮作模式对土壤质量影响的研究鲜有报道。因此,本研究拟在内蒙古自治区农牧交错黑土区呼伦贝尔市阿荣旗设置定位试验,以玉米、大豆、马铃薯不同轮作模式对土壤质量的影响为研究对象,在作物收获期,测定土壤中有机碳含量、有机碳储量、有机碳层化率、容重及孔隙度,分析不同轮作模式对土壤有机碳及物理结构的影响,探究各指标间的相关效应,以期为黑土耕地土壤物理结构改善、耕地质量提升、合理轮作模式的选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2016年在内蒙古自治区农牧业科学院土壤管理与生态修复科学观测试验基地(48°12' N, 123°48' E)进行。试验地土壤类型为黑土,质地为黏壤土。全年日照时数2 750~2 850 h,无霜期90~130 d。基础地力见表1。2022—2023年试验区月降雨量与月平均气温见图1,2022年4—11月降雨量为394.50 mm、主要集中在7月,2023年4—11月降雨量为640.70 mm、主要集中在7—8月。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验供试材料

试验所用供试材料品种为玉米品种“锋玉8”(龙江县丰吉种业有限公司提供)、大豆品种“克山1号”(黑龙江省农业科学院克山分院)、马铃薯品种“兴佳2”(黑龙江省大兴安岭地区农业林业科学院提供)。

#### 1.2.2 试验设计

试验采取随机区组排列设计,共设置7个处理。分别为大豆-玉米轮作(S-M)、大豆-马铃薯轮作(S-P)、玉米-玉米-马铃薯轮作(M-M-P)、大豆-玉米-马铃薯轮作(S-M-P)、玉米连作(M-M)、大豆连

表 1 2016 年 0—60 cm 土层基础地力

Table 1 Foundation fertility of 0-60 cm soil layer in 2016

| 土层/cm<br>Soil depth | pH   | 有机碳/(g/kg)<br>Organic carbon | 碱解氮/(mg/kg)<br>Alkali hydrolysable nitrogen | 速效磷/(mg/kg)<br>Available phosphorus |
|---------------------|------|------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0—10                | 7.93 | 21.95                        | 36.71                                       | 22.16                               |
| 10—20               | 7.92 | 22.12                        | 37.80                                       | 20.34                               |
| 20—40               | 8.05 | 16.82                        | 32.20                                       | 13.65                               |
| 40—60               | 8.58 | 12.66                        | 20.81                                       | 3.65                                |

| 速效钾/(mg/kg)<br>Available potassium | 全氮/(g/kg)<br>Total nitrogen | 全磷/(g/kg)<br>Total phosphorus | 容重/(g/cm <sup>3</sup> )<br>Soil bulk density | 总孔隙度/%<br>Total porosity |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|
| 193.33                             | 2.39                        | 0.59                          | 1.02                                         | 61.51                    |
| 198.33                             | 2.38                        | 0.61                          | 1.15                                         | 56.60                    |
| 153.33                             | 2.23                        | 0.56                          | 1.22                                         | 53.96                    |
| 103.33                             | 1.45                        | 0.44                          | 1.31                                         | 50.57                    |

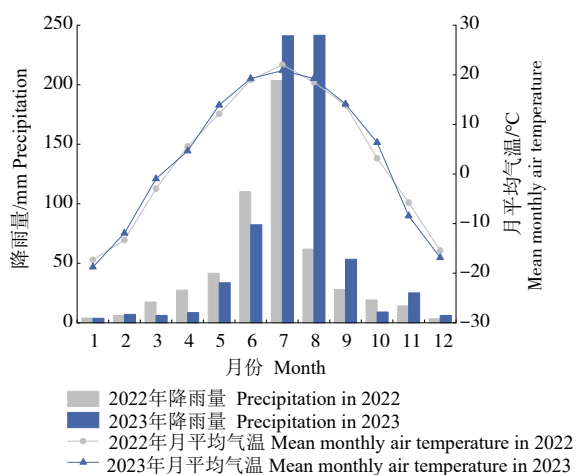


图 1 2022—2023 年试验区月降雨量与月平均气温

Fig. 1 Monthly rainfall and average monthly temperature in the test area during 2022-2023

作(S-S)、马铃薯连作(P-P),以 P-P 为对照处理。每个处理 3 次重复,小区面积为 381 m<sup>2</sup>,共计 21 个小区。采用播种机进行玉米、大豆播种,马铃薯利用专用播种机播种。不同处理年际间施肥量根据作物进行施用,均不施加有机肥。其中:播前玉米地块施加复合肥 450 kg/hm<sup>2</sup>, $m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=19:19:19$ ;马铃薯地块施加复合肥 375 kg/hm<sup>2</sup>, $m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)$ 为 19:19:19;大豆地块施加复合肥 300 kg/hm<sup>2</sup>, $m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)$ 为 14:23:11。此外,在玉米拔节期追施尿素,追肥量为 247.5 kg/hm<sup>2</sup>、马铃薯地块追施尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>,大豆地块不追肥。各处理耕作方式一

致,均采用深翻秸秆还田措施,于作物收获后将玉米、大豆、马铃薯秸秆全部粉碎全量还田,玉米秸秆还田量为:10 153~12 461 kg/hm<sup>2</sup>,大豆秸秆还田量为:3 910~5 300 kg/hm<sup>2</sup>,马铃薯秸秆还田量为:4 050~5 400 kg/hm<sup>2</sup>。其他田间管理均一致。

### 1.3 土壤样品采集及测定方法

#### 1.3.1 土壤物理结构测定

在 2022 和 2023 年作物收获期进行样品采集,采用环刀法,分 4 个土层深度:0—10、10—20、20—40 及 40—60 cm,重复 3 次。样品吸水、烘干及称重。土壤容重计算公式如下<sup>[22]</sup>:

$$SBD=(M_3-M_1)/100$$

式中:SBD 为土壤容重,g/cm<sup>3</sup>;M<sub>3</sub>为 105℃烘干后原状土样和环刀恒重,g;M<sub>1</sub>为环刀重,g;100 为环刀容积,cm<sup>3</sup>。

土壤总孔隙度及毛管孔隙度计算公式如下<sup>[23-24]</sup>:

$$TP=(1-\frac{SBD}{2.65})\times 100\%$$

$$CP=(M_2-M_3)/(M_3-M_1)\times SBD\times 100\%$$

式中:TP 为土壤总孔隙度,%;CP 为土壤毛管孔隙度,%;M<sub>3</sub>为 105℃烘干后原状土样和环刀恒重,g;M<sub>2</sub>为原状土样和环刀吸水 12 h 后置于干砂盘中 2 h 后质量,g;M<sub>1</sub>为环刀重,g;2.65 为土壤比重,g/cm<sup>3</sup>。

#### 1.3.2 土壤有机碳测定

在 2022 和 2023 年作物收获期进行土壤样品的

采集,采用“五点取样法”,用细土钻,分6个土层深度:0—10、10—20、20—40、40—60、60—80及80—100 cm,将5个点土样充分混匀,重复3次。SOC含量计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$\text{SOC} = C \times (V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.33 \times 1000 / m$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量, g/kg;  $C$  为 0.5 mol/L  $\text{FeSO}_4$  标准溶液浓度,  $V_0$  为空白滴定所用  $\text{FeSO}_4$  体积, mL;  $V$  为样品滴定所用  $\text{FeSO}_4$  体积, mL; 1.33 为氧化校正系数;  $m$  为风干土重, g。

SOC 储量用等质量法测定计算公式如下<sup>[26]</sup>:

$$\text{SOCS} = \sum_{i=1}^n (C_i \times \text{SBD}_i \times D_i) / 10$$

式中: SOCS 为某深度的土壤有机碳储量, T/hm<sup>2</sup>;  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量, g/kg;  $\text{SBD}_i$  为第  $i$  层土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $D_i$  为第  $i$  层土壤厚度, cm;  $n$  为土层数。

SOC 层化率计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$\text{SR}_i = \frac{C_i}{C_{i+1}}$$

