

有机肥等氮量替代化肥对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响

张平良^{1, 2*}, 付强³, 刘晓伟^{1, 2}, 杨思存^{1, 2}

(1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室 / 农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过3年定位试验, 研究有机肥等氮量替代化肥对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响, 探索该地区有机肥替代化肥的适宜比例及其效果, 实现化肥减量增效。田间试验设置5个不同施肥处理: (1) 100% 化肥氮 (CK); (2) 25% 有机肥氮 + 75% 化肥氮 (M25); (3) 50% 有机肥氮 + 50% 化肥氮 (M50); (4) 75% 有机肥氮 + 25% 化肥氮 (M75); (5) 100% 有机肥氮 (M100)。研究结果表明: 与CK相比, 有机肥等氮量替代化肥模式有利于降低0 ~ 20 cm 土层土壤 <0.25 mm 粒级微团聚体占比, 提高 >2 mm 粒级大团聚体占比, 显著增加了 >0.25 mm 土壤团聚体所占比重 ($R_{0.25}$)、团聚体平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD), 增加了水稳性团聚体有机碳和全氮含量, 以 M50 处理效果最明显, 较 CK 土壤水稳性团聚体有机碳、全氮含量分别显著增加 7.32% ~ 8.28%、18.2% ~ 20.3%。综上所述, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 有机肥等氮量替代化肥有利于促进土壤微团聚体 (<0.25 mm) 向大团聚体转化, 提高土壤团聚体的稳定性, 促进有机碳 (氮) 在团聚体中富集, 有利于增加土壤有机碳 (氮) 库, 以有机肥等氮量替代 50% 化肥氮的模式效果明显。

关键词: 有机肥等氮量替代化肥; 马铃薯; 土壤团聚体稳定性; 有机碳; 全氮

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 也是土壤中物质和能量转化的场所, 其组成和稳定性是土壤结构变化的重要指示因子, 能对土壤孔隙状况以及水、肥、气、热产生重要影响^[1-2], 土壤团聚体的组成及其稳定性决定着土壤肥力水平^[3]。目前, 评价团聚体稳定性的指标主要有大团聚体含量、土壤平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 以及分形维数 (PSD) 等^[4], 可以较好地反映土壤结构的稳定性^[5]。一般认为, 大团聚体含量、土壤平均质量直径和几何平均直径越大, 土壤团聚体分布状况与稳定性越好^[6]。土壤有机质作为土壤团聚体形成的重要胶结物质, 不仅影响水稳性团聚体的数量, 而且也影响水稳性团聚体的稳定性^[7], 有

机肥料含有较高含量的有机物质, 同时有机肥料也可作为微生物生长的基质, 增强土壤微生物数量、活性及微生物群落结构, 促进土壤矿质土粒的胶结, 进而影响土壤水稳性团聚体的形成^[8]。有机肥施用对表层土壤水稳性大团聚体的组成有增加作用^[9], 但有机肥施用量增加并未对土壤团聚体稳定性产生显著影响^[10]。

长期不同施肥方式对土壤团聚体稳定性产生重要影响。研究表明, 长期施用有机肥显著提高了土壤大团聚体比例及其稳定性^[11-14], 可显著增加土壤团聚体有机碳及其组分含量^[14-18], 化肥配施有机肥效果优于单施化肥^[14, 16-18]。张瑞等^[19]通过探究化肥与有机肥配施对设施土壤团聚体稳定性的影响发现, 连续7年化肥与有机肥配施促进了土壤大、微团聚体的形成, 提高了土壤团聚体的稳定性, 同时也显著增加了大团聚体 (>0.25 mm) 有机碳和全氮含量。毛霞丽等^[20]通过探究施肥对浙江稻田土壤团聚体分布的影响发现, 有机肥与化肥配施和单施有机肥较不施肥均显著提高了 >2 和 2 ~ 0.25 mm 水稳性大团聚体的含量和团聚

