

甘薯不同轮作模式对土壤团聚体稳定性及碳、氮含量的影响

刘亚军 王文静 胡启国 马婷婷 储凤丽

(商丘市农林科学院, 476000, 河南商丘)

摘要 为研究甘薯不同轮作模式对土壤团聚体稳定性与碳、氮含量的影响, 2019–2023 年通过田间定位试验, 研究甘薯/小麦 (CK) 两熟复种连作与油菜 (SWR)、玉米 (SWC)、花生 (SWP) 轮作对 0–20 和 0–40 cm 土壤团聚体组成、稳定性与碳、氮含量及贡献率的影响。结果表明, 与 CK 处理相比, 不同轮作处理均可提高 0–40 cm 土层[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体含量以及各粒级团聚体与全土有机碳、全氮含量, 提升土壤团聚体稳定性与[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体有机碳和全氮贡献率。其中, 0–20 cm 土层, 与 CK 处理相比, 不同轮作处理 > 0.25 mm 粒级团聚体含量 ($R_{>0.25}$) 显著提高 8.34%~16.70%, ≥ 2.00 mm 粒级有机碳贡献率显著提高 10.48%~21.00%, SWC 和 SWP 处理 ≥ 2.00 mm 粒级全氮贡献率分别显著提高 21.40%和 23.89%, SWP 处理[0.25, 2.00) mm 粒级有机碳和全氮贡献率分别显著提高 15.67%和 12.52%。RDA 分析表明, 土壤团聚体组成变化与团聚体稳定性及碳、氮贡献率紧密相关, 其中, [0.25, 2.00) mm 粒级团聚体 (82.8%) 是主要驱动因子。由此可知, 甘薯合理轮作可以改善土壤团聚体组成分布, 提升团聚体稳定性, 提高 ≥ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳、全氮含量及贡献率。

关键词 甘薯; 轮作; 团聚体; 有机碳; 全氮

甘薯是我国重要的粮食作物^[1-2]。近年来, 随着甘薯加工业的发展与进步, 人们对其有了新的认识, 高品质鲜食型、淀粉型甘薯备受人们追捧, 甘薯需求量逐年加大, 甘薯种植业表现出较好的发展前景^[3-4]。受气候条件、耕地面积和种植结构等因素限制, 豫东地区甘薯种植地块常年与小麦连作种植, 但甘薯忌连作, 常年连作会导致土壤板结、肥力下降, 根腐病、茎线虫病等土传病害也会频繁发生, 在一定程度上增加了甘薯生产风险, 降低了农户甘薯种植积极性^[5-7]。连作障碍已成为限制甘薯产业健康发展的重要问题。合理轮作是解决或缓解作物连作障碍的有效途径。张思培等^[8]研究表明, 小麦/玉米/花生周年轮作可以降低表层土壤容重, 改善土壤团聚体结构, 增加 0–60 cm 土壤有机碳含量, 促进作物生长发育。李冉等^[9]研究表明, 稻豆轮作可以改善土壤微生物菌群结构, 促进难溶有机质分解, 提高土壤速效养分有效性以及作物产量。也有研究^[10]表明, 合理轮作可以改善土壤团聚体稳定性, 提升土壤碳、氮养分利用率。由此可见, 作物合理轮作可以改善土壤结构, 提高土壤碳、氮养分含量, 促进作物

生长发育。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其组成分布变化会影响团聚体稳定性, 也是评价土壤结构好坏的重要指标^[11-12]。土壤有机碳、全氮是土壤功能与质量的核心物质, 也是评价土壤肥力的重要指标^[13]。研究^[14-15]表明, 土壤团聚体与土壤碳、氮密切相关。其中, 土壤团聚体是土壤有机碳与全氮的重要储存场所, 可以为其形成提供物理及化学保护, 而土壤有机碳可以提供丰富的胶结物质, 能够促进团聚体形成。因此, 研究土壤团聚体及碳、氮含量变化对演变农田土壤肥力具有一定的意义。

目前, 关于甘薯轮作方面的研究主要集中在土壤理化性质、酶活性、微生物菌群以及甘薯生长发育方面^[16-17], 而关于土壤团聚体及碳、氮含量方面的研究鲜见报道。因此, 本研究以甘薯/小麦连作为对照, 设甘薯/小麦/甘薯/油菜、甘薯/小麦/玉米/小麦、甘薯/小麦/花生/小麦 3 种轮作模式, 研究土壤团聚体分布、稳定性以及碳、氮含量的变化规律, 以期改善土壤结构, 提高土壤肥力, 为豫东地区甘薯轮作模式合理选择提供理论依据。

作者简介: 刘亚军, 主要从事甘薯新品种选育及栽培研究, E-mail: liuyajun0812@163.com

胡启国为通信作者, 主要从事甘薯新品种选育及利用工作, E-mail: huqiguol234@126.com

基金项目: 现代农业产业技术体系“国家甘薯产业技术体系”项目 (CARS-10); 中央引导地方 (河南) 科技发展资金项目 (Z20231811128)

