

朱翰绅,徐 聪,吴 迪,等. 减量施氮、秸秆还田和蚯蚓接种对黄河故道区土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(9):278–284.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.09.038

减量施氮、秸秆还田和蚯蚓接种对黄河故道区土壤团聚体及有机碳的影响

朱翰绅^{1,2}, 徐 聪^{1,2}, 吴 迪³, 刘昊旻^{1,2}, 李冠霖¹, 纪 程^{1,2}, 汪吉东^{1,2}, 张永春^{1,2}

(1. 江苏大学环境与安全工程学院,江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/国家农业环境六合观测实验站,江苏南京 210014; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095)

摘要:优化氮肥施用方式、提升土壤有机碳(SOC)水平是黄河故道区农业可持续发展的关键。通过持续3年的田间定位试验方法,探究减量施氮、秸秆还田和蚯蚓接种对江苏省黄河故道区沙质潮土团聚体构成及其SOC含量及活性等指标的影响。试验共设农民习惯施氮[FN:690 kg/(hm²·年)]、减量施氮[RN:540 kg/(hm²·年)]、减量施氮+秸秆还田(RS)、减量施氮+秸秆还田+接种蚯蚓(SE)4个处理。结果表明,与FN处理相比,RN处理下SOC含量有增加趋势,且其增加部分主要来源于小团聚体(>0.250~2.000 mm)比例及其所结合的SOC含量的提升。RS处理相对RN处理,全土SOC含量提高8.58%,且大团聚体SOC含量显著增加27.7%,但两者团聚体构成无显著差异。在RS处理基础上接种蚯蚓(SE)后,>0.250~2.000 mm小团聚体比例及其SOC贡献量分别显著下降33.3%和44.1%,导致全土SOC含量降低16.1%,这可能与秸秆还田下,0.250~2.000 mm小团聚体中土壤易氧化有机碳的贡献量高于其他粒径团聚体,在蚯蚓活动影响下可能更易于被利用分解有关,各处理下的作物产量并无显著差异。综上,在该地区通过接种蚯蚓改善土壤团粒结构、提高SOC水平的可行性有待进一步验证;土壤小团聚体是影响黄河故道区沙质潮土SOC固持的关键因素;相比常规施氮,减量施氮配合秸秆还田是提升土壤肥力的有效手段。

关键词:减量施氮;秸秆还田;蚯蚓接种;土壤有机碳;土壤团聚体

中图分类号:S158.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)09–0278–07

提升耕地质量、保障粮食安全是我国新发展阶段的重要战略^[1]。江苏省黄河故道区属黄淮海平原的一部分,总耕地面积为180多万hm²,是重要的粮食产区^[2]。但由于该地区土壤有机碳(SOC)水平较低^[3],土壤氮素保蓄能力差,作物高产主要依赖于大量的氮肥投入,而盲目施用氮肥易加剧土壤退化,且会导致面源污染和温室气体排放等一系列环境问题^[4]。因此,优化氮肥施用方式、提升SOC水平是黄河故道区农业可持续发展的关键。

较多研究表明,秸秆还田是增加SOC含量、提升土壤氮素保蓄能力的有效途径^[5–6]。前人基于¹⁵N原位示踪试验发现,秸秆还田相较于不还田处

理,当季肥料氮总损失可降低13.0%^[7]。然而,也有研究发现,常规秸秆还田措施下土壤的固碳效率较低,例如,Han等基于全国尺度的meta分析研究表明,秸秆的腐殖化系数仅为16.2%^[8];Xu等在黄河故道区的研究发现,常规秸秆还田下,土壤的固碳效率仅为0.13 mg/(hm²·年),以此推算SOC含量提升至黄淮海平原水平需要100年以上的时间^[9]。因此,常规秸秆还田难以实现SOC水平的快速提升,在耕地质量提升的紧迫需求下,秸秆还田的方式仍有待改进。