收稿日期: 2024-08-30; 录用日期: 2024-10-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD1900403); 甘肃省现代旱作特色农业科技支撑项目 (KJZC-2025-20); 甘肃省重点研发计划 (20YF3WA010); 甘肃省农业科学院重点研发计划 (2023GAAS25)。

作者简介: 张平良 (1981-), 硕士, 研究员, 从事耕地培肥、作物养分管理与高效施肥研究。E-mail: zhangpl2007@163.com。同时为通讯作者。

体 MWD, 强化了团聚体对土壤有机碳的物理保护作用。

近年来, 关于有机肥替代化肥的研究日益增多, 有机肥替代化肥的效果也受到作物种类、试验年限、肥料配施比例等多种因素的影响, 针对西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下有机肥等氮量替代化肥对马铃薯农田土壤团聚体稳定性及其养分含量的影响还缺乏深入系统研究。本试验以旱地马铃薯农田为研究对象, 等氮量条件下研究有机肥替代化肥比例对土壤团聚体分布及其稳定性和团聚体有机碳、全氮含量的影响, 以期确定有机肥等氮量替代化肥的适宜比例, 为西北半干旱区马铃薯田间施肥提供科学合理的方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在甘肃省农业科学院定西高泉试验基地(定西市安定区团结镇高泉村, 35° 24' N, 104° 34' E), 该地区海拔 2000 m, 年均气温 6.8℃, 年均降水量 415 mm, 年蒸发量 1531 mm, 无霜期 146 ~ 149 d, 为典型的西北黄土丘陵半干旱区。试验始于 2020 年 4 月, 土壤类型为黄绵土, 0 ~ 20 cm 耕层土壤基本理化性状: 有机质 12.93 g/kg、全氮 0.73 g/kg、碱解氮 50.83 mg/kg、有效磷 15.12 mg/kg、速效钾 174.81 mg/kg、pH 8.21。

1.2 试验设计

试验以马铃薯为指示材料, 品种为‘陇薯 10 号’。试验采用随机区组设计, 设置 5 个不同施肥处理: (1) CK (100% 化肥氮)、(2) M25 (等氮养分设计, 25% 有机肥氮 + 75% 化肥氮)、(3) M50 (50% 有机肥氮 + 50% 化肥氮)、(4) M75 (75% 有机肥氮 + 25% 化肥氮)、(5) M100 (100% 有机肥氮)。小区面积 45 m², 3 次重复。氮、磷、钾肥养分施用量分别为 N 180、P₂O₅ 90、K₂O 60 kg/hm², 试验所用的有机肥为商品有机肥 (N 1.94%、P₂O₅ 0.97%、K₂O 1.83%), 氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 12%), 钾肥为硫酸钾 (K₂O 50%), 所有肥料于覆膜播前一次性施入。马铃薯采用全膜覆盖垄播栽培^[21], 即为全地面地膜覆盖, 起单垄, 垄宽 60 ~ 70 cm、高 15 cm, 沟宽 40 cm, 马铃薯种植在垄的两侧。马铃薯于每年 4 月底播种, 10 月中旬收获, 田间管理措施与当地农户一致。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤团聚体分级的测定

2022 年 10 月马铃薯收获后在田间取样, 每个小区按照“S”形多点取样法采集耕层 0 ~ 20 cm 原状土样混合, 装入硬质塑料盒带回实验室以备测试。采集的土样分别采用干筛法^[22]和湿筛法^[23]分离出 >2、1 ~ 2、0.5 ~ 1、0.25 ~ 0.5、<0.25 mm 粒级的团聚体。

1.3.2 团聚体质量百分含量、R_{0.25} 和 MWD、GMD 的测定^[24-25]

团聚体质量百分含量、R_{0.25} 和 MWD、GMD 的计算公式如下:

$$\text{粒级团聚体质量百分含量} = \frac{\text{各粒级团聚体质量}}{\text{土壤样品总质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{0.25} = 1 - \frac{m_{<0.25}}{m} \quad (2)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i \right) \quad (4)$$

