

# 长期不同种植模式对黑土区土壤结构的影响

王文慧, 孟祥海\*, 王佰成, 张星哲, 杨冰, 时新瑞, 徐德海

(黑龙江省农业科学院牡丹江分院, 黑龙江 牡丹江 157020)

**摘要:**合理的种植有助于改变农田生态环境、改善土壤结构,对于农作物高效种植具有积极意义。为探明不同种植模式对土壤结构的影响,设置长期玉米连作、大豆连作和玉米—大豆—马铃薯(玉豆薯)轮作3个处理,对比多年连作、轮作模式下土壤容重、土壤含水量、土壤团聚体、土壤碳氮含量等指标变化。结果表明:玉米连作降低0~40 cm土壤容重,增加了0~10 cm耕层含水量,玉豆薯轮作在30~40 cm土层中含水量达到最大值,形成保水层;0~30 cm耕层中,玉豆薯轮作处理的广义土壤结构指数为99.60,无限趋近理想值,其三相比例最接近2:1:1;>0.25 mm的水稳性团聚体作为最理想的团聚体在0~50 cm土层中轮作处理比例显著高于连作处理,轮作对土壤碳氮含量影响较小。综上,玉豆薯轮作处理能够一定程度上改善土壤结构。

**关键词:**连作;轮作;容重;土壤团聚体

我国东北黑土地是全球仅有的四大块黑土区之一,典型黑土面积约 $1.85 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,其中面积分布最广的在黑龙江省,约占我国黑土地面积的56%<sup>[1]</sup>。2022年黑龙江省粮食种植面积达到 $1.47 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占全国12.4%,粮食总产量 $7.76 \times 10^{10} \text{ kg}$ ,连续13年位居全国第一,为“中国饭碗”保驾护航,这得益于沃野千里的黑土地<sup>[2-4]</sup>。但连年丰收的背后是不堪重负的黑土地。东北三大主栽作物是玉米、水稻和大豆,其中旱田作物中玉米的投入产出比更能为农户带来经济收益,且农户对玉米种植技术熟练程度高,因此玉米种植面积远远超过其他作物,连作种植不可避免;其次,为了保证产量与收益,化学肥料的用量持续增加,忽视有机肥的施用,以及不合理的耕种制度导致黑土地日益贫瘠,黑土地“变薄、变瘦、变硬”。为了保护黑土地生态环境,保证耕地可持续利用,国家多次强调将轮作落实到每一块农田<sup>[5]</sup>。近年来,水田与旱田、禾本科与豆科以及粮草轮作等种植模式持续开展,主要从土壤微生物方面阐述了轮作制度对保护耕地和提高产量的作用机理<sup>[6-11]</sup>,探索轮作在农业种植中如何发挥“用”“养”相结合的耕

种理念,本研究将马铃薯纳入轮作制中,增加轮作制度中作物多样性,发挥不同作物对土壤环境的差异性影响,对比玉米、大豆多年连作与玉米—大豆—马铃薯(玉豆薯)轮作对土壤物理结构和碳氮含量的影响,探寻适合当地可持续耕种模式,为轮作系统发展完善以及黑土地高效培育提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于黑龙江省牡丹江市温春镇黑龙江省农业科学院牡丹江分院土壤肥料试验基地(44.60' N, 129.58' E),该区土壤类型为草甸土,温带大陆性季风气候,雨热同期,年平均气温 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降水量500~600 mm。试验地基本概况见表1。

表1 试验地基本概况

容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	全氮 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1.36	1.51	0.71	2.53	117.6
有效磷 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH	有机质 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	
19.2	235	7.63	33.28	

### 1.2 试验材料

玉米品种为当地宜栽品种‘绿单4号’,播种量为 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,株距0.28 m,行距0.65 m,种

收稿日期: 2024-03-15; 录用日期: 2024-05-14

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2023-1-C006)。

作者简介: 王文慧(1997-), 研究实习员, 硕士研究生, 研究方向为资源利用与植物保护。E-mail: wangwenhui1411@126.com。

通讯作者: 孟祥海, E-mail: mengxianghai538@163.com。

植密度为 5.5 ~ 6.0 万株 · hm<sup>-2</sup>。氮肥选用尿素 (N 46%)，磷肥选用磷酸氢二铵 (N 18%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%)，钾肥选用氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%)。马铃薯品种为‘尤金’，氮肥选用尿素 (N 46%)，磷肥选用重过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45%)，钾肥选用氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%)。应用膜下滴灌水肥一体化栽培模式，垄距 0.8 m，株距 0.25 m，滴头间距 0.2 m，流速 1 ~ 2 L · h<sup>-1</sup>。大豆品种为‘牡豆 14’，垄距 0.65 m，株距 0.25 m，大豆选择 50% 含量专用肥料 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=13-26-11)。玉米季和大豆季雨养，无灌溉措施。于 5 月中旬播种，10 月上旬收获。