强化SOC的物理保护机制是提升秸秆还田下土壤固碳效率的重要手段^[10]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,可使SOC与微生物和胞外酶之间形成空间隔离,为SOC提供物理保护,减少SOC的分解^[11]。黄河故道区土壤多为砂质,且其大团聚体含量及团聚体稳定性较差,成为限制秸秆还田下土壤固碳效率的关键因素^[9]。蚯蚓作为“生态系统工程师”,不仅其肠道中存在的胶结物质对团聚体的形成有重要作用,而且可通过摄取有机物料并在其肠道微生物的作用下促进土壤碳的封存^[12]。然而,

收稿日期:2023–07–07

基金项目:江苏省重点研发计划(编号:BE2021378);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(21)1009]。

作者简介:朱翰绅(1997—),男,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事土壤肥力质量与氮循环研究。E-mail:hanshenzhu@outlook.com。

通信作者:徐 聪,博士,副研究员,研究方向为土壤养分循环与土壤肥力提升,E-mail:cxu@jaas.ac.cn;汪吉东,博士,研究员,研究方向为土壤肥力和作物养分管理,E-mail:jidongwang@jaas.ac.cn。

目前针对黄河故道区开展的秸秆还田配合蚯蚓接种的研究还较为缺乏。

本研究以江苏省黄河故道区土壤为研究对象,探究不同施氮水平、秸秆还田和蚯蚓接种处理下土壤团聚体粒径构成、各粒径团聚体 SOC 含量、易氧化有机碳(LOC)含量等指标的变化特征,以期为制定土壤肥力快速提升策略、助力区域农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验开始于 2018 年 10 月,地点位于江苏省盐城市滨海县界牌镇三坝村(34°5'52"N,119°51'44"E)。试验地属典型黄河故道小麦—玉米轮作区,气候温和湿润,年平均气温为 12~21℃;年平均降水量为 964.8 mm,且降水主要集中在夏季。供试土壤为沙质潮土,沙粒、粉粒和黏粒含量分别为 62%、25% 和 13%,其他基础理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基础理化性质

pH 值	有机碳 含量 (g/kg)	总氮 含量 (g/kg)	碱解氮 含量 (mg/kg)	有效磷 含量 (mg/kg)	速效钾 含量 (mg/kg)
8.35	11.03	1.25	79.6	8.42	63.3

1.2 试验设计

本试验共设 4 个处理,分别为:(1)农民习惯施氮(FN);(2)减量施氮(RN);(3)减量施氮+秸秆还田(RS);(4)减量施氮+秸秆还田+接种蚯蚓(SE)。试验采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,共 12 个小区,每个小区面积为 30 m²。在 SE 处理小区四周设置聚氯乙烯(PVC)板,板深入地表以下 30 cm,地上 20 cm,用于防止蚯蚓逃逸;于每季作物播种后进行蚯蚓接种,蚯蚓品种选用威廉腔环蚓,接种量为 60 g/m²,试验期间小麦季和玉米季蚯蚓成活率分别为 72.5% 和 89.1%。FN 处理的施氮量为当地常规用量[690 kg/(hm²·年)],小麦季、玉米季施氮量分别为 360、330 kg/hm²;其余处理均采用当地推荐施氮量[540 kg/(hm²·年)],即小麦季、玉米季施氮量分别为 270、240 kg/hm²。氮肥品种为尿素,小麦季和玉米季氮肥的基追比均为 4:6。磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾)均作为底肥一次性施入。磷肥(P₂O₅)施用量 2 季均为 120 kg/hm²;钾肥(K₂O)施用量为小麦季 90 kg/hm²,玉米季 60 kg/hm²。

1.3 样品采集与测定方法

各小区土壤样品均采集于小麦季作物收获期(2021 年 6 月)。采用“S”形采样法对每小区 0~20 cm 土壤样品进行采集,采集的土壤样品经风干磨细后过 10 目筛,用于分析全土各项理化指标。另外,在每小区内用铲子采集原状土壤样品,置于塑料盒中,去除根系、作物残茬后进行风干,以备团聚体指标的测定。