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-06-04; 网络出版日期: 2025-07-18

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于河南省商丘市双八镇（39°39' N、116°38' E），该地位于河南省东部，属暖温带半湿润大陆性季风气候，年均气温 14.2 °C，年均日照时长 2254 h，年均降水量 676 mm，年均无霜期 210 d。供试土壤为黄潮土，黏壤土质，0~20 cm 土层碳、氮含量：全氮 0.88 g/kg、有机碳 6.26 g/kg；20~40 cm 土层：全氮 0.72g/kg、有机碳 4.73 g/kg。试验前该地块长期夏季甘薯、冬季小麦连作种植。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 6 月–2023 年 10 月进行，设 4 种植模式，分别为甘薯/小麦（CK）、甘薯/小麦/甘薯/油菜（SWR）、甘薯/小麦/玉米/小麦（SWC）、甘薯/小麦/花生/小麦（SWP），每个种植周期为 2 年。3 次重复，12 个小区，小区面积 62.4 m²（8.0 m×7.8 m），随机区组排列。供试甘薯品种为商薯 18、小麦品种为商麦 167、油菜品种为丰油 10 号、玉米品种为郑单 958、花生品种为商花 5 号。甘薯、小麦、花生和油菜种植密度分别为 46 000、64 000、165 000 和 270 000 株/hm²，玉米播种量为 135 kg/hm²，各生产季施肥投入量均为：尿素（N 46%）240 kg/hm²、磷酸二铵（P₂O₅ 46%）120 kg/hm²、硫酸钾（K₂O 50%）240 kg/hm²。甘薯、油菜季化肥均作为基肥施入，小麦、玉米、花生季 70%氮肥以及 100%磷肥、钾肥作为基肥施入，30%氮肥作为追肥施入。各作物种植、收获时间及管理措施均与当地种植习惯一致。

1.3 测定项目与方法

在 2023 年甘薯收获时，利用 5 点取样法采集

0~20 和 20~40 cm 土壤样品，混匀后通过四分法留取对角 2 份土壤，1 份土样沿其自然裂缝轻轻剥开，尽量避免因外力使得土壤结构发生改变，风干后用于土壤团聚体组成的测定；另 1 份土样风干后进行研磨，用于测定土壤全氮及有机碳含量。其中，采用干筛法测定土壤团聚体组成，采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量，采用 K₂Cr₂O₇-外加加热法测定有机碳含量^[18-19]。

平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）和>0.25 mm 团聚体含量（R_{>0.25}）是表征土壤团聚体稳定性的重要指标，其计算公式如下^[3]：

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

$$R_{>0.25}=\frac{M_{T>0.25}}{M_T}$$
 (2)

$$GMD=\exp[\sum W_i \ln X_i]$$
 (3)

式中，X_i为第 i 级团聚体的平均直径（mm），W_i为第 i 级团聚体的质量比重（%），M_T为土壤团聚体总重量，M_{T>0.25}为>0.25 mm 团聚体重量。

各粒级团聚体有机碳或全氮贡献率计算公式^[20]：团聚体有机碳或全氮贡献率（%）=某粒级团聚体有机碳或全氮含量×某粒级团聚体百分比/土壤有机碳或全氮总量×100。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据处理与作图，采用 SPSS 17.0 软件进行处理间差异显著性检验（LSD 法），采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析（RDA）。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式对土壤团聚体粒级分布的影响

不同处理 0~20 和 20~40 cm 土壤团聚体粒级分布差异显著（表 1）。0~20 cm 土层，团聚体分

表 1 不同处理对土壤团聚体粒级分布的影响
Table 1 Effects of different treatments on particle size distribution of soil aggregates

土层 Soil layer	处理 Treatment	团聚体质量分数 Aggregate mass fraction (%)			
		<0.053 mm	[0.053, 0.25) mm	[0.25, 2.00) mm	≥2.00 mm
0~20 cm	CK	16.06±0.43a	25.92±0.68a	35.67±0.36c	22.35±0.96d
	SWR	13.54±0.79c	23.61±0.44b	38.05±0.33b	24.80±0.77c
	SWC	14.94±0.51b	21.44±0.67c	37.53±0.54b	26.09±0.98b
	SWP	12.31±0.50d	19.99±0.37d	40.58±1.14a	27.12±0.67a
20~40 cm	CK	19.95±0.43a	30.24±0.55a	30.89±0.63c	18.92±0.45c
	SWR	18.56±0.65b	28.92±0.75ab	32.44±0.43b	20.08±0.56b
	SWC	18.21±0.52b	28.14±0.58b	31.91±0.62bc	21.74±0.32a
	SWP	17.67±0.69c	26.03±0.59c	34.06±0.41a	22.24±0.74a

同一土层同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。
Different lowercase letters after the same soil layer and column data indicate significant differences among different treatments (P<0.05). The same below.

布以[0.25, 2.00) mm 粒级为主, 其次是 ≥ 2.00 和 [0.053, 0.25) mm 粒级, <0.053 mm 粒级含量最少。与 CK 处理相比, 不同轮作处理[0.25, 2.00) mm 粒级含量显著提高 5.21%~13.77%, ≥ 2.00 mm 粒级显著提高 10.96%~21.34%。其中, SWP 处理在 [0.25, 2.00)和 ≥ 2.00 mm 粒级含量均最高, 显著高于 SWR 和 SWC 处理。不同轮作处理 <0.053 和 [0.053, 0.25) mm 粒级含量与 CK 处理相比均显著降低。