式中:  $\text{SR}_i$  为不同深度土层土壤有机碳层化率;  $C_i$  为 0—10 cm 土层有机碳含量, g/kg;  $i$  取值 1、2、3、4、5,  $i+1$  分别代表 10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层;  $C_{i+1}$  为不同土层有机碳含量, g/kg。

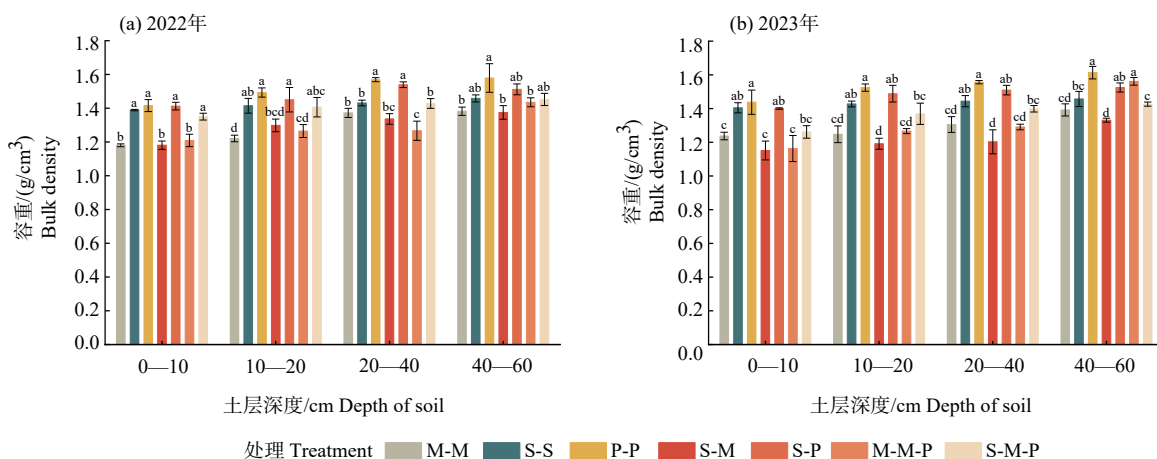
## 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据预处理后,用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行单因素方差分析 (ANOVA) 和显著性检验 ( $P < 0.05$ ), 利用 Origin 2022 对分析结果进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同作物轮作系统对土壤容重的影响

2022 和 2023 年不同轮作系统对土壤容重的影响结果见图 2。0—40 cm 土层 P-P 处理土壤容重最高, 其次为 S-P、S-S、S-M-P。与 P-P 处理相比, S-P、S-S 及 S-M-P 处理容重降低, 但不显著 ( $P > 0.05$ ), S-M、M-M-P 及 M-M 处理可显著降低 0—40 cm 土层土壤容重 ( $P < 0.05$ )。其中, 0—10 cm 土层显著降低 13.96%~19.94% ( $P < 0.05$ ); 10—20 cm 土层显著降低 13.05%~21.83% ( $P < 0.05$ ); 20—40 cm 土层显著降低 12.53%~22.72% ( $P < 0.05$ )。40—60 cm 土层 P-P 处理土壤容重最高, 与 P-P 处理相比, S-M、M-M 处理可显著降低该土层土壤容重 ( $P < 0.05$ ), 其中 S-M 处理降幅最大。此外, 2022 年 S-M-P 处理在 0—60 cm 土层中土壤容重总体上均有所降低, 但不显著 ( $P > 0.05$ ), 2023 年 S-M-P 处理土壤容重显著降低 ( $P < 0.05$ )。



M-M、S-S、P-P、S-M、S-P、M-M-P、S-M-P 指玉米连作、大豆连作、马铃薯连作、大豆-玉米轮作、大豆-马铃薯轮作、玉米-玉米-马铃薯轮作、大豆-玉米-马铃薯轮作。柱子上方不同小写字母表示同一土层不同处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

M-M, S-S, P-P, S-M, S-P, M-M-P, S-M-P refer to maize continuous cropping, soybean continuous cropping, potato continuous cropping, soybean-maize rotation, soybean-potato rotation, maize-maize-potato rotation, and soybean-maize-potato rotation. Different lowercase letters above the column indicate that different treatments in the same soil layer are significantly different at the 0.05 level. The same below.

图 2 2022 和 2023 年同一土层不同轮作处理下土壤容重的变化

Fig. 2 Changes in soil bulk density under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

## 2.2 不同作物轮作系统对土壤总孔隙度的影响

2022和2023年不同轮作系统对土壤总孔隙度的影响结果见图3。不同土层中各处理总孔隙度的变化有所差异。总体上,P-P处理土壤总孔隙度最低。0—40 cm土层,最大值出现在S-M、M-M-P及M-M处理之间。与P-P处理相比,S-P、S-S及S-M-P处理总孔隙度升高,但不显著( $P>0.05$ ),S-M、M-M-P及M-M处理可显著提高0—40 cm土层土壤总孔隙度( $P<0.05$ ),其中,0—10 cm土层

显著提高7.57%~10.82%( $P<0.05$ );10—20 cm土层显著提高7.35%~12.56%( $P<0.05$ );20—40 cm土层显著提高7.42%~13.35%( $P<0.05$ )。40—60 cm土层S-M处理土壤总孔隙度最高,与P-P处理相比,S-M及M-M处理均显著提高土壤总孔隙度( $P<0.05$ )。此外,与P-P处理相比,2022年S-M-P处理在0—60 cm土层中土壤总孔隙度总体上均有所提高,但不显著( $P>0.05$ ),2023年S-M-P处理土壤总孔隙度显著提高( $P<0.05$ )。

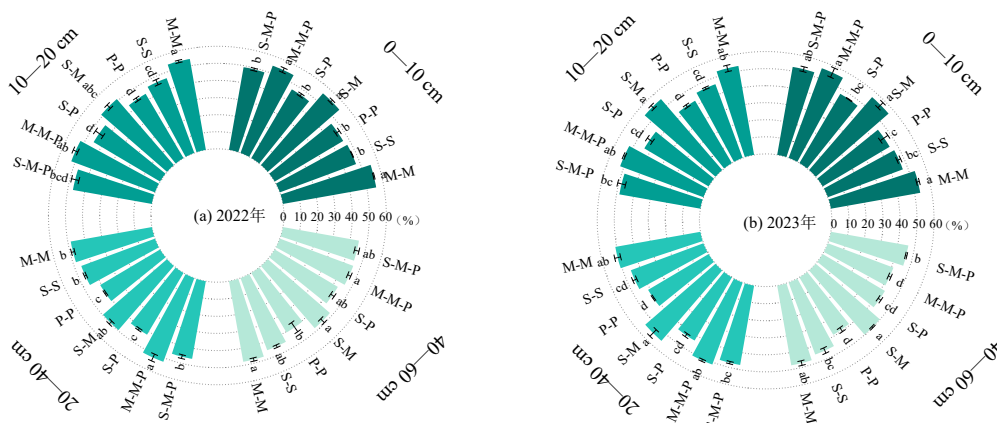


图3 2022和2023年同一土层不同轮作处理下土壤总孔隙度的变化

Fig. 3 Changes in soil total porosity under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

## 2.3 不同作物轮作系统对土壤毛细孔隙度的影响

2022和2023年不同轮作系统对土壤毛细孔隙度的影响结果见图4。不同处理对各土层土壤毛细孔隙度的影响存在差异。总体上,0—40 cm土层中M-M、S-M及M-M-P处理对土壤毛细孔隙度的影响较大,与P-P处理相比,其中,0—10 cm土层M-

M、S-M及M-M-P处理土壤毛细孔隙度显著提高了5.37%~7.86%( $P<0.05$ ),S-M-P及S-S处理土壤毛细孔隙度有所提高,但不显著( $P>0.05$ );10—20、20—40 cm土层M-M处理分别显著提高6.90%~7.67%、5.14%~5.22%( $P<0.05$ ),S-M、M-M-P、S-M-P及S-S处理提高不显著( $P>$