### 1.3 试验设计

试验设置玉米连作 (CCC)、大豆连作 (SSS)、玉豆薯轮作 (CSP) 共 3 个处理，自 2006 年设立长期定位试验区开始已经连续种植 18 年，玉豆薯轮作已经开展 6 轮。每个处理 3 次重复，总计 9 个小区。小区采用随机区组设计，每个小区面积 156 m<sup>2</sup> (12 垄，垄宽 0.65 m，垄长 20 m)。

试验于每年秋季进行秋整地，在作物收获后利用灭茬机将秸秆粉碎 5 ~ 10 cm，然后翻耕埋至 30 ~ 35 cm 深度土层中。试验所有处理年际间同一作物的施肥、品种及其他管理措施均相同。

### 1.4 测定指标与方法

试验于 2023 年 10 月 10 日作物收获后进行土样采集，每小区设 5 个取样点，取样深度为 0 ~ 50 cm，每 10 cm 取样 1 份，五点相同层次土样混匀带回。土样分为两部分，一部分直接用环刀取样测定土壤容重、含水量等指标，另一部分则取 500 g 带回进行团聚体测定。本试验土壤团聚体采用湿筛法，利用水稳式团粒分析仪进行操作。

土壤容重：利用直尺测量每个层次深度，铁锹挖出足够使用环刀的空间，每个小区 5 点重复，每个点 5 个层次，每层次取 1 环刀，按照标准环刀法取样带回实验室，称重计算<sup>[12]</sup>。土壤含水率：采用烘干法测定<sup>[12]</sup>。

土壤总孔隙度 (%) = (1 - 土壤容重 / 土壤比重) × 100，自然状态下土壤比重是 2.65 mg · m<sup>-3</sup><sup>[13]</sup>。

土壤三相比 = 固相 : 液相 : 气相 = (1 - 土壤总孔隙度) : (土壤质量含水量 × 容重) : [土壤总孔隙度 - (土壤质量含水量 × 容重)]<sup>[14]</sup>。

土壤有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法<sup>[14]</sup>；全氮的测定采用凯氏定氮法<sup>[14]</sup>。

广义土壤结构指数 (GSSI) 计算：

$$GSSI = [(X_g - 25) X_y X_q] \times 0.4769。$$

式中，X<sub>g</sub> 为固相体积百分比 (>25%)，X<sub>y</sub> 为液相体积百分比 (>0)，X<sub>q</sub> 为气相体积百分比 (>0)<sup>[15]</sup>。

>0.25 mm 的水稳性团聚体的含量 (WR<sub>0.25</sub>) 计算：

$$WR_{0.25} (\%) = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100$$

式中，M<sub>>0.25</sub> 为粒径大于 0.25 mm 团聚体质量 (g)；M<sub>T</sub> 为团聚体总质量 (g)<sup>[15]</sup>。

### 1.5 数据统计与分析

数据采用 Excel 2019 进行整理统计，使用 SPSS 26.0 进行数据主体间效应检验、单变量方差分析和 Duncan 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植模式对土壤容重和含水量的影响