20~40 cm 土层, 团聚体分布以[0.053, 0.25)和 [0.25, 2.00) mm 粒级为主, <0.053 和 ≥ 2.00 mm 粒级次之。与 CK 处理相比, SWR 和 SWP 处理 [0.25, 2.00) mm 含量分别显著提高 5.02% 和 10.26%, 不同轮作处理 ≥ 2.00 mm 粒级含量显著提高 6.13%~17.55%。其中, SWP 处理在[0.25, 2.00) 和 ≥ 2.00 mm 粒级含量均最高。不同轮作处理在 <0.053 和[0.053, 0.25) mm 粒级含量与 CK 处理相比均降低。其中, 除 SWR 处理[0.053, 0.25) mm 粒级外, 其他轮作处理在 <0.053 和[0.053, 0.25) mm 粒级含量均显著降低。由此可知, 甘薯不同轮作模式可以改变土壤团聚体分布, 提高[0.25, 2.00) 和 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体含量。

2.2 不同轮作模式对土壤团聚体稳定性的影响

不同轮作处理 0~20 和 20~40 cm 土壤团聚体 MWD、GMD 以及 $R_{>0.25}$ 均高于 CK 处理 (表 2)。0~20 cm 土层, 与 CK 处理相比, SWC 和 SWP 处理 MWD 值分别显著增加 7.46% 和 5.97%, SWP 处理 GMD 值与 CK 处理相比显著增加 9.76%, 不同轮作处理 $R_{>0.25}$ 含量与 CK 处理相比显著提高 8.34%~16.70%。不同轮作处理中 SWC 处理 MWD 值显著高于 SWR 处理, 而 SWP 处理的 GMD 值和

$R_{>0.25}$ 含量均最高, 且 $R_{>0.25}$ 含量均显著高于 SWR 和 SWC 处理。

20~40 cm 土层, 与 CK 处理相比, 不同轮作处理 $R_{>0.25}$ 含量显著提高 5.44%~13.03%, 而 MWD 值和 GMD 值均无显著差异。不同轮作处理中 SWC 处理 MWD 值、SWP 处理 GMD 值及 $R_{>0.25}$ 含量最高。其中, SWP 处理 $R_{>0.25}$ 含量显著高于 SWR 和 SWC 处理, 其他轮作处理间 MWD 值和 GMD 值均无显著差异。由此可知, 甘薯不同轮作模式均可增加土壤团聚体 MWD 值和 GMD 值, 提高 $R_{>0.25}$ 含量。

2.3 不同轮作模式对土壤团聚体及全土有机碳含量的影响

不同轮作处理 0~20 和 20~40 cm 土层各粒级团聚体及全土有机碳含量均高于 CK 处理 (图 1)。0~20 cm 土层, 与 CK 处理相比, SWC 处理 <0.053 、[0.053, 0.25)、[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级及全土有机碳含量分别显著提高 4.86%、4.73%、5.25%、

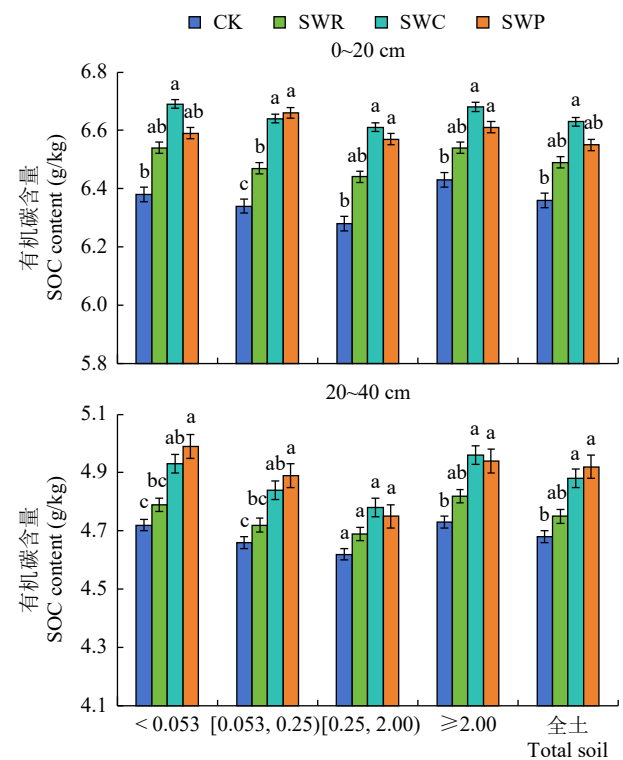


图 1 不同处理对土壤全土及团聚体有机碳含量的影响
Fig.1 Effects of different treatments on SOC content in total soil and aggregates
同一粒级中不同图柱上小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Lowercase letters on different columns within the same grain size indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

表 2 不同处理对土壤团聚体稳定性的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil aggregate stability

土层 Soil layer	处理 Treatment	平均重量 直径 MWD	几何平均 直径 GMD	>0.25 mm 团聚体含量 $R_{>0.25}$
0~20 cm	CK	1.34±0.02c	0.82±0.05b	58.01±0.71c
	SWR	1.38±0.02bc	0.86±0.03ab	62.85±0.81b
	SWC	1.44±0.03a	0.88±0.03ab	63.61±1.49b
	SWP	1.42±0.03ab	0.90±0.04a	67.70±1.78a
20~40 cm	CK	1.13±0.05a	0.63±0.04a	49.81±0.18c
	SWR	1.15±0.04a	0.65±0.04a	52.52±0.97b
	SWC	1.19±0.03a	0.67±0.01a	53.65±0.36b
	SWP	1.18±0.03a	0.68±0.01a	56.30±1.15a