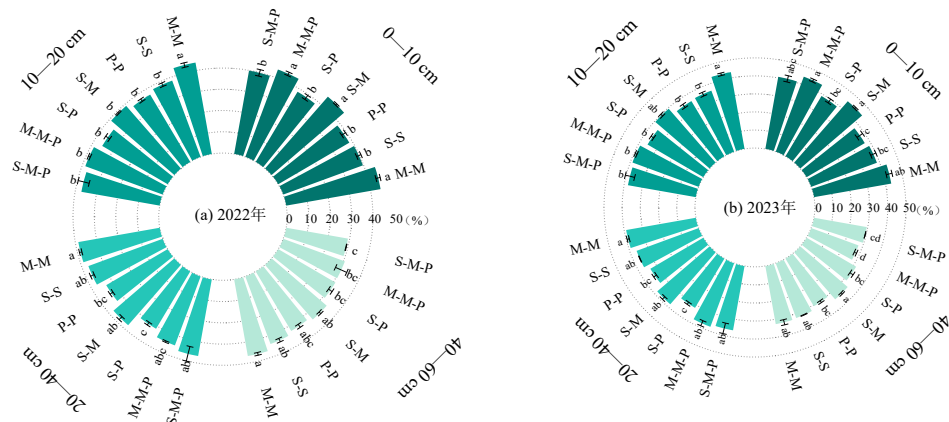


图4 2022和2023年同一土层不同轮作处理下土壤毛细孔隙度的变化

Fig. 4 Changes in soil capillary porosity under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

0.05)。40—60 cm 土层 M-M、S-M 及 S-S 处理土壤毛管孔隙度提高,但不显著( $P>0.05$ )。此外,2023 年轮作处理毛管孔隙度整体上高于 2022 年。2023 年连作处理毛管孔隙度整体上低于 2022 年。

#### 2.4 不同作物轮作系统对土壤有机碳含量的影响

2022 和 2023 年不同轮作系统对土壤有机碳含量的影响结果见图 5。总体上,各土层不同处理中 M-M、S-M、S-M-P 及 M-M-P 处理土壤有机碳含量均高于其他处理,P-P 处理含量最低。其中,与 P-P 处理相比,0—10 cm 土层 2022 年 M-M 含量最高,最高达 22.83 g/kg,其次为 S-M、S-M-P、S-S 处理,其有机碳含量显著提高 7.95%~17.05% ( $P<0.05$ );2023 年 S-M 含量最高,最高达 26.38 g/kg,其次为 M-M、S-M-P、M-M-P、S-S 处理,其有机碳含量显著提高 16.09%~36.78% ( $P<0.05$ )。10—20 cm 土层 2022 和 2023 年均为 M-M-P 处理含量最高,显著提高 16.65%~33.77% ( $P<0.05$ ),其次为 M-M、S-M-P、S-M、S-S、S-P 处理,2022 年提高了 1.28%~

14.10% ( $P>0.05$ ),2023 年显著提高了 14.29%~31.17% ( $P<0.05$ )。20—40 cm 土层 2022 和 2023 年均为 M-M-P 处理含量最高,其次为 S-M-P、M-M、S-S,均显著提高 ( $P<0.05$ ),此外 2023 年 S-M 处理有机碳含量显著提高 ( $P<0.05$ ),2022 年提高不显著 ( $P>0.05$ )。40—60 cm 土层 2022 年各处理间无显著差异 ( $P>0.05$ ),2023 年 S-S 处理有机碳含量最高,其次为 M-M、S-P、S-M-P,且均显著提高 ( $P<0.05$ )。60—80 cm 土层有机碳含量 2022 年 M-M 及 S-M-P 处理显著提高 ( $P<0.05$ ),其次为 S-M、M-M-P、S-S、S-P,但提高不显著 ( $P>0.05$ );2023 年 S-M 处理有机碳含量提升最显著,其次为 M-M-P、S-S、S-M-P、M-M,均显著提高 ( $P<0.05$ )。80—100 cm 土层 M-M 处理有机碳含量最高,其次为 S-M 处理,均显著提高 ( $P<0.05$ )。此外,0—60 cm 土层除 P-P 处理,2023 年其余处理有机碳含量整体均高于 2022 年。60—100 cm 土层有机碳含量 2023 年较 2022 年呈降低趋势。

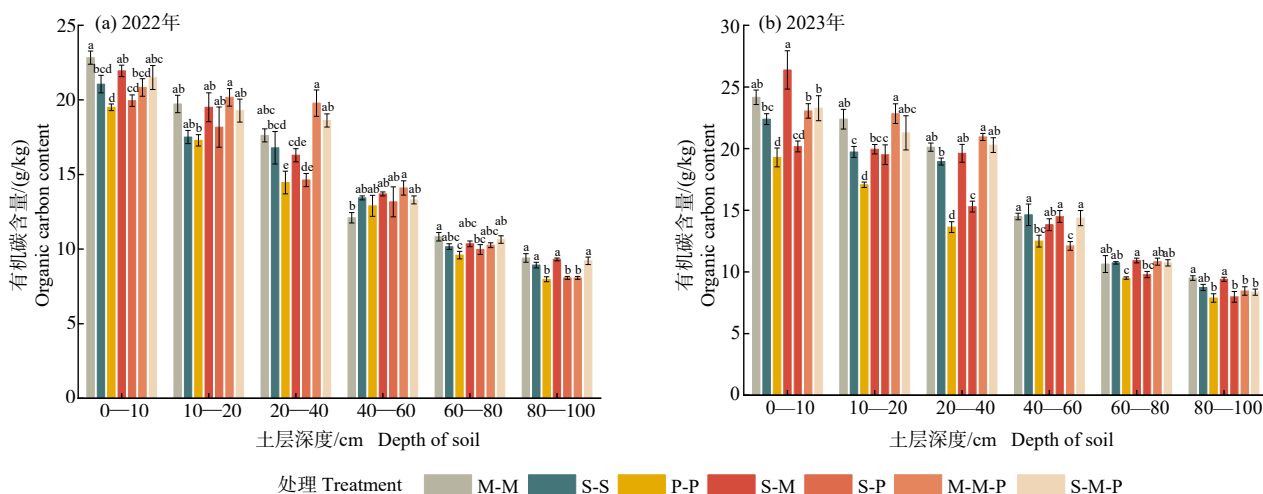


图 5 2022 和 2023 年同一土层不同轮作处理下土壤有机碳含量的变化

Fig. 5 Changes in soil organic carbon content under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

#### 2.5 不同作物轮作系统对土壤有机碳储量的影响

2022 和 2023 年不同轮作系统对土壤有机碳储量的影响结果见图 6。总体上,相较于 P-P 处理,2022 年 S-M-P、S-M、M-M-P 处理可不同程度提高土壤有机碳储量,但不显著 ( $P>0.05$ );2023 年 40—100 cm 土深土壤的 S-M-P、M-M-P 及 S-S 处理有机碳储量均显著提升 ( $P<0.05$ )。2022 年,

0—10 cm 土深 S-S 处理有机碳储量最高,M-M-P 处理最低;0—20 cm 土深 S-M-P 处理有机碳储量最高,M-M-P 处理最低;0—40、0—60、0—80、0—100 cm 土深 S-M-P 处理储量最高,S-M 处理最低。2023 年 0—10、0—20 cm 土深 S-S 处理储量最高,且各处理间差异不显著 ( $P>0.05$ );0—40 cm 土深 S-M-P 处理储量最高,其次为 S-S、M-M、M-M-P、S-P,与 P-P 处理相比,显著提高了 7.60%~

19.53% ( $P < 0.05$ ); 0—60、0—80、0—100 cm 土深 S-S 处理储量最高, 其次为 S-M-P、M-M、M-M-P, 不同土深有机碳储量分别显著提高 8.07%~

14.89%、8.62%~13.16%、7.97%~11.93% ( $P < 0.05$ )。此外, 所有处理 0—100 cm 土深 2023 年有机碳储量整体高于 2022 年。