式中, MWD 为土壤团聚体平均重量直径, GMD 为几何平均直径, R_{0.25} 为 >0.25 mm 团聚体所占比重, m 为土壤团聚体总重, X_i 为第 i 级团聚体的平均直径, W_i 为第 i 级团聚体的重量占比。

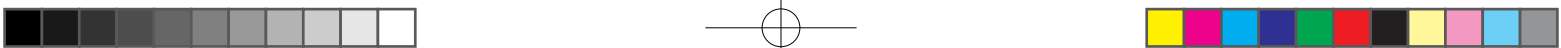
1.4 数据处理

采用 Excel 2010 处理数据, DPS 15.10 进行统计分析, LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤机械性团聚体粒径分布

由表 1 可知, 通过 3 年定位试验, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 有机肥等氮量替代化肥不同比例对 0 ~ 20 cm 土层土壤机械性团聚体粒径分布产生不同程度的影响。CK 以 <0.25 mm 粒级微团聚体占比为主, 各有机肥等氮量替代化肥处理较 CK 降低了 <0.25 mm 粒级微团聚体含量, 增加了 >2 mm 粒级大团聚体含量, 且差异性达到显著水平 (P<0.05)。1 ~ 2 和 0.5 ~ 1 mm 粒级的团聚体含量均有不同程度的增加, 0.25 ~ 0.5 mm 粒级的机械性团聚体无差异。与 CK 相比, M25、M50、M75、M100 处理 >2 mm 粒级的机械性团聚体占比分别增加 26.7%、43.9%、31.1%、25.4%, <0.25 mm 粒级的微团聚体分别减



少 22.7%、39.8%、40.6%、31.3%。有机替代处理中以 M50 和 M75 处理效果较为明显, 其次是 M100 和 M25 处理。上述结果表明, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 与单施化肥相比, 有机肥等氮量替代化肥通过减少 <0.25 mm 微团聚体含量, 显著增加 >2 mm 粒级的团聚体含量, 促进了土壤机械性大团聚体的形成, 以 M50 处理的效果最好。

表 1 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土壤机械性团聚体粒径分布 (%)

处理	土壤机械性团聚体组成				
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm
CK	25.1 ± 0.40d	13.5 ± 0.25b	14.9 ± 0.35b	16.4 ± 0.25a	30.0 ± 0.75a
M25	31.8 ± 0.35c	13.3 ± 0.53b	14.2 ± 0.40b	17.4 ± 0.90a	23.2 ± 1.56b
M50	36.2 ± 0.55a	15.8 ± 0.40a	15.1 ± 0.32ab	14.9 ± 0.53a	18.1 ± 1.75d
M75	32.9 ± 0.25b	15.9 ± 0.56a	16.3 ± 0.55a	17.1 ± 0.49a	17.8 ± 0.47d
M100	31.5 ± 0.61c	15.2 ± 0.45ab	16.0 ± 0.53a	16.7 ± 0.35a	20.6 ± 0.40c