3.89%和 4.25%，SWR 处理[0.053, 0.25) mm 粒级有机碳含量显著提高 2.05%，SWP 处理[0.053, 0.25)、[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级有机碳含量分别显著提高 5.05%、4.62%和 2.80%。不同轮作处理中 SWC 和 SWP 处理[0.053, 0.25) mm 粒级有机碳含量显著高于 SWR 处理，其他轮作处理间各粒级及全土有机碳含量均无显著差异。

20~40 cm 土层，与 CK 处理相比，SWC 处理 <0.053 、[0.053, 0.25)、 ≥ 2.00 mm 粒级及全土有机碳含量分别显著提高 4.45%、3.86%、4.86%和 4.27%，SWP 处理分别显著提高 5.72%、4.94%、4.44%和 5.13%，SWR 处理各粒级及全土有机碳含量与 CK 处理相比均无显著差异。不同轮作处理中 SWP 处理 <0.053 、[0.053, 0.25) mm 粒级有机碳含量较 SWR 处理分别显著提高 4.18%和 3.60%，其他轮作处理间各粒级及全土有机碳含量均无显著差异。由此可知，甘薯不同轮作模式均可提高各粒级团聚体及全土有机碳含量。

2.4 不同轮作模式对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

由图 2 可知，不同处理土壤团聚体有机碳贡献率变化差异较大。与 CK 处理相比，不同轮作处理

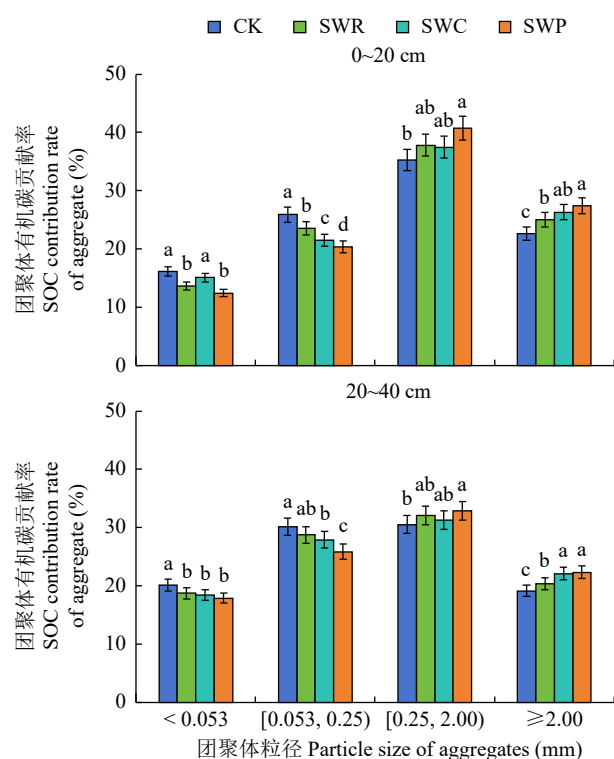


图 2 不同处理对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on SOC contribution rate of soil aggregate

[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体有机碳贡献率升高，而 <0.053 、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体有机碳贡献率降低。0~20 cm 土层，与 CK 处理相比，SWP 处理[0.25, 2.00) mm 粒级贡献率显著提高 15.67%，不同轮作处理 ≥ 2.00 mm 粒级贡献率显著提高 10.48%~21.00%，[0.053, 0.25) mm 粒级贡献率显著降低 8.94%~21.32%，SWR 和 SWP 处理 <0.053 粒级贡献率分别显著降低 15.32%和 23.14%。不同轮作处理中 SWP 处理[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级贡献率均最高，其中， ≥ 2.00 mm 粒级贡献率较 SWR 处理显著提高 9.52%，其他轮作处理间均无显著差异。

20~40 cm 土层，与 CK 处理相比，不同轮作处理 ≥ 2.00 mm 粒级贡献率显著提高 6.59%~16.74%， <0.053 mm 粒级贡献率显著降低 6.96%~10.93%，SWP 处理[0.25, 2.00) mm 粒级贡献率显著提高 7.77%，SWC 和 SWP 处理[0.053, 0.25) mm 粒级贡献率分别显著降低 7.31%和 14.08%。不同轮作处理中 SWP 处理[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级贡献率均最高。由此可知，甘薯不同轮作模式可提高 [0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级有机碳贡献率。其中，SWP 处理表现优于 SWR 和 SWC 处理。

2.5 不同轮作模式对土壤团聚体及全土全氮含量的影响

不同轮作处理 0~20 和 20~40 cm 土层各粒级团聚体及全土全氮含量均高于 CK 处理（图 3）。0~20 cm 土层，与 CK 处理相比，SWC 处理 ≥ 2.00 mm 粒级全氮含量显著提高 6.74%，SWP 处理 <0.053 、[0.053, 0.25)、 ≥ 2.00 mm 粒级及全土全氮含量分别显著提高 6.74%、6.90%、8.99%和 6.90%。不同轮作处理中 SWP 处理 ≥ 2.00 mm 粒级全氮含量较 SWR 处理显著提高 5.43%，其他轮作处理间各粒级及全土全氮含量均无显著差异。