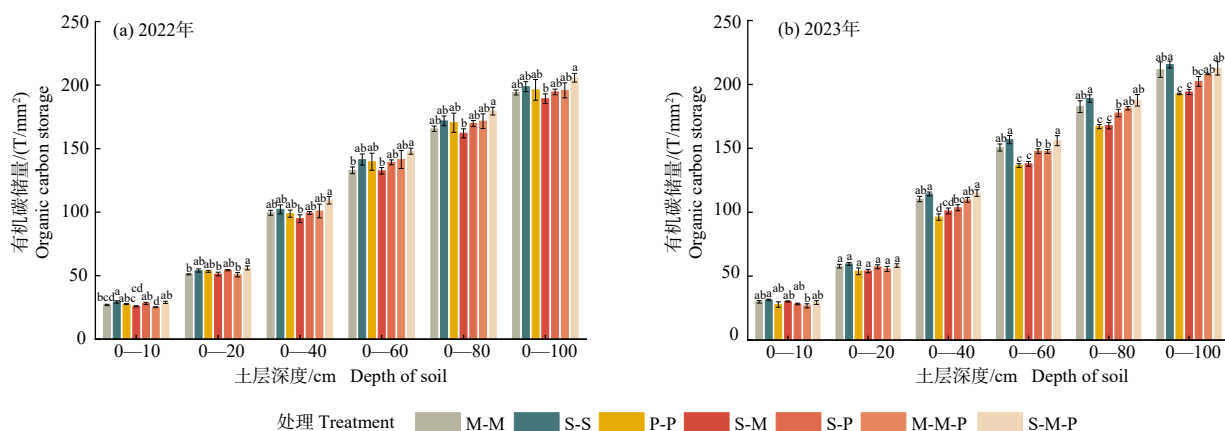


图6 2022和2023年同一土层不同轮作处理下土壤有机碳储量的变化

Fig. 6 Changes in soil organic carbon storage under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

## 2.6 不同作物轮作系统对土壤有机碳层化率的影响

2022 和 2023 年不同轮作系统对土壤有机碳层化率的影响结果见图 7。可见: 相较于 P-P 处理, 轮作处理可降低土壤 SR1 及 SR2, 且 M-M-P 处理最低, 2022 年不同处理间 SR1 差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 2023 年除 S-M 处理显著增加 16.80% ( $P < 0.05$ ), 其余处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

2022 和 2023 年 S-M-P 及 M-M-P 处理显著降低 SR2, 降低 14.88%~22.50% ( $P < 0.05$ )。2022 年 M-M 处理 SR3 最高, 其次为 S-M-P、S-M、S-S、S-P, M-M-P 处理最低, 不同处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 2023 年 M-M-P 处理 SR3 最高, 其次为 S-M、M-M、S-M-P, S-P 处理最低, S-M 及 M-M-P 处理显著提高 22.69%~22.85% ( $P < 0.05$ ), 其余处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。2022 年 S-P 处理

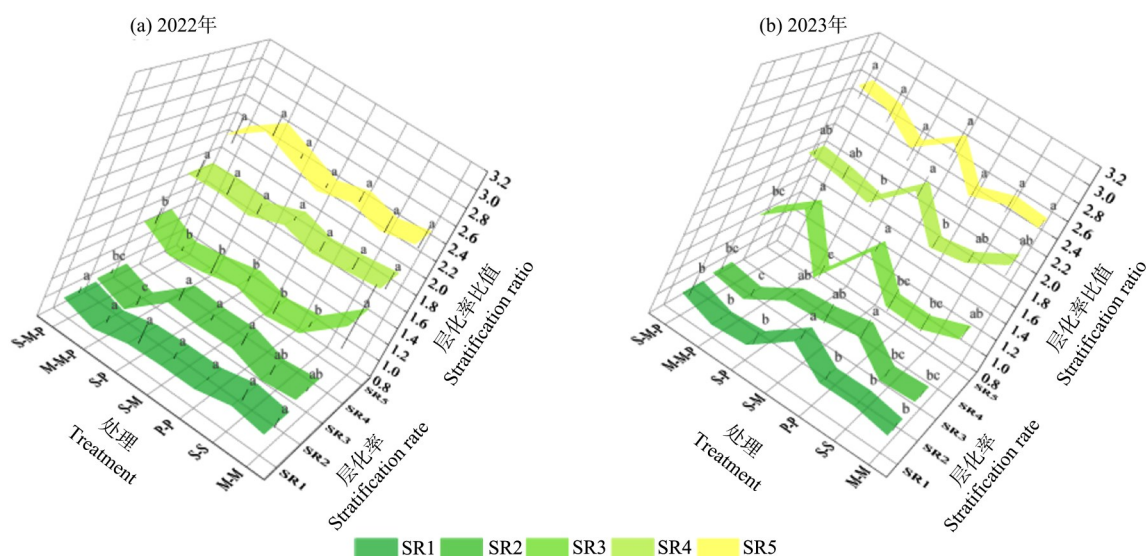


图7 2022与2023年同一土层不同轮作处理下土壤有机碳层化率的变化

Fig. 7 Changes in soil organic carbon stratification rates under different crop rotation treatments in the same soil layer in 2022 and 2023

SR4最低,其次为S-M-P、M-M-P,且层化率均低于P-P处理,S-M处理最高,不同处理间差异不显著( $P>0.05$ );2023年S-M处理SR4最高,其次为M-M、S-M-P、M-M-P、S-S、S-P,P-P处理最低,且除S-M处理显著提高18.88%( $P<0.05$ ),其余处理间差异不显著( $P>0.05$ )。2022年M-M-P及S-P处理SR5高于P-P处理,S-M-P处理最低,其次为S-M、S-M、S-S,各处理间差异不显著( $P>0.05$ );2023年P-P处理SR5最低,S-M处理SR5最高,其次为S-M-P、M-M-P、S-S、S-P、M-M,各处理间差异不显著( $P>0.05$ )。此外,结果显示轮作处理对表层土壤层化率较显著,对深层土壤层化率影响并不显著。层化率各处理间2022年变化趋势较为平缓,2023年呈“Z”字型变化,且大豆-玉米轮作处理下SR3、SR4、SR5层化率均处于峰值。

## 2.7 作物轮作系统下各指标相关性分析

不同轮作模式对物理结构及有机碳指标的相关性分析结果见图8,SOC与CP、TP呈显著正相关,与SBD、SR、SOCS呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性程度为 $SR>SOCS>CP>TP/SBD$ 。SOCS与SBD、SR呈显著正相关,与CP、TP、SOC呈显著负相关( $P<0.05$ )相关性程度为 $SOC>SR>CP>TP/SBD$ 。SR与SBD、SOCS呈显著正相关,与CP、TP、SR呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性程度为 $SOC>SOCS>CP>TP/SBD$ 。SBD与SR、SOCS呈显著正相关,与SOC、TP、CP呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性程度为 $TP>SOC>CP>SOCS>SR$ 。TP与CP、SOC呈显著正相关,与SOCS、SR、SBD呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性程度为 $SBD>SOC>CP>SOCS>SR$ 。



SOC、SOCS、SR、SBD、TP、CP指土壤有机碳含量、土壤有机碳储量、土壤有机碳层化率、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度。\*表示 $P\leq 0.05$ ,标尺上红色代表正相关、蓝色代表负相关。

SOC, SOCS, SR, SBD, TP and CP refer to soil organic carbon content, soil organic carbon storage, soil organic carbon stratification rate, soil total porosity, and soil capillary porosity, respectively. \* indicates  $P\leq 0.05$ . On the scale, red represents a positive correlation, and blue represents a negative correlation.