种植模式对各耕层土壤容重影响显著 (表 2)，0 ~ 10 cm 耕层，SSS 处理土壤容重为 1.20 g · cm<sup>-3</sup>，显著高于 CSP 和 CCC 处理；10 ~ 20 cm 耕层，土壤容重表现为 SSS > CSP > CCC，SSS 处理土壤容重较 CSP 和 CCC 处理分别提高了 18.69%、10.23%；20 ~ 30 cm 耕层，CCC 处理土壤容重显著增加，较 SSS 和 CSP 处理分别增加了 0.10 和 0.19 g · cm<sup>-3</sup>；30 ~ 40 cm 土层，CSP 处理土壤容重为 1.48 g · cm<sup>-3</sup>，显著高于连作处理；40 ~ 50 cm 土层不同种植模式的土壤容重保持在 1.30 ~ 1.37 g · cm<sup>-3</sup> 之间，起伏较小，容重趋于稳定。对比相同模式不同耕层土壤容重变化可以发现，CCC 处理土壤容重随着土层加深表现为先增加后降低再增加的趋势，0 ~ 20 cm 土壤容重较小且变化平缓，在 20 ~ 30 cm 耕层土壤容重陡然增加；SSS 处理土壤容重在 0 ~ 50 cm 土层呈现出先增加后降低的趋势，在 20 ~ 40 cm 深度，土壤容重较为稳定；CSP 处理土壤容重在 0 ~ 50 cm 土层中变化较为平缓，呈现逐步升高后又降低的趋势，在 30 ~ 40 cm 处达到最高，为 1.48 g · cm<sup>-3</sup>。通过主体间效应检验，土壤容重对种植模式和土层深度的响应十分敏感，双因素共同作用对土壤容重的影响显著 (P < 0.01)。综上，不同种植模式对土壤容重的影响不同，CSP 处理能够改善土壤结构，降低土壤容重在各耕层间的急剧变化。

表 2 不同种植模式对各土层土壤容重和含水量的影响

土层深度 (cm)	种植 模式	土壤容重 (g · cm <sup>-3</sup> )		土壤含水量 (%)	
		平均值	标准差	平均值	标准差
0 ~ 10	CCC	1.02b	0.0553	19.02a	0.0299
	SSS	1.20a	0.0217	14.53b	0.0031
	CSP	1.07b	0.0252	13.95b	0.0341
10 ~ 20	CCC	1.07b	0.0302	18.70a	0.0166
	SSS	1.27a	0.0234	19.83a	0.0058
	CSP	1.14b	0.0068	20.08a	0.0146
20 ~ 30	CCC	1.46a	0.0123	18.32a	0.0540
	SSS	1.36b	0.0140	21.70a	0.0100
	CSP	1.27c	0.0347	20.82a	0.0117
30 ~ 40	CCC	1.25c	0.0656	23.32a	0.0224
	SSS	1.37b	0.0409	23.07a	0.0049
	CSP	1.48a	0.0400	21.51a	0.0132
40 ~ 50	CCC	1.37a	0.0299	22.13a	0.0218
	SSS	1.34a	0.0285	23.90a	0.0010
	CSP	1.30a	0.0284	18.47b	0.0613
主体间效应检验		土壤容重		土壤含水量	
种植模式		0.000**		0.481	
土层深度		0.000**		0.000**	
土层深度 × 种植模式		0.000**		0.229	

注：同一土层字母不同表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，\*\*表示在 0.01 水平上存在显著性差异。下同。

种植模式对各土层含水量的影响较小 (表 2)，CCC 处理土壤含水量于耕层 0 ~ 10 cm 处最大，为 19.02%，显著高于 CSP 和 SSS 处理；10 ~ 50 cm，不同种植模式下土壤含水量差异较小；对比相同模式不同耕层土壤含水量变化可以发现，SSS 处理土壤含水量随土层深度增加而增加；CSP 处理土壤含水量在 0 ~ 50 cm 土壤剖面表现为先增后减的趋势，在 30 ~ 40 cm 处达到最高。通过主体间效应检验，耕层深度对土壤含水量的影响显著 ( $P < 0.01$ )，30 ~ 50 cm 土壤含水量显著高于 0 ~ 30 cm，且随着土层深度加深含水量呈增加趋势，种植模式对土壤含水量的影响不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ )，双因素共同作用下土壤含水量  $P$  值为 0.229，差异不显著。综上可得，不同轮作模式对土壤含水量影响较小。

### 2.2 不同种植模式对剖面土壤三相结构的影响

不同种植模式对剖面土壤三相结构的影响见表 3，0 ~ 30 cm 土层，固液气三相比最接近 2 : 1 : 1 的为 CSP 处理，0 ~ 10 cm 处固相 : 液相 : 气相为 46.83% : 17.37% : 35.80%，GSSI 为 CSP > CCC > SSS，CSP 处理最高，为 93.39，显著高于其他处理；10 ~ 20 cm 处 CSP 处理固相 : 液相 : 气相为 47.23% : 25.27% : 27.49%，其 GSSI 为