20~40 cm 土层，与 CK 处理相比，SWR 处理 <0.053 mm 粒级全氮含量显著提高 5.56%，SWC 处理 ≥ 2.00 mm 粒级及全土全氮含量分别显著提高 6.85%和 5.63%，SWP 处理 <0.053 、[0.053, 0.25)、[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级及全土的全氮含量分别显著提高 8.33%、8.45%、8.70%、9.59%和 8.45%。不同轮作处理中 SWP 处理 <0.053 mm 粒级全氮含量较 SWC 处理显著提高 6.85%，SWP 处理 ≥ 2.00 mm 粒级全氮含量较 SWR 处理显著提

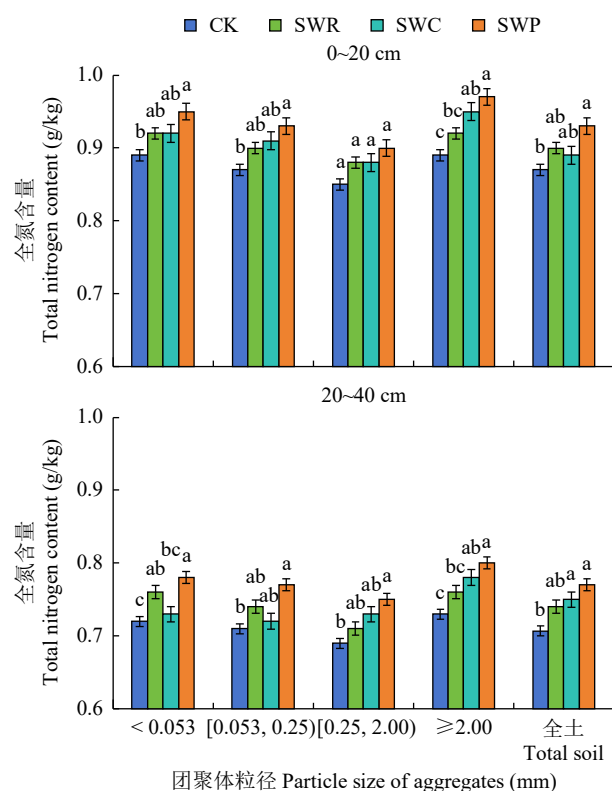


图3 不同处理对土壤全土及团聚体全氮含量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the total nitrogen content in total soil and aggregates

高 5.26%，其他轮作处理间各粒级及全土全氮含量均无显著差异。由此可知，甘薯不同轮作模式均可提高各粒级团聚体及全土全氮含量。其中，SWP 处理各粒级团聚体及全土全氮含量均最高。

2.6 不同轮作模式对土壤团聚体全氮贡献率的影响

不同轮作处理土壤团聚体全氮贡献率变化见图 4。与 CK 处理相比，不同轮作处理[0.25, 2.00)、≥2.00 mm 粒级团聚体全氮贡献率升高，而<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体全氮贡献率降低。0~20 cm 土层，与 CK 处理相比，SWP 处理[0.25, 2.00) mm 粒级贡献率显著提高 12.52%，SWC 和 SWP 处理≥2.00 mm 粒级贡献率分别显著提高 21.40%和 23.89%。除 SWC 处理<0.053 mm 粒级外，其他轮作处理<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级贡献率均显著降低。不同轮作处理中 SWP 处理[0.25, 2.00)、≥2.00 mm 粒级贡献率均最高，其中，≥2.00 mm 粒级贡献率较 SWR 处理显著提高 11.54%，其他轮作处理间均无显著差异。

20~40 cm 土层，与 CK 处理相比，SWP 处理[0.25, 2.00) mm 粒级贡献率显著提高 10.01%。SWC 处理≥2.00 mm 粒级贡献率显著提高 15.81%，SWP