图8 不同轮作模式土壤各指标相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of soil indexes under different crop rotation modes

## 2.8 长期作物耕作对物理结构的影响

长期不同轮作系统对土壤容重的影响与2016年基础值相比结果见表2。可见:相较于2016年土壤容重,2022—2023年各深度土层中所有处理均呈提高趋势,其中S-M容重增加显著性最小、其次为M-M-P、S-M-P,P-P处理容重增加最显著。0—10 cm土层所有处理容重显著提高了13.95%~39.41%,

其中轮作处理显著提高了13.95%~37.42%( $P<0.05$ )。10—20 cm土层S-M-P、S-P、S-S及P-P处理容重显著提高了20.31%~30.82%( $P<0.05$ )。20—40 cm土层除M-M、M-M-P处理,其余处理容重显著提高了4.07%~28.10%( $P<0.05$ )。40—60 cm土层除M-M、S-M处理,其余处理容重显著提高了8.23%~20.01%( $P<0.05$ )。

表 2 长期作物耕作对土壤容重的影响

Table 2 Effect of long-term crop cultivation on soil bulk density

| 土层/cm<br>Soil depth | 2016 年土壤容重<br>Soil bulk density in 2016 | 2022—2023 年土壤容重<br>Soil bulk density in 2022-2023 |                           |                           |                           |                           |                             |                             |
|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                     |                                         | M-M                                               | S-S                       | P-P                       | S-M                       | S-P                       | M-M-P                       | S-M-P                       |
| 0—10                | 1.02±0.01 Bd                            | 1.21±0.01 Bc<br>0.01 Bc                           | 1.40±0.01 Aa<br>0.01 Aa   | 1.43±0.04 Ba<br>0.04 Ba   | 1.17±0.02 Cc<br>0.02 Cc   | 1.41±0.01 Aa<br>0.01 Aa   | 1.19±0.03 Cc<br>0.03 Cc     | 1.31±0.01 Bb<br>0.01 Bb     |
| 10—20               | 1.15±0.01 ABc                           | 1.23±0.03 Bc<br>0.03 Bc                           | 1.42±0.03 Aab<br>0.03 Aab | 1.51±0.02 ABa<br>0.02 ABa | 1.24±0.03 Bc<br>0.03 Bc   | 1.47±0.06 Aab<br>0.06 Aab | 1.27±0.03 Bc<br>0.03 Bc     | 1.39±0.05 ABb<br>0.05 ABb   |
| 20—40               | 1.22±0.13 ABd                           | 1.34±0.03 Abcd<br>0.03 Abcd                       | 1.44±0.03 Aab<br>0.03 Aab | 1.56±0.00 Aa<br>0.00 Aa   | 1.27±0.02 Bbc<br>0.02 Bbc | 1.52±0.02 Aa<br>0.02 Aa   | 1.28±0.02 Bbcd<br>0.02 Bbcd | 1.41±0.02 Aabc<br>0.02 Aabc |
| 40—60               | 1.33±0.00 Ad                            | 1.39±0.03 Acd<br>0.03 Acd                         | 1.46±0.03 Abc<br>0.03 Abc | 1.60±0.04 Aa<br>0.04 Aa   | 1.35±0.02 Ad<br>0.02 Ad   | 1.52±0.03 Aab<br>0.03 Aab | 1.50±0.2 Ab<br>2 Ab         | 1.44±0.02 Abc<br>0.02 Abc   |

注：表中不同大写字母表示同一处理中不同土层的指标在 0.05 水平上差异显著；不同小写字母表示同一土层中不同处理的指标在 0.05 水平上差异显著。表 3 同。

Note: Different uppercase letters in the table indicate significant differences at the 0.05 level among indicators for different soil layers within the same treatment; Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among indicators for different treatments within the same soil layer. The same in Table 3.

长期不同轮作系统对土壤总孔隙度的影响与 2016 年基础值相比结果见表 3。可见：相较于 2016 年土壤总孔隙度，2022—2023 年各深度土层中所有处理均呈降低趋势，其中 S-M 总孔隙度降低显著性最小、其次为 M-M-P、S-M-P，P-P 处理总孔隙度降低最显著。0—10 cm 土层所有处理总孔隙度显著降低了 5.56%~15.39% ( $P<0.05$ )，其中轮作处理显著降低了 5.56%~14.62% ( $P<0.05$ )。10—20 cm 土层除 M-M、S-M 处理，其余处理总孔隙度显著降低 4.36%~13.53% ( $P<0.05$ )。20—40 cm 土层除 S-M、M-M-P 处理，其余处理总孔隙度显著降低了 4.49%~12.93% ( $P<0.05$ )。40—60 cm 土层 S-S、M-M-P、S-P 及 P-P 处理显著降低了 5.58%~10.80% ( $P<0.05$ )。

表 3 长期作物耕作对土壤总孔隙度影响

Table 3 Effect of long-term crop cultivation on total soil porosity

| 土层/cm<br>Soil depth | 2016 年总孔隙度<br>Total porosity in 2016 | 2022—2023 年总孔隙度<br>Total porosity in 2022-2023 |                            |                            |                            |                            |                          |                            |
|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                     |                                      | M-M                                            | S-S                        | P-P                        | S-M                        | S-P                        | M-M-P                    | S-M-P                      |
| 0—10                | 61.55±0.01 Aa                        | 54.38±0.48 Ab<br>0.48 Ab                       | 47.28±0.55 Ad<br>0.55 Ad   | 46.16±1.64 Ad<br>1.64 Ad   | 56.00±0.71 Ab<br>0.71 Ab   | 46.94±0.49 Ad<br>0.49 Ad   | 55.24±1.17 Ab<br>1.17 Ab | 50.73±0.45 Ac<br>0.45 Ac   |
| 10—20               | 56.60±0.25 Ba                        | 53.43±1.28 Aab<br>1.28 Aab                     | 46.37±1.00 Acd<br>1.00 Acd | 43.07±0.69 ABd<br>0.69 ABd | 53.02±1.05 Bab<br>1.05 Bab | 44.55±2.30 Acd<br>2.30 Acd | 52.24±0.99 Bb<br>0.99 Bb | 47.64±1.98 ABc<br>1.98 ABc |
| 20—40               | 53.96±0.15 Ca                        | 49.47±0.95 Bb<br>0.95 Bb                       | 45.75±0.94 Ad<br>0.94 Ad   | 41.03±0.13 Bd<br>0.13 Bd   | 52.09±0.75 Ba<br>0.75 Ba   | 42.48±0.85 Ad<br>0.85 Ad   | 51.75±0.76 Ba<br>0.76 Ba | 46.66±0.68 Bc<br>0.68 Bc   |
| 40—60               | 50.57±0.25 Da                        | 47.66±1.08 Bab<br>1.08 Bab                     | 44.99±1.22 Abc<br>1.22 Abc | 39.77±1.63 Bd<br>1.63 Bd   | 48.94±0.91 Ca<br>0.91 Ca   | 42.71±1.09 Acd<br>1.09 Acd | 43.46±0.59 Cc<br>0.59 Cc | 45.68±0.63 Bbc<br>0.63 Bbc |

3 讨 论

3.1 作物轮作系统对土壤物理结构的影响

不同作物根系对土壤的穿透性不同，根系的分布可影响土壤物理结构，改善土壤板结状况，增大土壤透气性，调节土壤孔隙度及容重<sup>[28]</sup>。本研究发现与 2016 年播前相比，2022—2023 年各处理土壤容

重增加，孔隙度降低，连作处理对提升容重、降低总孔隙度的影响显著性高于轮作处理。与 Jin 等<sup>[29]</sup>研究一致，玉米-大豆长期轮作中土壤小粒径团聚体组分过多，使大孔隙比例降低，导致与播前相比容重增加。同年内，相较于 P-P 处理，M-M-P 处理可显著提高 0—40 cm 土层土壤总孔隙度，降低土壤容重，S-M 处理可对 0—60 cm 土层总孔隙度及容重产