表 3 不同种植模式对剖面土壤三相结构的影响

土层深度 (cm)	种植模式	土壤固相 (%)	土壤液相 (%)	土壤气相 (%)	GSSI
0 ~ 10	CCC	38.41 ± 2.09b	19.38 ± 3.39a	42.21 ± 4.71a	83.79 ± 7.04b
	SSS	40.55 ± 0.95b	15.04 ± 3.95b	44.40 ± 4.85a	81.47 ± 8.94b
	CSP	46.83 ± 1.80a	17.37 ± 0.26b	35.80 ± 1.59b	93.39 ± 1.05a
10 ~ 20	CCC	40.46 ± 1.14c	20.06 ± 2.04b	39.48 ± 2.81a	88.79 ± 3.40c
	SSS	43.08 ± 0.25b	22.93 ± 1.77b	33.99 ± 1.96b	95.06 ± 1.45b
	CSP	47.23 ± 1.27a	25.27 ± 1.04a	27.49 ± 1.20c	99.36 ± 0.44a
20 ~ 30	CCC	54.97 ± 0.46a	26.68 ± 7.86b	18.35 ± 7.87b	93.00 ± 3.45b
	SSS	54.63 ± 2.81a	29.60 ± 1.67a	15.77 ± 2.60b	93.79 ± 3.82b
	CSP	47.86 ± 1.31b	26.38 ± 1.14b	25.76 ± 1.54a	99.60 ± 0.30a
30 ~ 40	CCC	47.31 ± 2.47a	29.13 ± 1.20a	23.56 ± 1.32a	98.77 ± 0.98a
	SSS	48.43 ± 1.01a	31.54 ± 0.31a	20.03 ± 0.78b	97.40 ± 0.18a
	CSP	50.77 ± 1.51a	30.80 ± 2.35a	18.44 ± 3.49b	96.94 ± 6.50a
40 ~ 50	CCC	51.58 ± 0.82a	30.28 ± 3.37a	18.14 ± 4.09b	95.90 ± 3.66a
	SSS	50.67 ± 0.70a	32.07 ± 0.58a	17.26 ± 1.28b	95.48 ± 1.33a
	CSP	48.95 ± 1.07a	23.96 ± 7.95b	27.08 ± 8.15a	96.46 ± 4.75a
主体间效应检验		土壤固相	土壤液相	土壤气相	GSSI
种植模式		0.000*	0.058	0.001*	0.022*
土层深度		0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
土层深度 × 种植模式		0.000*	0.252	0.001*	0.002*

注：\*表示在 0.05 水平上存在显著性差异，下同。GSSI 为广义土壤结构指数。

99.36, 最接近理想值; 20 ~ 30 cm 土层, CSP 处理的固相占比略低于 CCC 和 SSS 处理, 为 47.86%, 其土壤三相比例最接近旱田理想值, 且 GSSI 显著高于 CCC 和 SSS 处理, 为 99.60。30 ~ 40 cm 土层, 对比三处理可以发现 CSP 处理固相占比最高, 达到 50.77%, 气相占比显著低于其他处理, 土壤三相结构指数略低于 CCC 和 SSS 处理, 差异不显著。40 ~ 50 cm 处理, CSP 固液气三相比为 48.95% : 23.96% : 27.08%, GSSI 为 96.46, 更趋于理想值。纵向对比不同层次相同处理三相结构状态可以发现, 土壤固相与液相占比在 20 ~ 50 cm 土层显著高于 0 ~ 20 cm 耕层, 气相占比反之, CSP 处理的 GSSI 在 0 ~ 30 cm 耕层无限接近理想状态。通过主体间效应检验, 种植模式对土壤液相的影响较小 ( $P>0.05$ ), 对土壤固相、气相和 GSSI 在 0.05 水平上影响显著; 土层深度对土壤三相存在显著影响, 土壤三相结构对双因素共同作用响应较为敏感。

2.3 不同种植模式对剖面土壤团聚体的影响

分别对比不同层次土壤团聚体分布比例 (表 4), 0 ~ 10 cm 土层, CSP 处理的 0.25 ~ 2、0.53 ~ 0.25 mm 土壤团聚体含量显著高于其余两处理, <0.053 mm 土