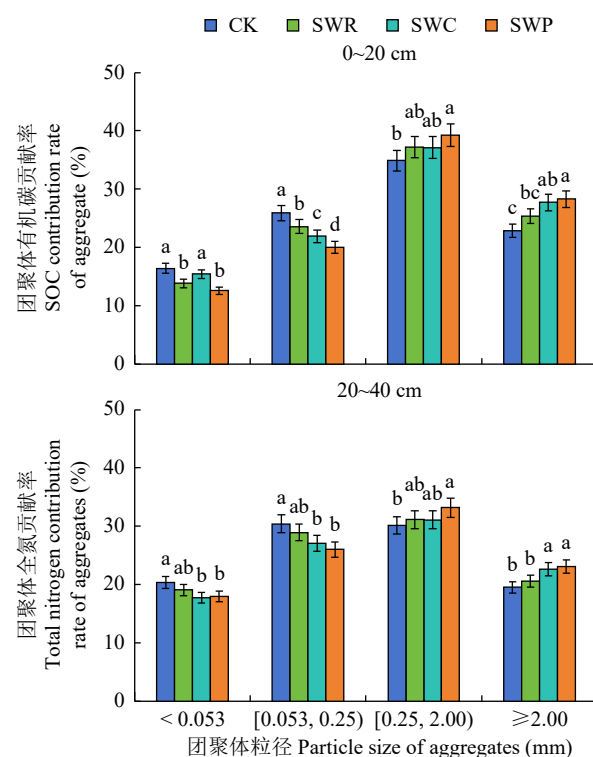


图4 不同处理对土壤团聚体全氮贡献率的影响

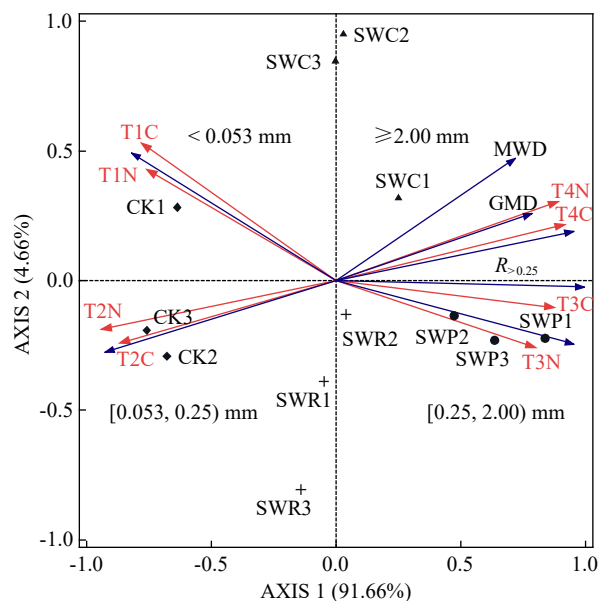
Fig.4 Effects of different treatments on total nitrogen contribution rate of soil aggregates

处理显著提高 18.27%，SWC 处理<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级贡献率分别显著降低 12.83%、11.75%，SWP 处理分别显著降低 11.05%、14.38%。不同轮作处理中 SWC 和 SWP 处理≥2.00 mm 粒级贡献率较 SWR 处理分别显著提高 9.75%、12.08%，其他轮作处理各粒级全氮贡献率均无显著差异。由此可知，甘薯不同轮作模式可提高[0.25, 2.00)、≥2.00 mm 粒级全氮贡献率，降低<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级贡献率。

2.7 土壤团聚体分布及稳定性与团聚体有机碳、全氮贡献率间的冗余分析

为分析不同轮作模式下土壤团聚体变化对土壤碳、氮的影响，利用团聚体分布及稳定性与团聚体有机碳、全氮贡献率进行冗余(RDA)分析。结果(图 5)显示，排序轴 1、排序轴 2 能在累计变量 96.32%水平上解释团聚体与有机碳、全氮贡献率间的关系。[0.25, 2.00)、≥2.00 mm 粒级团聚体有机碳、全氮贡献率与[0.25, 2.00)、≥2.00 mm 粒级团聚体以及 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 呈正相关，与<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体呈负相关。<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体有机碳、全氮贡献率变化正好相反。其中，[0.25, 2.00) mm 粒

级团聚 (82.8%) 是主要驱动因子。说明不同轮作模式下[0.25, 2.00) mm 粒级团聚体含量的增加有利于提高土壤团聚体稳定性以及 ≥ 0.25 mm 粒级有机碳、全氮贡献率。



T1C、T2C、T3C、T4C 分别表示<0.053、[0.053, 0.25)、[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体有机碳贡献率; T1N、T2N、T3N、T4N 分别表示<0.053、[0.053, 0.25)、[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体全氮贡献率; CK1、CK2、CK3 分别表示 CK 处理的 3 个重复, 其余处理点依次类推表示。

T1C、T2C、T3C、and T4C represent <0.053, [0.053, 0.25), [0.25, 2.00), ≥ 2.00 mm particle size aggregate organic carbon contribution rate, respectively; T1N, T2N, T3N, T4N represent <0.053, [0.053, 0.25), [0.25, 2.00), ≥ 2.00 mm particle size aggregate total nitrogen contribution rate, respectively; CK1, CK2, CK3 represent three replicates of CK processing, and the remaining processing points are represented in sequence.

图 5 土壤团聚体分布及稳定性与团聚体有机碳、全氮贡献率间的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis of soil aggregate distribution and stability with aggregate organic carbon and total nitrogen contribution rate

3 讨论

土壤团聚体组成与稳定性是评价土壤结构与肥力的重要指标, 而 MWD、GMD 和 $R_{>0.25}$ 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标, 其值越大, 表示团聚体越稳定^[21]。有研究^[22]表明, 土地不同利用方式会显著影响土壤团聚体组成与稳定性。张斯佳等^[23]研究表明, 小麦/玉米与多种作物轮作会提高土壤团聚体平均质量直径, 改善土壤耕层质量, 提升养分供应能力。李菁等^[24]研究表明, 合理轮作可以显著提高 0~40 cm 土层 1~2 mm 粒级团聚体含量以及平均质量直径, 改善土壤结构。

本研究表明, 与 CK 处理相比, 不同轮作模式

均可提高 0~40 cm 土层[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体含量, 降低<0.053、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体含量, 提高 MWD、GMD 和 $R_{>0.25}$ 。这与田慎重等^[25]的研究结果相似, 说明轮作能够改善土壤物理性质, 提高大粒径团聚体含量, 从而提升团聚体稳定性。其原因可能是甘薯与不同作物轮作倒茬时, 根系分泌物、残体等能够增加土壤有机碳以及多糖含量, 有利于土壤中微粒团聚体胶结成大粒径团聚体^[26]; 也可能是不同种类有机物碳源的投入, 在增加土壤有机质含量的同时, 提升了土壤微生物代谢活性, 从而有助于土壤胶结物质形成, 进而促进大粒径团聚体形成^[27]。而不同轮作处理中 SWR 处理 MWD、GMD 和 $R_{>0.25}$ 均最低, 可能与轮种作物根系特点不同有关, 玉米、花生根系为须根系, 油菜根系为直根系, 轮作时, 油菜根系对土壤团聚体的穿透作用更强, 对团聚体结构造成一定的破坏, 从而使得土壤团聚体稳定性降低^[28]。