生显著影响。2022及2023年研究表明M-M-P及S-M处理可显著提高0—10 cm土层毛管孔隙度,玉米、大豆参与的轮作模式对改善土壤物理结构有显著影响,豆科作物轮作可有效提高土壤结构聚集指数,增大土壤孔隙度<sup>[30]</sup>,与本研究一致。大豆-玉米及玉米-玉米-马铃薯轮作可使0—40 cm土壤容重降低、孔隙度增加,与豆科作物高C:N残留物加速分解有关,在短期内可使土壤有机质含量升高,改善土壤质量<sup>[31]</sup>。玉米-玉米-马铃薯轮作改善0—40 cm土层物理结构,可能与土壤深翻打破犁底层、疏松土质有关,使土壤孔隙度增大,玉米秸秆还田将更多的有机质保留在土壤中,使土壤有机碳含量增加。并且玉米与马铃薯根系分布形成互补,促进土壤团聚体的形成,玉米轮作虽对团聚体含量无显著影响,但可以提高团聚体中的碳氮含量<sup>[32]</sup>,是改善土壤物理结构的原因。本研究发现大豆-玉米轮作不仅可以改善表层土壤物理结构,对深层(>40 cm)土壤容重及孔隙度也可产生影响,可能是由于大豆属于直根系植物,其根系可深入土壤50—80 cm,根系可穿透更深的土层增加土壤孔隙度,玉米参与轮作可增加土壤孔隙度<sup>[33-34]</sup>,且大豆根系固氮菌使土壤生物量增加,综合玉米、大豆对土壤结构的影响进而改善土壤物理结构。郭金瑞等<sup>[35]</sup>进行的21年轮作研究表明,0—60 cm土层玉米连作土壤容重小于玉米-大豆轮作,总孔隙度玉米连作大于玉米-大豆轮作,但本研究中2023年0—60 cm各土层玉米连作土壤容重大于玉米-大豆轮作,总孔隙度玉米连作小于玉米-大豆轮作,可能与玉米连作秸秆还田量有关,大量秸秆还田增加土壤有机质含量、改善土壤物理结构降低土壤容重,且玉米与大豆不同秸秆在土壤中分解速度也不同,本研究进行6~7年的轮作试验,轮作周期的长短也是影响土壤物理结构变化的重要原因之一。

### 3.2 作物轮作系统对土壤有机碳的影响

有机碳是土壤有机质的重要组成部分,高有机碳含量有助于保持土壤的持水能力,改善土壤物理结构。本研究发现相较于P-P处理,S-M-P、M-M-P及S-M处理可显著提高0—40 cm土层有机碳含量,S-M-P可显著提高60—80 cm土层有机碳含量,S-M处理可显著提高80—100 cm土层有机碳含量。S-M-P可显著提高100 cm深度土层有机碳储量,S-P处理可提高表层有机碳储量,M-M-P可显著提高40—100 cm

深度有机碳储量。M-M-P及S-M-P可有效降低土壤SR1、SR2。SR3、SR4、SR5层化率,2023年均表现为大豆-玉米轮作处理处于层化率比值峰值。本研究中发现大豆-玉米轮作、大豆-玉米-马铃薯轮作及玉米-玉米-马铃薯轮作可有效提高表层土壤有机碳,其中大豆-玉米-马铃薯轮作不仅对表层有机碳含量提高有显著影响,也可提高深层有机碳含量。豆科作物参与轮作可使有机碳库增加7.1%~21.4%<sup>[36]</sup>,这与本研究大豆参与轮作使有机碳含量增加一致。豆科作物残留物养分含量要高于禾本科植物,进而使其在参与轮作中有助于提高土壤质量。此外,本研究中大豆-玉米轮作提高土壤有机碳含量,但有机碳储量并没有显著提高,有机碳含量增加可能与大豆为固氮作物有关,其参与轮作缓解土壤氮循环限制,土壤碳氮等获取酶活力提高,使土壤有机碳含量增加。研究表明大豆-玉米轮作可有效提高0—20 cm土层有机碳储量<sup>[37-38]</sup>,但本研究中0—20 cm土层大豆-玉米轮作土层有机碳储量的变化并无显著变化,可能由于大豆轮作增加土壤氮素矿化加快,加速有机碳分解,导致新有机碳输入进而增加有机碳含量,但整体碳储量未能得到提升<sup>[39]</sup>。玉米-玉米-马铃薯轮作使土壤有机碳升高的原因是由于玉米秸秆还田,使更多养分留在土壤中,提高土壤碳封存、土壤深翻使表层作物残留进入深层使有机碳含量及储量升高<sup>[40]</sup>。大豆秸秆作为高C:N残留物可被土壤微生物有效利用进而加速土壤碳氮循环,玉米碳投入比大豆高1.4~1.8倍,使得有更多的有机质储存在土壤中<sup>[41]</sup>。本研究中大豆-玉米-马铃薯轮作使表层及深层土壤有机碳含量及储量提高,可能由于大豆与玉米高碳投入、不同类型根系多样性的轮作使得深层土壤有机碳得到激活、秸秆还田高碳氮回报、团聚体稳定性的提高等有关。有机碳随土壤的加深而降低,本研究中,大豆-玉米-马铃薯及玉米-玉米-马铃薯轮作降低了表层有机碳层化率,显著提高了深层土壤层化率,SR3、SR4、SR5层化率2023年相较于2022年变化趋势发现,大豆-玉米轮作处理均为每土层层化率中的峰值,主要受表层有机碳变化的影响,2022年增加并不显著,但2023年大豆-玉米轮作0—10 cm土层土壤有机碳含量显著增加。说明大豆、玉米参与的轮作对改善表层土壤质量有积极作用。

### 3.3 作物轮作系统对土壤物理结构及有机碳相关性的影响

本研究结果表明,TP、CP与SOC互呈显著正

相关,SR、SBD与SOCS互呈显著正相关,SBD与TP、CP、SOC呈显著负相关。土壤孔隙度与土壤水分及养分的存储、运输有关,受到作物根系活动的影响,大孔隙度有利于土壤中空气的流通,保障植物根系呼吸及微生物活动,促进土壤养分循环,总孔隙度决定土壤中孔隙的总体数量和空间,为毛管孔隙的形成和发育提供了基础。毛管孔隙度的大小影响土壤细菌活动,调控土壤有机碳<sup>[42]</sup>。土壤容重能很好地反映土壤物理结构,容重增加,使土壤紧实度增加,孔隙度变小,限制根系生长及作物发育,不利于有机物质的分解和转化,导致土壤碳降低<sup>[43]</sup>。轮作处理提升土壤有机碳含量,增加土壤孔隙度,降低土壤容重,Xu等<sup>[44]</sup>研究表明土壤有机碳含量提升有助于大团聚体的形成,进而增大土壤孔隙度。土壤总孔隙度随有机碳含量的提高而提高,容重随有机碳含量的提高而降低<sup>[45]</sup>,土壤有机碳含量随土层加深而减低,导致土壤层化率升高。不同轮作模式改善土壤物理结构,提高有机碳含量及储量,提升土壤质量。

## 4 结 论

本研究以马铃薯连作为对照,探究不同轮作模式对土壤物理结构及有机碳影响变化。主要结论如下:

1)大豆-玉米及玉米-玉米-马铃薯轮作处理可有效改善土壤物理结构,大豆-玉米轮作可有效调节0—60 cm土层容重及孔隙度、玉米-玉米-马铃薯轮作可有效调节0—40 cm土层容重及孔隙度。

2)大豆-玉米、大豆-玉米-马铃薯及玉米-玉米-马铃薯轮作可有效提高土壤有机碳含量。大豆-玉米-马铃薯、大豆-马铃薯及玉米-玉米-马铃薯轮作处理可有效提高土壤有机碳储量。

3)玉米-玉米-马铃薯、大豆-玉米-马铃薯及大豆-玉米轮作处理使0—40 cm土层层化率降低,大豆-玉米轮作处理使40—100 cm土层层化率提升。综上,内蒙古农牧交错黑土区适宜的轮作模式为大豆-玉米,其次为玉米-玉米-马铃薯、大豆-玉米-马铃薯。

## 参考文献 References

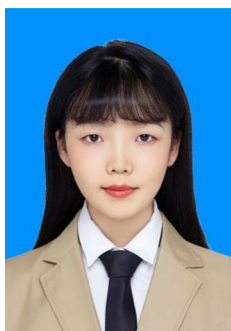
- [1] 刘安兵. 玉米产业生产现状与发展趋势分析[J]. 农民致富之友, 2017(23): 54-55  
Liu A B. Analysis of the current situation and development trend of corn industry production[J]. *Friends of Farmers' Wealth Creation*, 2017(23): 54-55 (in Chinese)