注: 同列不同小写字母表示同一粒级不同施肥处理间的差异显著性 ($P<0.05$)。下同。

2.2 土壤水稳性团聚体粒径分布

由表 2 可知, 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土层土壤各粒级水稳性团聚体中以 <0.25 mm 微团聚体占比最高。与 CK 相比, 有机肥等氮量替代化肥处理显著降低了 <0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量, 增加了 >2 mm 粒级的水稳性团聚体含量, 其中 M50 处理差异最显著 ($P<0.05$); 0.25 ~ 0.5 mm 粒级小团聚体含量不同程度下降, 0.5 ~ 2 mm 粒级团聚体无差异。与 CK 相比, M25、M50、M75、M100 处理 >2 mm 粒级的水稳性团聚体含量分别增加 63.8%、93.3%、78.7%、76.8%, <0.25 mm 粒级的水稳性微团聚体含量分别减少 10.6%、18.4%、23.0%、14.7%, 0.25 ~ 0.5 mm 粒级的小团聚体含量分别减少 5.27%、16.1%、4.17%、10.2%。有机替代处理总体以 M50 和 M75 处理效果较为明显, 其次是 M100 处理, M25 处理效果最差。上述结果表明, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 通过连续 3 年的定位试验, 有机肥等氮量替代化肥较单施化肥显著降低了水稳性团聚体中 <0.25 mm 微团聚体和 0.25 ~ 0.5 mm 小团聚体含量, 增加了 >2 mm 粒级的大团聚体含量, 说明长期有机肥等氮量替代化肥有利于提高团聚体的团聚化程度, 促进微小团聚体向大团聚体的形成。

表 2 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土层土壤水稳性团聚体粒径分布 (%)

处理	土壤水稳性团聚体组成				
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm
CK	10.5 ± 0.20d	15.0 ± 0.36a	15.0 ± 0.70a	18.2 ± 0.72a	41.3 ± 1.93a
M25	17.2 ± 0.30c	14.2 ± 0.89a	14.4 ± 1.12a	17.3 ± 0.49ab	36.9 ± 0.30b
M50	20.3 ± 0.17a	15.6 ± 0.25a	15.2 ± 0.25a	15.3 ± 0.10c	33.7 ± 0.63c
M75	18.8 ± 0.15b	15.3 ± 0.10a	16.7 ± 0.10a	17.5 ± 0.25ab	31.8 ± 0.25d
M100	18.6 ± 0.12b	14.3 ± 0.15a	15.5 ± 0.25a	16.4 ± 0.21b	35.2 ± 0.17bc

2.3 土壤团聚体稳定性

由表 3 可知, 无论是机械性团聚体还是水稳性团聚体, 有机肥等氮量替代化肥处理较 CK 显著提高了土壤团聚体 $R_{0.25}$ 含量以及团聚体 MWD 和 GMD ($P<0.05$), 有机替代效果以 M50 和 M75 处理较好, 其次为 M100 处理, M25 处理相对较差, M50 处理与 M75 处理差异不明显, 但两者显著高于 M100 和 M25 处理。从机械性团聚体稳定性角度分析, 与 CK 相比, M25、M50、M75、M100 处理土壤团聚体 $R_{0.25}$ 含量分别增加 9.76%、17.1%、17.4%、13.4%, MWD 和 GMD 分别提高 20.3% 和 29.5%、35.3% 和 61.0%、26.2% 和 48.9%、21.1% 和 37.1%。从土壤水稳性团聚体稳定性分析, M25、M50、M75、M100 处理较 CK 土壤团聚体 $R_{0.25}$ 含量分别增加 7.44%、12.9%、16.2%、10.3%, MWD 和 GMD 分别提高 34.7% 和 24.4%、53.1% 和 43.8%、45.9% 和 41.7%、42.7% 和 32.8%。上述结果表明, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 通过连续 3 年的定位试验, 有机肥等氮量替代化肥较单施化肥显著增加了团聚体 $R_{0.25}$ 的含量, 提高了团聚体 MWD 和 GMD, 说明长期有机肥等氮量替代化肥有利于增加土壤团聚体的稳定性。