土壤碳、氮是土壤肥力的核心物质^[29]。种植模式是影响农田土壤碳库的重要因素, 不同轮作倒茬作物根系分泌物、残体等均会影响土壤有机碳的周转, 进而影响土壤有机碳含量^[30]。有研究^[31]表明, 大粒径团聚体有利于土壤有机碳固存与转化的同时, 也有利于促进土壤全氮的持留, 提高土壤全氮含量。本研究结果表明, 与 CK 处理相比, 不同轮作模式均可提高 0~40 cm 土层全土及各粒级团聚体有机碳、全氮含量, 提升[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体有机碳和全氮贡献率。这与郭金瑞等^[32]研究相似。说明甘薯轮作在改善土壤结构, 提升团聚体稳定性的同时, 也有利于提高土壤有机碳和全氮含量, 提升 ≥ 0.25 mm 粒级团聚体贡献率。分析原因可能是甘薯轮作在促进大颗粒团聚体形成的同时, 也可促进土壤有机质的固存与转化效率, 提高土壤有机碳含量, 而全氮含量的提高可能与土壤碳氮协同转化有关, 有机碳含量增加的同时也有利于提升土壤氮素的有效性, 进而提高土壤全氮含量^[33]。其中, SWC 和 SWP 处理土壤全土及团聚体有机碳明显高于 SWR 处理, 这可能与不同作物轮作倒茬对土壤结构的改良程度有关, 进而影响土壤有机碳和全氮的分解与转化, 也可能与不同作物根系分泌物、残体等不同有关, 提供不同种类碳源和氮源可供土壤微生物分解与利用, 使得微生物代谢活性不同, 进而影响土壤养分转化^[34]。而 SWP 处

理土壤全土及团聚体全氮含量明显高于其他处理，可能与花生根瘤菌能将空气氮转化为土壤氮素等因素有关^[35]。另外，土壤 ≥ 0.25 mm 粒级团聚体贡献率的提高也说明大粒径团聚体对土壤有机碳和全氮含量的提升具有明显的促进作用。

在团聚体组成分布及稳定性与团聚体有机碳和全氮贡献率间的 RDA 分析中表明，土壤团聚体结构的改善有利于提升团聚体有机碳和全氮贡献率。其中，[0.25, 2.00) mm 粒级团聚（82.8%）是提升土壤团聚体有机碳和全氮贡献率的主要驱动因子，说明不同轮作模式下[0.25, 2.00) mm 粒级团聚体含量的增加有利于提高土壤团聚体稳定性以及 ≥ 0.25 mm 粒级有机碳和全氮贡献率。

4 结论

甘薯不同轮作处理均可提高 0~40 cm 土壤 [0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体含量，降低 < 0.053 、[0.053, 0.25) mm 粒级团聚体含量，提高 MWD、GMD 和 $R_{>0.25}$ 。甘薯不同轮作处理均可提高土壤 0~40 cm 土层各粒级团聚体及全土有机碳、全氮含量，提升[0.25, 2.00)、 ≥ 2.00 mm 粒级团聚体有机碳、全氮贡献率。RDA 分析表明，土壤团聚体组成变化与团聚体稳定性及碳氮贡献率紧密相关。甘薯轮作能够改善土壤团聚体组成分布，提升团聚体稳定性，提高土壤有机碳和全氮含量。

参考文献

[1] 王欣, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望. 中国农业科学, 2021, 54(3): 483-492.
[2] 谢一芝, 郭小丁, 贾赵东, 等. 中国食用甘薯育种现状及展望. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1419-1424.
[3] 戴起伟, 钮福祥, 孙健, 等. 中国甘薯加工产业发展现状与趋势分析. 农业展望, 2016, 12(4): 39-43.
[4] 易中懿, 汪翔, 徐雪高, 等. 品种创新与甘薯产业发展. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1401-1409.
[5] 高志远, 胡亚亚, 刘兰服, 等. 甘薯连作对根际土壤微生物群落结构的影响. 核农学报, 2019, 33(6): 1248-1255.
[6] 乔月静, 王雪娇, 武宝悦, 等. 不同种植模式对甘薯产量及甘薯根际茎线虫数量的影响. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 800-803.
[7] 许仙菊, 姜晓蕊, 陈丹艳, 等. 甘薯连作障碍发生的土壤养分因素探讨. 中国土壤与肥料, 2024(4): 102-107.
[8] 张思培, 伊森, 王建国, 等. 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. 中国油料作物学报, 2024, 46(3): 554-564.
[9] 李冉, 李精华, 林生威, 等. 稻豆轮作对土壤理化性质及微生物群落的影响. 热带生物学报, 2024, 15(2): 157-164.
[10] 黑杰, 李先德, 刘吉龙, 等. 轮作模式对农田土壤团聚体及碳氮含量的影响. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(3): 126-134.