全土样品各项理化指标均采用常规方法^[13]进行测定:土壤 pH 值采用电位法(土水质量比为 1:2.5)测定;SOC 含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;LOC 含量采用高锰酸钾氧化-分光光度法测定;总氮(TN)含量采用浓硫酸消化-凯氏定氮法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷和速效钾含量则分别使用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法和乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

采用湿筛法对原状土壤样品进行团聚体分级。筛子孔径分别为 2.000、0.250、0.053 mm,可将全土分为 4 个粒径:大团聚体(>2.000 mm)、小团聚体(>0.250~2.000 mm)、微团聚体(>0.053~0.250 mm)和粉-黏颗粒(≤0.053 mm)。将分级后的各级样品于 40℃下烘干后称重并保存,分别测定各级团聚体的 SOC、LOC、TN 含量,测定方法与全土测定方法一致。

于 2020 年玉米季和 2021 年小麦季作物成熟时设置样方,人工收割样方内作物,在风干、脱粒后称量作物产量。

1.4 数据计算与分析

土壤团聚体平均重量直径(MWD,mm)和几何平均直径(GMD,mm)采用以下公式计算:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}; \tag{1}$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]. \tag{2}$$

式中: \bar{X}_i 为各粒径团聚体的平均直径,mm; W_i 为第 i 粒径团聚体所占百分比含量,%; n 为粒径分组的数量。

土壤非易氧化有机碳(NLOC,g/kg)含量由土壤 SOC 含量减去 LOC 含量得出。SOC 活度为土壤 LOC 含量与土壤 SOC 含量的比值。

团聚体 SOC(或 LOC)贡献率为该粒径团聚体

中 SOC(或 LOC)含量与该粒径团聚体质量百分比的乘积占全土 SOC(或 LOC)含量的比值。其中某粒径团聚体中 SOC(或 LOC)含量与该粒径团聚体质量百分比的乘积代表该粒径团聚体 SOC(或 LOC)贡献量。

试验数据使用 Microsoft Excel 2019 进行整理,采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析,所有数据结果均采用平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)表示,运用最小显著差异法(LSD)对各处理数据进行多重比较($\alpha=0.05$),采用 GraphPad Prism 8.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤团聚体构成及其稳定性的影响

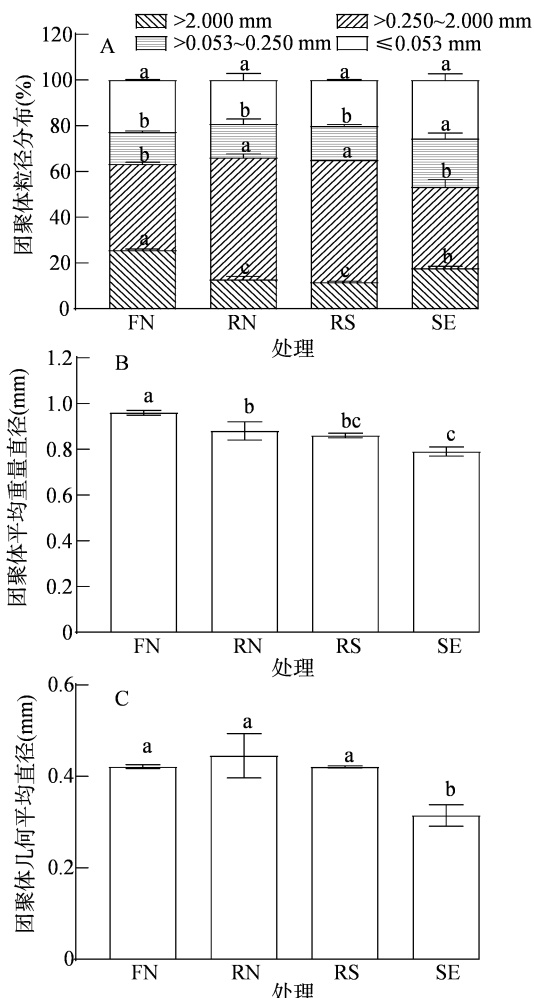
与 FN 处理相比,RN 处理下较大粒径团聚体(>0.250 mm)含量总体增加 4.37%(图 1-A),其中 $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体含量显著增加 41.0%,而 >2.000 mm 大团聚体含量显著减少 49.7%。RS 与 RN 处理间团聚体构成无显著差异。与 RS 处理相比,接种蚯蚓后较大粒径团聚体含量下降 17.9%,且下降主要发生在 $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体中,下降比例达 33.3%,而 >2.000 mm 大团聚体含量显著增加 52.1%。接种蚯蚓后, $>0.053 \sim 0.250$ mm 微团聚体以及 ≤ 0.053 mm 粉-黏颗粒的比例均有提升,其中微团聚体比例的增加达显著水平,为 40.9%。