表 3 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土层土壤团聚体稳定性

处理	机械性团聚体稳定性			水稳性团聚体稳定性		
	$R_{0.25}$ (%)	MWD (mm)	GMD (mm)	$R_{0.25}$ (%)	MWD (mm)	GMD (mm)
CK	70.0 ± 0.75c	1.92 ± 0.02c	0.72 ± 0.01d	58.7 ± 1.94d	1.09 ± 0.02d	0.44 ± 0.02d
M25	76.8 ± 1.56b	2.31 ± 0.03b	0.93 ± 0.03c	63.1 ± 0.30c	1.46 ± 0.01c	0.54 ± 0.01c
M50	81.9 ± 1.75a	2.60 ± 0.04a	1.16 ± 0.05a	66.3 ± 0.64ab	1.66 ± 0.01a	0.63 ± 0.02a
M75	82.2 ± 0.47a	2.42 ± 0.02ab	1.07 ± 0.02ab	68.2 ± 0.25a	1.59 ± 0.01ab	0.62 ± 0.01a
M100	79.4 ± 0.40ab	2.33 ± 0.03b	0.99 ± 0.02bc	64.8 ± 0.17bc	1.55 ± 0.01b	0.58 ± 0.01b

2.4 土壤水稳性团聚体有机碳和全氮含量

由图 1 可知, 有机肥等氮量替代化肥较 CK 处理 0 ~ 20 cm 土层土壤各粒级水稳性团聚体有机碳、全氮含量的影响差异不同, 以 M50 处理显著增加 ($P<0.05$), 其次是 M75 和 M25 处理。与 CK 相比, M50 处理 >2、0.25 ~ 2、<0.25 mm 粒级的土壤团聚体有机碳含量分别增加 8.28%、7.32% ~ 8.02%、8.09%, 土壤团聚体全氮含量分别增加 18.2%、19.5% ~ 20.3%、19.4%; M25 和 M75 处理土壤团聚体有机碳含量均有不同程度的增加, 但差异性不显著;

M25 和 M75 处理 >2、0.25 ~ 2、<0.25 mm 粒级的土壤团聚体全氮含量分别增加 9.09% 和 6.82%、9.58% ~ 9.96% 和 7.28% ~ 7.66%、9.30% 和 8.14%。M100 处理与 CK 间差异不显著。上述结果表明, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下, 通过连续 3 年的定位试验, 有机肥等氮量替代化肥较单施化肥增加了耕层土壤各粒级水稳性团聚体有机碳、全氮含量, 说明长期有机肥等氮量替代化肥不仅促进大团聚体的形成, 从而提高团聚体稳定性, 也有利于增加团聚体有机碳、全氮养分含量, 提高土壤有机碳 (氮) 库。

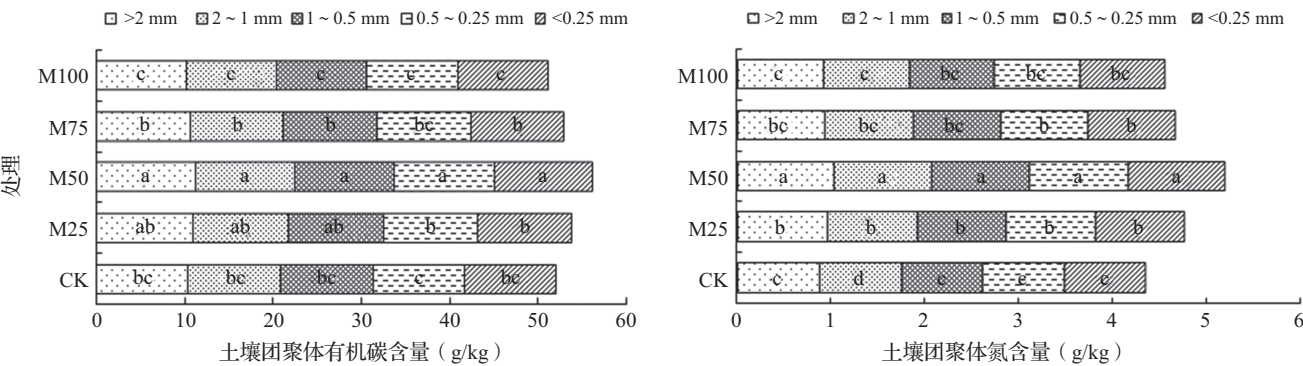


图 1 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体有机碳、全氮含量的影响

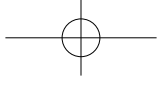
注: 同列不同小写字母表示同一粒径不同施肥处理间的差异显著性 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 有机肥等氮量替代化肥对土壤团聚体分布的影响