[11] 陆琪, 马红彬, 俞鸿千, 等. 轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3028-3038.
[12] 朱玲, 周蓉, 沈玉叶, 等. 稻壳及稻壳生物炭对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 242-252.
[13] 白小龙, 王彬, 刘云鹏, 等. 改良物料配施提升河套灌区盐碱土团聚体稳定性、有机碳含量及玉米产量. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(11): 2082-2092.
[14] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121-127.
[15] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响. 中国农业科学, 2015, 48(4): 705-712.
[16] 王磊, 王静, 张爱君, 等. 小麦-甘薯轮作长期增施有机肥对碱性土壤固氮菌群落结构及多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(16): 5771-5782.
[17] 汤晓仪, 王勃, 韩俊杰, 等. 不同冬季复种轮作对甘薯耕层土壤真菌群落及块根产量的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(11): 267-272.
[18] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态. 土壤学报, 2017, 54(1): 138-149.
[19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[20] 吴嘉俊, 童文彬, 江建锋, 等. 水稻秸秆炭施用对水稻土团聚体稳定性及其碳氮分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(3): 457-468.
[21] Edwards L M. The effects of soil freeze-thaw on soil aggregate breakdown and concomitant sediment flow in Prince Edward Island: a review. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(4): 459-472.
[22] 季卫英, 管丹蓉, 宓立峰, 等. 不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响. 水土保持通报, 2024, 44(6): 377-386.
[23] 张斯佳, 杨杰, 赵帅, 等. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响. 中国农业科学, 2025, 58(2): 238-251.
[24] 李菁, 张广彩, 杨力剑, 等. 不同花生轮作模式对土壤团聚体碳组分的影响. 中国油料作物学报, 2024, 46(3): 613-624.
[25] 田慎重, 管西林, 宁堂原, 等. 多样化种植对提升耕地质量的作用: 进展与展望. 土壤学报, 2024, 61(3): 619-634.
[26] 胥佳忆, 李先德, 刘吉龙, 等. 农业土地利用转变对土壤团聚体组成及碳、氮含量的影响. 环境科学学报, 2022, 42(8): 438-448.
[27] 王籽懿, 韩伟, 金鸿飏, 等. 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. 江苏农业科学, 2025, 53(3): 191-198.
[28] 张斯佳, 张建恒, 赵帅, 等. 多样化轮作对土壤团聚体有机碳氮分布特征的影响. 河北农业大学学报, 2025, 48(1): 1-8.
[29] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
[30] 李增强, 张贤, 王建红, 等. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 525-534.
[31] Ranatunga T D, Reddy S S, Taylor R W. Phosphorus distribution in soil aggregate size fractions in a poultry litter applied soil and potential environmental impacts. Geoderma, 2013, 192: 446-452.
[32] 郭金瑞, 宋振伟, 彭宪现, 等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178-185.
[33] Spargo J T, Cavigelli M A, Mirsky S B, et al. Mineralizable soil

- nitrogen and labile soil organic matter in diverse long-term cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90(2): 253-266.
- [34] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160-167.
- [35] 杨庆锋, 杜迎辉, 赵斌. 花生根瘤菌的应用效果研究. *花生学报*, 2013, 42(3): 56-59.

Effects of Different Rotation Patterns of Sweet Potato on Soil Aggregate Stability and Contents of Carbon and Nitrogen

Liu Yajun, Wang Wenjing, Hu Qiguo, Ma Tingting, Chu Fengli

(Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract In order to investigate the effects of different rotation patterns of sweet potato on soil aggregate stability and carbon and nitrogen contents, field positioning experiments were conducted from 2019 to 2023 to study the effects of sweet potato/wheat (CK) double cropping and continuous cropping with rapeseed (SWR), corn (SWC), and peanut (SWP) on soil aggregate composition, stability, carbon and nitrogen contents, and contribution rates in 0-20 cm and 20-40 cm soil. The results showed that compared with the CK treatment, different rotation patterns of sweet potatoes could increase the contents of [0.25, 2.00) and ≥ 2.00 mm particle size aggregates in the soil layer of 0-40 cm, as well as the organic carbon and total nitrogen contents of each particle size aggregate and total soil. They also improved the stability of soil aggregates and the contribution rates of organic carbon and total nitrogen in [0.25, 2.00) and ≥ 2.00 mm particle size aggregates. Among them, in the 0-20 cm soil layer, compared with the CK treatment, the content of >0.25 mm aggregate ($R_{>0.25}$) significantly increased by 8.34%-16.70% under different rotation treatments. The contribution rate of organic carbon in the ≥ 2.00 mm particle size significantly increased by 10.48%-21.00%. The SWC and SWP treatments significantly enhanced the contribution rate of total nitrogen in the ≥ 2.00 mm particle size by 21.40% and 23.89%, respectively. Additionally, the SWP treatment significantly increased the contribution rates of organic carbon and total nitrogen in the [0.25, 2.00) mm particle size by 15.67% and 12.52%, respectively. Redundancy analysis (RDA) showed that changes in soil aggregate composition were closely correlated with soil aggregate stability and the contribution rates of organic carbon and total nitrogen, and [0.25, 2.00) mm aggregates (82.8%) were the primary driving factor. In summary, reasonable sweet potato rotation can improve the distribution of soil aggregate composition, enhance aggregate stability, and increase the organic carbon, total nitrogen content, and contribution rate of ≥ 0.25 mm particle size aggregates.

Key words Sweet potato; Crop rotation; Aggregate; Organic carbon; Total nitrogen