壤团聚体含量显著高于 CCC 处理,  $WR_{0.25}$  较 CCC 和 SSS 处理分别提高了 39.78%、6.99%。10 ~ 20 cm 土层, 大团聚体 (>0.25 mm) 比例 CSP 处理优于其他两处理, <0.25 mm 的微团聚体表现为  $CSP<CCC<SSS$ , 且三处理间差异显著。20 ~ 30 cm 土层, CSP 处理 >2 mm 和  $WR_{0.25}$  团聚体显著高于连作处理, >0.25 mm 的水稳性团聚体较 CCC 和 SSS 处理显著提高了 23.80%、5.37%, <0.25 mm 的微团聚体占比  $CSP>SSS>CCC$ , 差异显著 ( $P<0.05$ )。30 ~ 40 cm 土层, >0.25 mm 的水稳性团聚体 CSP 处理高于 CCC 与 SSS 处理, 增幅分别为 31.76%、66.26%。40 ~ 50 cm 土层, CSP 处理各级土壤团聚体占比均显著高于 SSS 和 CCC 处理 (除 >2 mm), >0.25 mm 的水稳性团聚体较二者显著提高了 135.07%、32.84%。不同种植模式对土壤团聚体影响大不相同, 纵观整个耕层可以发现: >0.25 mm 的水稳性团聚体含量表现出  $CSP>SSS>CCC$ , 且三者差异显著 ( $P<0.05$ ); 在 0 ~ 50 cm 不同土层深度水稳性团聚体则表现出 20 ~ 30 cm 土层最多, 10 ~ 20 cm 土层次之, 0 ~ 10 cm 土层最少, 各层次间差异显著 ( $P<0.05$ ), 主体间效应检验显示种植模式、土层深度及二者交互作用对各级土壤团聚体均存在显著影响。

表 4 不同种植模式下各土层土壤团聚体分布比例

土层深度 (cm)	种植模式	团聚体分布 (%)				$WR_{0.25}$ (%)
		>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	
0 ~ 10	CCC	17.09a	21.57c	23.76b	14.59b	38.66c
	SSS	15.32a	35.20b	8.68c	18.84a	50.51b
	CSP	16.11a	37.79a	27.30a	18.65a	54.04a
10 ~ 20	CCC	32.29b	21.91b	14.01b	8.30b	54.20c
	SSS	13.72c	49.82a	20.22a	15.11a	63.10b
	CSP	40.26a	48.95a	3.92c	4.79c	89.20a
20 ~ 30	CCC	20.68b	42.42b	15.04a	14.03a	63.54c
	SSS	20.32b	54.33a	11.35b	5.62b	74.65b
	CSP	70.29a	8.38c	3.79c	2.14c	78.66a
30 ~ 40	CCC	12.56b	36.20a	13.42a	7.16a	48.76c
	SSS	41.52a	20.01b	7.92a	4.21b	61.53b
	CSP	55.22a	25.85b	9.16a	8.82a	81.07a
40 ~ 50	CCC	25.22a	27.15b	13.43b	6.14b	52.38b
	SSS	3.73b	25.87b	13.08b	10.00b	29.60c
	CSP	26.00a	43.58a	15.69a	14.12a	69.58a
主体间效应检验		>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	$WR_{0.25}$
种植模式		0.000 <sup>*</sup>				
土层深度		0.000 <sup>*</sup>				
土层深度 × 种植模式		0.000 <sup>*</sup>				

注:  $WR_{0.25}$  为 >0.25 mm 的水稳性大团聚体含量。

#### 2.4 不同种植模式对剖面土壤有机碳和全氮的影响

如图 1 所示, 不同种植模式下 0 ~ 50 cm 剖面土壤有机碳含量随着深度加深而减少, 各处理间呈现出 CCC 处理土壤有机碳含量高于 SSS 处理, 高于 CSP 处理。不同土层深度 CCC 处理土壤有机碳含量比 SSS 处理高 0.68 ~ 1.56  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 且差异显著 (除 10 ~ 20 cm); 0 ~ 50 cm 土层 CCC 处理土壤有机碳含量显著高于 CSP 处理, 较 CSP 处理增加了 1.04 ~ 2.69  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; SSS 处理土壤有机碳较 CSP 处理在 0 ~ 40 cm 处增加了 0.74 ~ 1.13  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综上, 玉米连作处理的土壤有机碳含量高于大豆连作与玉豆薯轮作。