土壤团聚体的组成及其稳定性作为表征土壤物理特性的重要指标, 可以保证和协调土壤的水肥气热状况, 直接影响土壤肥力水平^[19]。有机肥施用可使有机肥中的有机物质与矿物质颗粒胶结, 促进土壤矿物质颗粒的团聚作用, 显著改善了土壤团聚体结构, 提高团聚体的水稳性^[26-27]。本研究表明, 在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下连续种植 3 年马铃薯, 有机肥等氮量替代化肥较单施化肥增

加了 >2 mm 粒级大团聚体含量, 降低了 <0.25 mm 粒级微团聚体含量, 这与前人在黑土^[28]、黄绵土^[29]、红壤^[30]等土壤上的研究结果具有一致性, 这说明有机肥替代化肥通过增施有机肥增加了土壤团聚体胶结有机物质, 促进了土壤颗粒和微团聚体的黏结^[31], 增强了团聚体的团聚化程度, 有利于形成大团聚体和较好的土壤结构。本研究中有有机肥等氮量替代化肥较单施化肥降低了 0.25 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体含量, 这与荣勤雷等^[32]在设施蔬菜田研究有机肥 / 秸秆替代化肥模式提高了 0.25 ~ 1 mm 粒级团聚体比例的结论不一致, 这可能是受土壤团聚体分级方法和土壤质地差异较



大的影响。此外,不同比例有机肥替代化肥处理(M25、M50、M75、M100)土壤团聚体分布存在差异,本研究的结果表明,有机肥替代M50处理对土壤团聚体分布的影响程度较大,其次是M75处理,M25相对较小,这可能是由于不同比例有机肥替代化肥处理的外源有机物料投入的数量、微生物和酶活性以及土壤性质的差异导致的,所以有机肥替代化肥比例在一定范围内有利于促进大团聚体的形成,改善土壤团聚体结构。随着有机替代年限的增加,不同比例有机肥替代化肥处理间的差异以及对土壤团聚体分布的影响结果可能发生变化,本文仅是3年的阶段性研究结果,对于不同有机替代比例对土壤团聚体结构分布的影响还需进一步研究。

3.2 有机肥等氮量替代化肥对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD和GMD值越大说明土壤团聚体结构越稳定^[33]。本研究表明,基于西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下连续种植3年马铃薯,无论是机械性团聚体还是水稳性团聚体,有机肥等氮量替代化肥氮处理较单施化肥处理显著增加了土壤团聚体 $R_{0.25}$ 含量、MWD和GMD,提高了土壤团聚体稳定性,这与前人^[9, 14-15, 18-19, 22]的研究结果基本一致。此外,不同有机肥替代化肥比例(M25、M50、M75、M100)对土壤团聚体稳定性的影响存在差异,本研究结果表明,M50和M75处理显著提高了土壤团聚体稳定性,较M100和M25处理效果明显,表明有机肥替代化肥比例在一定范围内有利于提高土壤团聚体的稳定性,这是因为有机肥替代化肥通过补充外源有机物质改善土壤结构,进而提高和保持土壤团聚体的稳定性^[34],且团聚体稳定性随有机肥施用量的增加而提高^[35],但也有研究表明,有机肥施用量增加并未对土壤团聚体稳定性产生显著影响^[10],这可能受到土壤质地、试验年限、肥料配比及覆盖栽培方式等因素的影响。

3.3 有机肥等氮量替代化肥对土壤团聚体有机碳、全氮含量的影响

土壤团聚体是赋存土壤有机碳(全氮)的重要场所,不同粒级团聚体的孔隙特性不同,致使有机碳(全氮)与矿物质颗粒的胶结作用存在一定差异,进而影响土壤有机碳(全氮)在不同粒级团聚体中的赋存与固定^[36-37]。本研究表明,在西北