各处理中,FN 处理团聚体的 MWD 最高(图 1-B),SE 处理最低。RN 处理相比 FN 处理,MWD 值显著降低 8.30%。对于 GMD 值而言(图 1-C),RN 处理最高,SE 处理最低。相比 RS 处理,SE 处理下 GMD 值显著降低 25.2%。

2.2 不同处理对全土和团聚体 SOC 含量及其活度的影响

与 FN 处理相比,RN 处理的全土 SOC 含量增加 11.9%(图 2),且其增加主要体现在较大粒径团聚体和微团聚体 SOC 含量上。在 RN 处理的基础上进行秸秆还田(RS)后,全土 SOC 含量上升了 8.58%,且 >2.000 mm 大团聚体内 SOC 含量显著增加 27.7%。与 RS 处理相比,接种蚯蚓后全土 SOC 含量下降 16.1%,且其降低主要表现在 >2.000 mm 大团聚体中(SOC 含量显著下降 36.1%)。

对于各粒径团聚体 SOC 贡献量以及贡献率而



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

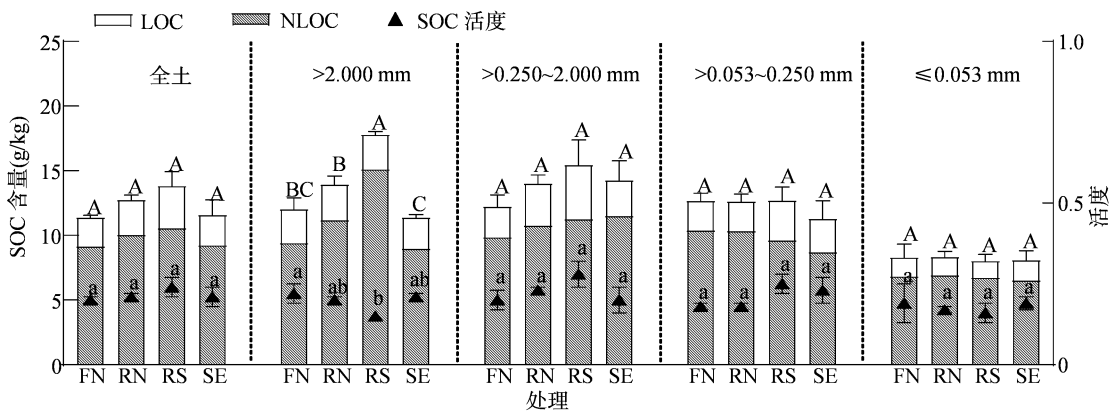
图 3、图 4 同

图1 土壤团聚体粒径分布及平均重量直径和几何平均直径

言(图 3-A、图 3-B),与 FN 处理相比,RN 处理 >2.000 mm 大团聚体 SOC 贡献量与贡献率分别显著降低 43.6%和 47.6%; $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体 SOC 贡献量与贡献率均上升,其中 SOC 贡献量增加 36.6%,达显著水平。RS 处理与 RN 处理间团聚体 SOC 贡献量与贡献率无显著差异。在 RS 基础上接种蚯蚓(SE)后, $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体 SOC 贡献量显著降低 44.1%; $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体 SOC 贡献率降低 25.8%,但未达显著水平。对于各粒径团聚体 LOC 贡献量与贡献率而言(图 3-C、图 3-D),在 RS 处理条件下,接种蚯蚓(SE)后 $>0.250 \sim 2.000$ mm 小团聚体 LOC 贡献量与贡献率分别显著降低 51.9%和 40.1%。