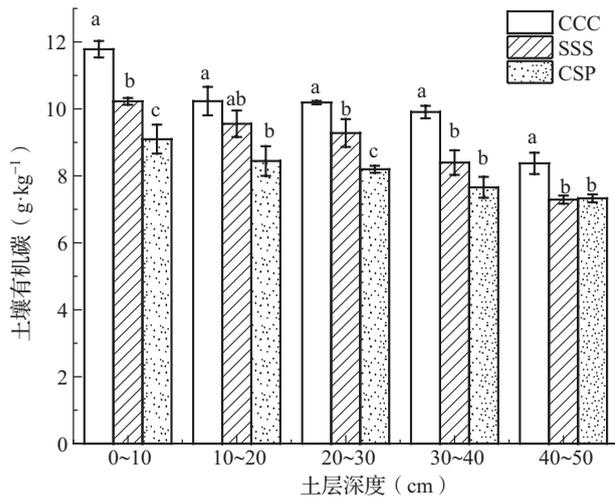


图 1 不同种植模式下各土层有机碳含量

注: 同一土层柱上不同小写字母代表处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

土壤全氮随着土层深度加深呈逐渐下降的趋势 (图 2)。从图中可以看出, CCC 处理土壤全氮在 0 ~ 10 cm 较 SSS 处理显著增加了 0.28  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较 CSP 处理增加 0.06  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但差异不显著。0 ~ 50 cm

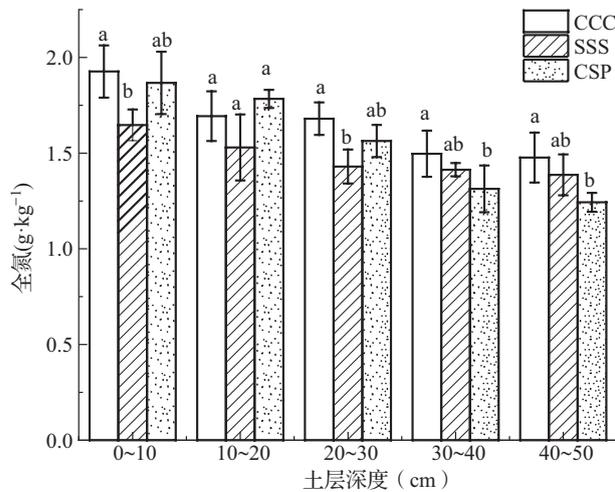


图 2 不同种植模式下各土层全氮含量

土层 CCC 处理全氮含量始终高于 SSS 处理, 在 30 ~ 50 cm 处呈现出 CCC>SSS>CSP, 略有差异但不显著。纵观整个土壤剖面, 玉米连作处理的土壤全氮含量优于大豆连作和玉豆薯轮作。

### 3 讨论

#### 3.1 种植模式与剖面土壤容重之间的关系

诸多研究证明种植模式对耕地土壤可持续利用有很大影响, 连作对同一养分的过度消耗造成地力不均, 其次同种作物对土壤结构的影响也是不容忽视的<sup>[16-18]</sup>。本试验研究结果表明, 玉米连作在 0 ~ 40 cm 土层土壤容重低于大豆连作与玉豆薯轮作, 与郭金瑞等<sup>[19]</sup>的研究结果相似, 其原因一是玉米为须根系作物, 较其他作物根系更加发达, 对土壤孔隙结构影响较大, 使得土壤疏松, 容重降低; 二是试验地秋季秸秆打碎直接还田的因素, 玉米秸秆量大, 还田后对土壤疏松程度有很大影响。容重随土层深度加深也有不同变化趋势, 玉米连作容量先增后减再增, 大豆连作和玉豆薯轮作容量呈倒“V”形曲线变化, 但均在 0 ~ 20 cm 处容重偏低, 因耕种过程中人为扰动影响了土壤松散程度, 使得土壤容重降低, 这与柏炜霞<sup>[20]</sup>在耕种模式研究中得到的结果相吻合。

#### 3.2 种植模式与剖面土壤含水量之间的关系

土壤含水量结果表明, 0 ~ 10 cm 土层玉米连作处理含水量显著高于其他处理, 因其须根系发达、容重小、孔隙多, 致使储水空间大。此外, 玉豆薯轮作在 30 ~ 40 cm 土层处含水量达到最大值, 形成明显的保水层, 说明种植对土壤结构有所改善, 提高了土壤保水性能。陈琛<sup>[21]</sup>指出豆科作物在轮作系统中能够起到蓄水保肥的作用。