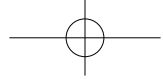
黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下,通过连续3年定位试验,有机肥等氮量替代化肥较单施化肥增加了耕层土壤各粒级水稳性团聚体有机碳、全氮含量,且有机肥等氮量替代化肥M50处理(50%有机肥氮+50%化肥氮)增加效果最明显,较CK耕层0~20 cm土壤水稳性团聚体有机碳、全氮含量分别显著增加7.32%~8.28%、18.2%~20.3%。这与张瑞等^[19]、毛霞丽等^[20]、李春越等^[22]、荣勤雷等^[32]的研究结果基本一致,这说明土壤中水稳性大团聚体是土壤有机碳(氮)的主要载体,有机肥替代化肥不仅向土壤直接输入了有机碳源,而且提高了微团聚体和大团聚体赋存有机碳(全氮)的能力,进而提升了土壤有机碳(全氮)的水平^[38-39],是改善土壤团聚体结构、维持和提高地力的有效措施。然而,不同有机肥替代化肥比例因外源有机物料投入的数量差异影响土壤团聚体有机碳、全氮含量,其输入的有机碳源多少可能直接影响土壤团聚体有机碳(全氮)水平,不同有机肥替代化肥比例随着有机替代年限增加可能导致其替代效果发生变化,还需进一步研究论证。

4 结论

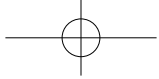
在西北黄土丘陵半干旱区黄绵土条件下连续种植3年马铃薯,无论是机械性团聚体还是水稳性团聚体,与单施化肥相比,有机肥等氮量替代化肥模式有利于降低0~20 cm土层土壤<0.25 mm粒级微团聚体占比,提高>2 mm粒级大团聚体占比,显著增加了团聚体 $R_{0.25}$ 的含量,提高了土壤团聚体MWD和GMD,增加了水稳性团聚体有机碳、全氮含量,且以有机肥等氮量替代50%的化肥氮模式(50%有机肥氮+50%化肥氮)效果最明显。这说明长期有机肥等氮量替代化肥有利于提高土壤团聚体的团聚化程度,促进微小团聚体向大团聚体转化,改善黄绵土土壤团聚体结构,提高了土壤团聚体的稳定性和团聚体赋存有机碳(氮)的能力,进而有利于提高土壤有机碳(氮)库,是维持和培肥地力的有效措施。

参考文献:

- [1] Chen Y J, Day S D, Wick A F, et al. Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon and hydraulic conductivity [J]. Science of the Total Environment, 2014, 494-495: 329-336.
- [2] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an