- [2] 孙义卓, 蔡姗姗, 陈雪丽, 王伟, 郭伟, 高中超, 刘媛媛, 刘慧莹, 孙海燕, 孙磊. 不同改良剂对黑土区大豆连作土壤养分平衡及细菌群落的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 127-135  
Sun Y Z, Cai S S, Chen X L, Wang W, Guo W, Gao Z C, Liu Y Y, Liu H Y, Sun H Y, Sun L. Effects of different amendments on bacterial communities and soil nutrients of soybean continuous cropping in black soil area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(4): 127-135 (in Chinese)
- [3] 庞泽, 田国奎, 王海艳, 李凤云, 潘阳, 丁凯鑫, 李明雪, 王立春. 我国马铃薯产业发展现状及展望[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 148-154  
Pang Z, Tian G K, Wang H Y, Li F Y, Pan Y, Ding K X, Li M X, Wang L C. Present situation and prospect of potato industry in China[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(7): 148-154 (in Chinese)
- [4] 杜国明, 姚鑫, 臧雷振. 东北黑土区耕作制度演变及其影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(4): 646-655  
Du G M, Yao X, Zang L Z. Evolution of farming system and its influencing factors in the black soil region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(4): 646-655 (in Chinese)
- [5] 仇少君, 郝小雨, 赵士诚, 徐新朋, 王秀斌, 何萍, 周卫. 黑土地肥力下降成因与保护利用对策: 基于养分资源高效利用视角分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(1): 1-11  
Qiu S J, Hao X Y, Zhao S C, Xu X P, Wang X B, He P, Zhou W. Causes of fertility decline and countermeasures for protection and utilization of upland black soil-an analysis from the perspective of nutrient resources high-efficient utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(1): 1-11 (in Chinese)
- [6] Lucas M, Schlüter S, Vogel H-J, Vetterlein D. Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16236
- [7] 苏会宁. 马铃薯连作障碍产生的原因与防治方法分析[J]. 种子科技, 2024, 42(10): 158-160  
Su H N. Analysis of the causes and control methods of continuous cropping obstacles in potatoes[J]. *Seed Science & Technology*, 2024, 42(10): 158-160 (in Chinese)
- [8] 郑孟静, 李岩, 贾秀领. 主要农作物多样化轮作制度研究进展及展望[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 215-221  
Zheng M J, Li Y, Jia X L. Research progress and perspective of diversified Crop rotation systems in main crops[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S1): 215-221 (in Chinese)
- [9] Panagos P, De Rosa D, Liakos L, Labouyrie M, Borrelli P, Ballabio C. Soil bulk density assessment in Europe [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 364: 108907
- [10] 王冰洁, 秦诗涵, 李德成, 胡文友, 姜军, 迟凤琴, 张超, 张久明, 徐英德, 汪景宽. 黑龙江省嫩江市土壤容重空间分布格局及传递函数构建[J]. 中国农业科学, 2025, 58(9): 1791-1803  
Wang B J, Qin S H, Li D C, Hu W Y, Jiang J, Chi F Q, Zhang C, Zhang J M, Xu Y D, Wang J K. Spatial distribution pattern and transfer function construction of soil bulk density in Nenjiang City, Heilongjiang province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(9): 1791-1803 (in Chinese)
- [11] Back P M, Jefferson J A, Ruhm T C, Blackwood B C. Effects of reclamation and deep ripping on soil bulk density and hydraulic conductivity at legacy surface mines in northeast Ohio, USA[J]. *Geoderma*, 2024, 442, 116788-116788
- [12] 张思培, 伊森, 王建国, 杨莎, 彭振英, 崔利, 张正, 郭峰, 张佳蕾, 万书波. 小麦-玉米II花生周年轮作对土壤理化性状和有机碳的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(3): 554-564  
Zhang S P, Yi M, Wang J G, Yang S, Peng Z Y, Cui L, Zhang Z, Guo F, Zhang J L, Wan S B. Effects of annual wheat-maize II peanut rotation on soil physicochemical properties and organic carbon[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(3): 554-564 (in Chinese)
- [13] 孙继英, 汝甲荣, 邱广伟, 王怀鹏, 刘玲玲, 孙旭红, 马子竣, 李明, 牛若超,