2.3 不同处理对土壤 TN 含量、速效养分含量、pH 值及产量的影响

团聚体以及全土 TN 含量变化趋势(图 4)与



SOC 含量为易氧化有机碳与非易氧化有机碳含量之和。柱上不同大写字母与小写字母分别代表不同处理有机碳含量及其活性存在显著差异($P < 0.05$)

图2 全土以及团聚体有机碳、易氧化有机碳含量及有机碳活性

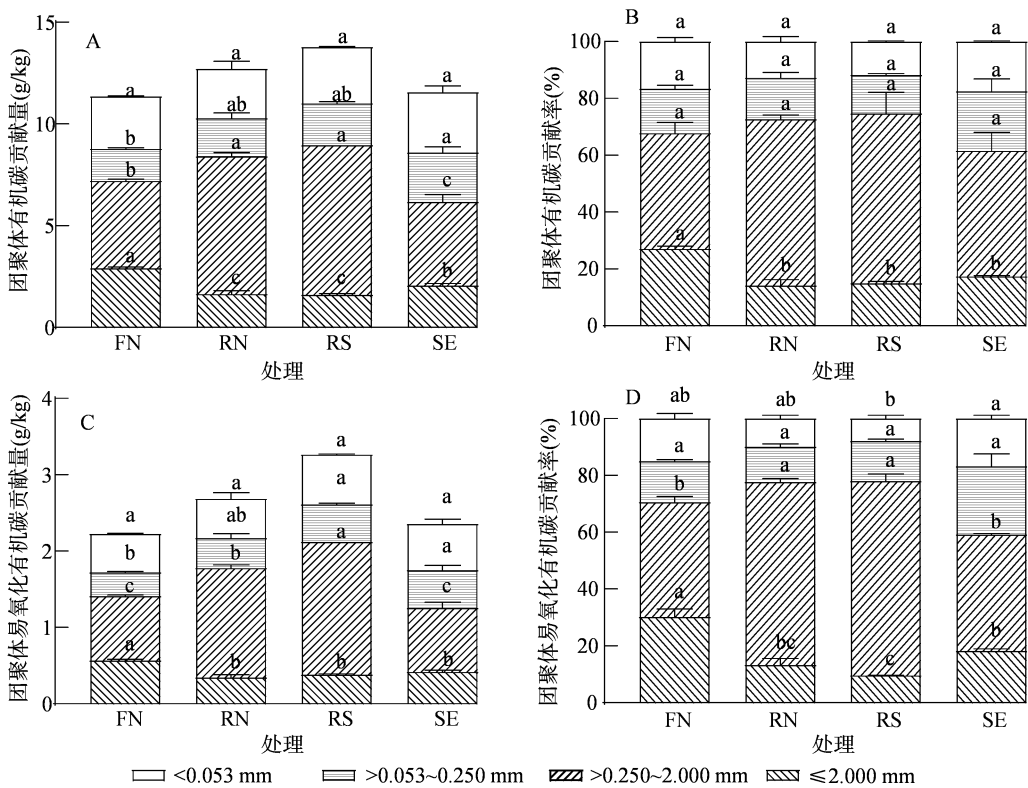


图3 团聚体有机碳及易氧化有机碳贡献量与贡献率

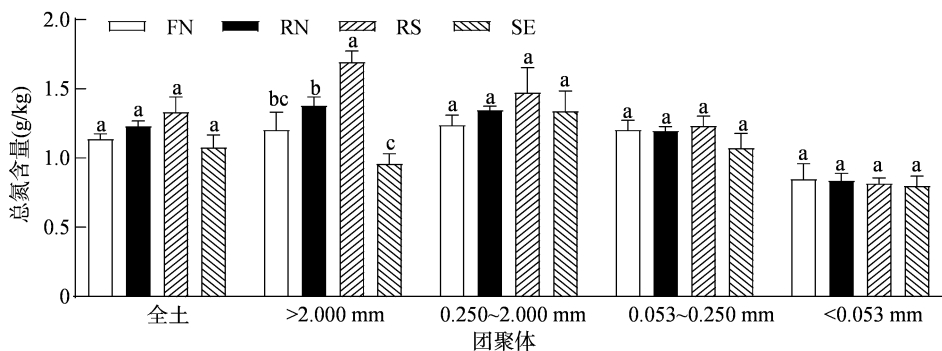


图4 全土以及团聚体总氮含量

SOC 含量相似。与 RN 处理相比,RS 处理下全土 TN 含量上升 8.33%,其中 >2.000 mm 大团聚体的 TN 含量显著增加 18.6%。SE 处理与 RS 处理相比,TN 含量降低了 19.2%,其中 >2.000 mm 大团聚体 TN 含量显著降低 43.4%。

与 FN 处理相比,减量施氮处理(RN)碱解氮含

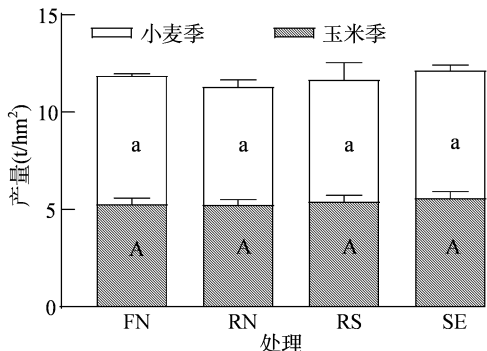
量显著降低 15.2%(表 2)。在 RN 处理的基础上秸秆还田(RS)后,碱解氮含量显著增加 24.7%。与 RS 处理相比,SE 处理碱解氮含量显著降低 25.4%。SE 处理有效磷含量与 RS 处理相比增加 12.8%,与 FN 处理相比显著增加 55.2%。不同处理下速效钾含量与 pH 值无显著差异。

表 2 土壤 pH 值及碱解氮、有效磷、速效钾含量