- indicator of soil functions; a review [J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122–137.
- [3] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 412–418.
- [4] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (1): 340–347.
- [5] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 [J]. *环境科学*, 2014, 35 (12): 4696–4704.
- [6] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 等. 秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25 (6): 36–44.
- [7] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (3): 159–165.
- [8] 乔丹丹, 吴名字, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (3): 92–99.
- [9] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Soil aggregate stability as affected by fertilization type under semiarid no-tillage conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (1): 284–292.
- [10] Leon M C C, Stone A, Dick R P. Organic soil amendments: Impacts on snap bean common root rot (*Aphanomyces euteiches*) and soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 31 (3): 199–210.
- [11] 吴宪, 张婷, 王蕊, 等. 化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (5): 933–941.
- [12] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响 [J]. *土壤学报*, 2010, 47 (4): 715–722.
- [13] 张大庚, 王凯琼, 栗杰, 等. 长期施有机肥对耕地棕壤团聚体及钙素分布的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (4): 154–158.
- [14] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (4): 1035–1041.
- [15] 李建华, 李华, 郜春花, 等. 长期施肥对晋东南矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响 [J]. *华北农学报*, 2018, 33 (5): 188–194.
- [16] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (1): 159–165.
- [17] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1473–1480.
- [18] 张平良, 郭天文, 刘晓伟, 等. 长期施肥与覆膜对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (7): 104–111.
- [19] 张瑞, 王鸿飞, 吴怡慧, 等. 化肥与有机肥配施对设施土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (2): 1–9.
- [20] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 828–838.
- [21] 付强, 张平良, 刘晓伟, 等. 有机肥替代部分化肥对半干旱区马铃薯产量、水分和氮素利用率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (10): 143–149.
- [22] 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.
- [23] Li X G, Li F M, Rengel Z, et al. Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland [J]. *Geoderma*, 2007, 139: 98–105.
- [24] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (5): 1619–1625.
- [25] 海龙, 姚拓, 张春红, 等. 黄土丘陵沟壑区不同年限苜蓿地土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38 (5): 51–56.
- [26] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 170–177.
- [27] Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physicochemical properties [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 148: 22–28.
- [28] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19 (2): 369–373.
- [29] 高飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (3): 100–107.
- [30] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响 [J]. *土壤*, 2007, 39 (5): 787–793.
- [31] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (1): 1–10.
- [32] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 等. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (7): 1084–1096.
- [33] Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China [J]. *Journal of Soils Sediments*, 2014, 14 (6): 1041–1049.



- [34] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 787–793.
- [35] 刘振东, 李贵春, 周颖, 等. 无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2239–2245.
- [36] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2333–2342.
- [37] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 南方3种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究与团聚体物理保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1063–1071.
- [48] 缪玉琳, 梁丰, 谢军, 等. 长期有机肥替代化肥对水稻土有机碳稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 512–522.
- [49] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2183–2193.

Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on the stability and organic carbon and total nitrogen content of soil aggregates in potato field of semi-arid area

ZHANG Ping-liang^{1, 2*}, FU Qiang³, LIU Xiao-wei^{1, 2}, YANG Si-cun^{1, 2} (1. Dry land Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070; 2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Water in Dry it was Farming of Gansu Province / Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northwestern China, Lanzhou Gansu 730070; 3. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: Through three years of positioning experiment, the effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on the stability and organic carbon and total nitrogen content of soil aggregates in potato field of semi-arid area, in order to explore the appropriate proportion and effects of organic manure replacing chemical fertilizer, and achieve the reducing fertilizer and increasing fertilizer efficiency. Five different fertilization treatments were set up in the field experiment: 100% chemical fertilizer nitrogen (CK), 25% organic manure nitrogen +75% chemical fertilizer nitrogen (M25), 50% organic manure nitrogen +50% chemical fertilizer nitrogen (M50), 75% organic manure nitrogen +25% chemical fertilizer nitrogen (M75), and 100% organic manure nitrogen (M100). The results showed that: compared with CK, organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen model was beneficial for reducing the proportion of soil micro-aggregates (<0.25 mm), increasing the proportion of large aggregates (>2 mm), and increasing significantly contents of $R_{0.25}$, mean weight diameters (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates in the soil depth of 0–20 cm, organic carbon and total nitrogen contents of water stable aggregates, and the increase amplitude of large aggregates (>2 mm) was the largest. The effect of M50 treatment was the best, which increased significantly organic carbon and total nitrogen contents of water stable aggregates by 7.32%–8.28% and 18.2%–20.3%, respectively, compared with CK. In conclusion, under the condition of loess soil in the semi-arid hilly region of northwest China, model of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen could promote the transformation of soil microaggregates (<0.25 mm) into macroaggregates, and increase the stability of soil aggregates and promote the enrichment of organic carbon (nitrogen) in aggregates, and increase soil organic carbon (nitrogen) storage, the effect of organic fertilizer nitrogen replacing 50% chemical fertilizer nitrogen mode was the most obvious.

Key words: organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen; potato; soil aggregate stability; organic carbon; total nitrogen