- 王立春. 黑龙江省西北部黑土区不同轮作模式效益分析[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(18): 5-9
- Sun J Y, Ru J R, Qiu G W, Wang H P, Liu L L, Sun X H, Ma Z J, Li M, Niu R C, Wang L C. Benefit analysis of different rotation patterns in black soil region of northwest Heilongjiang Province [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2023, 29(18): 5-9 (in Chinese)
- [14] 吴金芝, 黄修利, 侯园泉, 田文仲, 李俊红, 张洁, 李芳, 吕军杰, 姚宇卿, 付国占, 黄明, 李友军. 垄沟种植对旱地玉米-麦轮作体系生产力和土壤硝态氮累积量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2078-2091
- Wu J Z, Huang X L, Hou Y Q, Tian W Z, Li J H, Zhang J, Li F, Lü J J, Yao Y Q, Fu G Z, Huang M, Li Y J. Effects of ridge and furrow planting patterns on crop productivity and soil nitrate-N accumulation in dryland summer maize and winter wheat rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2078-2091 (in Chinese)
- [15] 樊博, 林丽, 曹广民, 柯得, 李以康, 杜若功, 郭小伟, 李茜, 钱大文, 兰玉婷, 周春丽. 不同演替状态下高寒草甸土壤物理性质与植物根系的相互关系[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2300-2309
- Fan B, Lin L, Cao G M, Ke X, Li Y K, Du Y G, Guo X W, Li Q, Qian D W, Lan Y T, Zhou C L. Relationship between plant roots and physical soil properties in alpine meadows at different degradation stages [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2300-2309 (in Chinese)
- [16] Yue L K, Wang Y, Wang L, Yao S H, Cong C, Ren L D, Zhang B. Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105166
- [17] 王籽懿, 韩伟, 金鸿彪, 黄修梅, 杨忠仁, 李淑池, 张凤兰. 高寒黑土区不同轮作模式对土壤团聚体及马铃薯产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(3): 191-198
- Wang Z Y, Han W, Jin H B, Huang X M, Yang Z R, Li M C, Zhang F L. Effects of different crop rotation patterns on soil aggregates and potato yield in alpine black soil areas [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(3): 191-198 (in Chinese)
- [18] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因素[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699
- Xie X L, Sun B, Zhou H Z, Li Z P. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 687-699 (in Chinese)
- [19] 刘亚军, 王文静, 李敏, 胡启国, 刘广卿, 孙喜云, 储凤丽. 甘薯不同轮作模式对土壤有机碳组分及碳转化酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(2): 65-74
- Liu Y J, Wang W J, Li M, Hu Q G, Liu G Q, Sun X Y, Chu F L. Effects of different rotation modes of sweet potato on soil organic carbon components and carbon conversion enzyme activities [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(2): 65-74 (in Chinese)
- [20] Panchal P, Preece C, Peñuelas J, Giri J. Soil carbon sequestration by root exudates [J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 749-757
- [21] Zhang X, Shen S W, Xue S Q, Hu Y S, Wang X D. Long-term tillage and cropping systems affect soil organic carbon components and mineralization in aggregates in semiarid regions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 231: 105742
- [22] Zhang H Y, Liu Q J, Liu S T, Li J J, Geng J B, Wang L Z. Key soil properties influencing infiltration capacity after long-term straw incorporation in a wheat (*Triticum aestivum* L.) - maize (*Zea mays* L.) rotation system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 344: 108301
- [23] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 王丽. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 880-894
- Bai W X, Li J, Wang Y L, Wang L. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in WeiBei highland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 880-894 (in Chinese)
- [24] 漆昊, 纪童, 何国兴, 徐贺光, 李娅丽, 杨卓丽, 汪云君, 马成龙, 李强, 柳小妮. 东祁连山山地草甸土壤物理性质对微量元素含量和退化程度的响应[J]. 草地学报, 2024, 32(3): 746-753
- Qi H, Ji T, He G X, Xu H G, Li Y L, Yang Z L, Wang Y J, Ma C L, Li Q, Liu X N. Response of soil physical properties to trace element content and degradation degree in mountain meadow of eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 746-753 (in Chinese)
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [26] 杨乾, 王秋红, 沈莹, 赵红香, 刘振, 宁堂原. 耕作方式与秸秆还田对土壤有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 农业科技与装备, 2024(5): 24-26
- Yang Q, Wang Q H, Shen Y, Zhao H X, Liu Z, Ning T Y. Effects of tillage methods and straw returning to field on soil organic carbon and particulate organic carbon [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2024 (5): 24-26 (in Chinese)
- [27] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2): 95-106
- [28] 刘芳, 王佩佩, 曹玉莹, 刘俊娥, 周正朝. 黄土高原典型草本植物根系分布特征及其对土壤理化性质的影响研究[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 1-13
- Liu F, Wang P P, Cao Y Y, Liu J E, Zhou Z C. Root distribution characteristics of typical herbaceous plants and their effects on soil physicochemical properties on the Loess Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(10): 1-13 (in Chinese)
- [29] Jin V L, Wienhold B J, Mikha M M, Schmer M R. Cropping system partially offsets tillage-related degradation of soil organic carbon and aggregate properties in a 30-yr rainfed agroecosystem [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 209
- [30] Nonxuba C S, Elephant D E, Nciizah A D, Manyevere A. Medium-term effects of tillage, crop rotation and crop residue management practices on selected soil physical properties in the sub-humid region of Eastern Cape, South Africa [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 248: 106420
- [31] Zheng F J, Liu X T, Ding W T, Song X J, Li S P, Wu X P. Positive effects of crop rotation on soil aggregation and associated organic carbon are mainly controlled by climate and initial soil carbon content: A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 355: 108600
- [32] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增, 李娜, 李雪峰. 轮作对黑土团聚体有机质光谱特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 208-214
- Zhang F T, Qiao Y F, Miao S J, Han X Z, Li N, Li X F. Effects of crop rotation on spectrum characteristics of organic matter in mollisol aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 208-214 (in Chinese)
- [33] Strock C F, Rangarajan H, Black C K, Schäfer E D, Lynch J P. Theoretical evidence that root penetration ability interacts with soil compaction regimes to affect nitrate capture [J]. *Annals of Botany*, 2022, 129(3): 315-330
- [34] Yue L K, Wang Y, Wang L, Yao S H, Cong C, Ren L D, Zhang B. Impacts of soil compaction and historical soybean variety growth on soil macropore structure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105166
- [35] 郭金瑞, 宋振伟, 高洪军, 闫孝贡, 朱平, 任军. 玉米大豆长期轮作对土壤物理特性与水热特征的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(2): 226-232
- Guo J R, Song Z W, Gao H J, Yan X G, Zhu P, Ren J. Effects of Long-term rotation of maize and soybean on soil physical properties and water and heat characteristics [J]. *Soybean Science*, 2017, 36(2): 226-232 (in Chinese)
- [36] Li G R, Tang X Q, Hou Q M, Li T, Xie H X, Lu Z Q, Zhang T S, Liao Y C, Wen X X. Response of soil organic carbon fractions to legume incorporation into cropping system and the factors affecting it: A global meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 342: 108231
- [37] 张佳麒, 王翠, 王明明, 潘凤娟, 郝翔翔, 隋跃宇. 长期秸秆还田条件下黑土有机碳的动态变化及其组分积累特征[J/OL]. 土壤学报, 1-13 [2024-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20241225.1149.002.html>
- Zhang J Q, Wang C, Wang M M, Pan F J, Hao X X, Sui Y Y. Temporal dynamics and fraction accumulation characteristics of black soil organic carbon under Long-term continuous straw return [J/OL]. *Acta Pedologica*

- Sinica*, 1-13[2025-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20241225.1149.002.html>(in Chinese)
- [38] Chen S J, Shi Z, Tian G Y, Li R H, Duan X H, Qin H Z, Cheng J, Yash Pal Dang, Lin J B, Zhao X, Zhang L H. From growth to decline: The dynamic effects of maize-based cropping systems on soil organic carbon storage in Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2025, 393
- [39] Yi B, Huang W J, Liebman M, Woods M, McDaniel M D, Lu C Q, VanLoocke A, Archontoulis S, Petersen B, Jian S Y, Poffenbarger H J, Gangsheng Wang, Yiqi Luo, Steven J. Hall. Diversified cropping systems with limited carbon accrual but increased nitrogen supply [J]. *Nature Sustainability*, 2025, 8(2): 1-10
- [40] Yao C C, Guo H J, Xu H H, Yang X Y, Yao Z S, Gu J X. Maize stalk incorporation increases N<sub>2</sub>O emissions that offset the benefit of SOC sequestration in a winter wheat–summer maize field: A four-year measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 352: 108507
- [41] Mazzilli R S, Kemanian R A, Ernst R O, Jackson B R, Pineiro G. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 273-281
- [42] 张维俊, 李双异, 徐英德, 刘旭, 安婷婷, 朱平, 彭畅, 汪景宽. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 1-9
- Zhang W J, Li S Y, Xu Y D, Liu X, An T T, Zhu P, Peng C, Wang J K. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9 (in Chinese)
- [43] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3903-3910
- Chai H, He N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3903-3910 (in Chinese)
- [44] Xu L Y, Yu Q B, Bai S J, Wang M Y, Sun W X, Xu S X, Shi X Z, Lu J P, Xie X Q, Qiu W W. Soil organic carbon impact on soil physical properties through quantity and quality modifications [J]. *Soil Advances*, 2024, 2: 100014
- [45] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 苏冬雪, 王莹, 邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5207-5216
- Zu Y G, Li R, Wang W J, Su D X, Wang Y, Qiu L. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



**第一作者简介:** 马鹤逍, 硕士研究生, 现就读于内蒙古大学生命科学学院生物学专业。本科毕业于太原师范学院, 在校期间参加大创项目, 获得第七届“创青春”中国青年创业大赛优秀奖(国赛)、第六届山西省“互联网+”大学生创新创业大赛铜奖(省赛)。



**通讯作者简介:** 张向前, 博士, 硕士生导师, 内蒙古自治区农牧业科学院研究员, 中国农业工程学会山区分会副理事长, 中国农学会耕作制度分会委员, 国家盐碱地创新联盟副理事长。主要从事土壤耕作、农业生态、农田污染治理等方面的研究工作。主持参加国家科技支撑、国家重点研发计划、国家自然科学基金以及内蒙古自治区科技计划重大专项等国家及省部级项目 30 余项。获国家科技进步奖二等奖 1 项, 内蒙古自治区科技进步特等奖 1 项, 内蒙古自治区科技进步奖一等奖 1 项, 中华农业科技一等奖 3 项, 全国农牧渔业丰收一等奖 1 项, 内蒙古自治区农牧业丰收一等奖 2 项等奖项 10 余项。获内蒙古自治区突出贡献专家、草原英才、“321”工程人才、内蒙古自治区青年创新人才等荣誉称号。授权专利 110 件, 登记软件著作权 47 项, 制定地方标准 80 余项; 发表论文 110 余篇, 参编著作 10 部; 研发科技成果 10 项; 审定认定品种 7 个。



**通讯作者简介:** 张德健, 博士, 内蒙古大学教授、博士生导师, 长期从事耕地保育与地力提升方面的科研工作。先后获国家百千万人才工程人选、国家突出贡献中青年专家、国务院政府特殊津贴专家、全国优秀科技工作者、自治区“草原英才”人选、内蒙古自治区深入生产第一线做出突出贡献科技人员、自治区新世纪“321 人才工程”一层次人选等多项称号。承担国家和自治区科技项目 42 项, 获得科技奖励 23 项; 授权专利 138 件; 出版专著 29 部; 发表论文 157 篇; 制定标准 62 项; 获得计算机软件著作权 30 项; 审定、登记品种 4 个。