#### 3.3 种植模式与剖面土壤三相结构比例之间的关系

不同种植模式对土壤三相结构比例也存在一定影响, 本试验结果表明 0 ~ 30 cm 土层中玉豆薯轮作处理的固液气三相比例较连作处理更接近旱田的 2:1:1, GSSI 无限趋近 100, 土壤结构更合理, 分析原因可能是轮作处理通过根系物理作用以及分泌物影响了土壤中团聚体的形成, 从而改善土壤三相存在比例<sup>[22-25]</sup>。

#### 3.4 种植模式与剖面土壤团聚体数量之间的关系

轮作制度能够有效改善土壤团聚体数量, 改善土壤团粒结构<sup>[26-27]</sup>。范倩玉<sup>[28]</sup>研究指出轮作处理提

高 0 ~ 40 cm 土层团聚体结构稳定性, 白怡婧等<sup>[29]</sup> 研究表明小麦玉米轮作能够改善土壤团聚体结构, 增加团聚体稳定性, 本研究中玉豆薯轮作在 0 ~ 50 cm 土层中  $WR_{0.25}$  含量高于连作处理, 这一结果与前人研究一致, 其原因可能是轮作系统中长期不同作物根系分泌物、秋季秸秆还田后作用于土壤增加土壤有机质含量, 有机质胶结土壤中微小颗粒, 形成稳定的团聚体结构。

### 3.5 种植模式与剖面土壤有机碳、全氮含量之间的关系

试验中 0 ~ 50 cm 土壤有机碳和全氮含量结果显示玉米连作高于大豆连作和玉豆薯轮作, 因试验区秋季作物收获后会将秸秆全部还田, 玉米秸秆是大豆的 3 倍, 且玉米秸秆碳氮比高于大豆, 所以会出现连作较轮作碳氮含量高的现象。谢泽宇等<sup>[30]</sup> 研究不同粮草种植模式中指出苜蓿连作较轮作更有利于土壤中碳、氮的积累, 于淑婷<sup>[31]</sup> 在华北轮作制度的研究中指出土壤中碳、氮有一部分来源于作物秸秆, 玉米残体投入量大, 地块碳、氮含量高, 本试验结果与之相似。

## 4 结论

玉米连作较大豆连作和玉豆薯轮作相比降低 0 ~ 40 cm 处土壤容重; 玉豆薯轮作在 30 ~ 40 cm 含水量最高, 形成明显保水层; 在土壤三相结构中玉豆薯轮作三相比以及 GSSI 较连作处理更合理, 0 ~ 30 cm 土层中, GSSI 无限趋近理想值 100; 土壤团粒结构中玉豆薯轮作  $>0.25$  mm 的水稳性团聚体在 0 ~ 50 cm 土层中比例显著高于玉米连作与大豆连作; 土壤有机碳和全氮含量在 0 ~ 50 cm 土层中表现为玉米连作优于大豆连作和玉豆薯轮作。综合各指标结果, 玉豆薯轮作能够一定程度上改善土壤结构, 增加土壤团聚体含量, 但是对土壤碳、氮含量的影响较小。

### 参考文献:

- [1] 薛濡壕. 多元主体协同下东北黑土区耕地种植生态补偿机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [2] 谢永刚, 孙磊. 黑土地之经济高质量发展及其保护的动态评价研究 [J]. 求是学刊, 2023, 50 (3): 96-106.
- [3] 陈斯. 给黑土地加油, 为东北粮仓蓄力 [J]. 中国农机监理, 2020 (4): 37-39.
- [4] 沈伟玲, 杨叶春. 粮食安全背景下稻经种植模式的价值、困境及路径 [J]. 四川农业科技, 2023 (8): 14-17.
- [5] 怀宝东. 基于乡村振兴战略背景统筹推进我国东北黑土地保护性利用对策研究 [J]. 现代化农业, 2023 (8): 25-27.
- [6] Zhou Z, Palmborg C, Ericson L, et al. A 60-years old field experiment demonstrates the benefit of leys in the crop rotation [J]. Taylor & Francis, 2019 (1): 36-42.
- [7] 石铭福. 轮作豆科作物对连作马铃薯土壤与微生物群落的调节机制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [8] 常玉明. 吉林省长期玉米连作土壤微生物的空间分布特征及驱动因素 [D]. 吉林: 吉林农业大学, 2021.
- [9] 侯喜庆, 禹桃兵, 王培欣, 等. 种植模式对冬小麦根际和非根际土壤氨氧化微生物群落多样性和组成的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43 (23): 9900-9911.
- [10] Gan Y, Hamel C, Cutforth H, et al. Diversifying crop rotations with pulses enhances system productivity [J]. Crops & Soils, 2016, 49: 6-10.
- [11] 张飞飞. 苦荞绿豆轮作和肥料配施缓解其连作障碍的效应研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [12] 吕贻忠, 李保国. 土壤学实验 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 44-46.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [14] 李科, 李志军. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020: 38-39.
- [15] 张元红. 渭北旱地麦玉轮 / 连作田长期土壤轮耕固碳蓄水增产效应及其机理研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
- [16] 孙小花, 胡新元, 陆立银, 等. 黄土高原马铃薯不同连作年限土壤理化性质及微生物特性 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37 (4): 184-192.
- [17] 耿赛男, 李岚涛, 苗玉红, 等. 大豆和玉米影响后茬作物氮素供应的研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28 (5): 919-932.
- [18] 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (1): 1-5.
- [19] 郭金瑞, 宋振伟, 高洪军, 等. 玉米大豆长期种植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.
- [20] 柏炜霞. 渭北旱塬小麦玉米种植制保护性耕作与轮耕效应研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [21] 陈琛. 不同种植模式对土壤团聚体分布、微生物多样性及产量的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- [22] 常新刚, 黄国勤, 熊云明, 等. 双季稻与黑麦草旱种植的产量和土壤理化性状分析 [J]. 耕作与栽培, 2005 (4): 16-17.
- [23] 赵秋. 天津地区冬绿肥 - 春玉米种植模式的生态过程与效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [24] 袁静超, 刘剑钊, 程松, 等. 长期玉米连作下不同产量水平 0-100 cm 土层黑土与淡黑钙土理化性状差异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (5): 802-813.
- [25] 白伟, 孙占祥, 张立祯, 等. 耕层构造对土壤三相和春玉米根系形态的影响 [J]. 作物学报, 2020, 46 (5): 759-



- 771.
- [26] Zhang-Liu D U , Tu-Sheng R , Chun-Sheng H U , et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the north China plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12 ( 11 ): 2114-2123.
- [27] 李春越, 常顺, 钟凡心, 等. 种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32 ( 1 ): 191-200.
- [28] 范倩玉. 不同轮作模式对晋北高寒山区土壤物理结构、有机碳及相关酶活性的影响 [D]. 太原: 山西农业大学, 2021.
- [29] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响 [J]. *土壤*, 2021, 53 ( 1 ): 161-167.
- [30] 谢泽宇, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 黄土高原不同粮草种植模式土壤碳氮及土壤酶活性 [J]. *草业科学*, 2017, 34 ( 11 ): 2191-2199.
- [31] 于淑婷. 华北轮作制度转换下土壤微生物群落及作物产量变化机制研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.

**The effects of long-term different planting patterns on soil structure in black soil areas**

WANG Wen-hui, MENG Xiang-hai\*, WANG Bai-cheng, ZHANG Xing-zhe, YANG Bing, SHI Xin-rui, XU De-hai (Mudanjiang Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Mudanjiang Heilongjiang 157020)

**Abstract:** Reasonable planting patterns helps to change the ecological environment of farmland, improve soil structure, and has positive significance for efficient crop cultivation. To investigate the effects of different planting patterns on soil structure, three treatments were set up: long-term maize continuous cropping, soybean continuous cropping, and maize-soybean-potato rotation. The changes in soil bulk density, soil water content, soil aggregates, and soil carbon and nitrogen content were compared under long-term continuous cropping and crop rotation modes. The results showed that continuous cropping of corn reduced soil bulk density in 0-40 cm and increased soil moisture content in 0-10 cm. The rotation of maize-soybean-potato reached its maximum moisture content in the 30-40 cm soil layer, forming a water retaining layer; In the 0-30 cm cultivation layer, the generalized soil structure index of the maize-soybean-potato rotation treatment was 99.60, infinitely approaching the ideal value, and its three-phase ratio was closest to 2 : 1 : 1; >0.25 mm water stable aggregates, as the most ideal aggregate, had a significantly higher proportion of rotation treatment in the 0-50 cm soil layer than continuous cropping treatment, and rotation had a relatively lower impact on soil carbon and nitrogen content. In summary, the rotation of maize-soybean-potato could improve soil structure to a certain extent.

**Key words:** continuous cropping; crop rotation; bulk density; soil aggregates