处理	pH 值	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
FN	8.18±0.05a	92.70±1.67a	18.50±0.52b	50.33±5.78a
RN	8.21±0.06a	78.58±4.81b	21.84±2.59ab	51.67±2.73a
RS	8.28±0.04a	98.01±1.58a	25.46±0.32ab	62.00±4.04a
SE	8.36±0.06a	73.15±1.67b	28.71±3.18a	57.00±2.89a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

各处理对 2 季作物的产量均无显著影响(图 5)。SE 处理 2 季作物总产量为最高,而 RN 处理最低。



柱上不同大写字母与小写字母分别代表不同处理小麦季和玉米季作物产量间存在显著差异($P<0.05$)

图5 不同处理下的小麦和玉米产量

3 讨论与结论

土壤较大粒径团聚体比例和 SOC 含量是判断土壤基础肥力的重要指标^[14-15]。本研究表明,与 FN 处理相比,RN 处理下较大粒径团聚体的比例和 SOC 含量均有增加趋势,表明减量施氮对土壤基础肥力具有提升作用。前人研究也发现了相同趋势^[16-17]。这可能是由于高量氮肥施用后,微生物对土壤碳的挖掘效应增强,导致 SOC 分解加快^[18]。通过对比 2 种较大粒径团聚体间的差异发现,减量施氮处理下土壤大团聚体和 SOC 含量的提升主要来源于 >0.250~2.000 mm 小团聚体,而 >2.000 mm 大团聚体的比例和 SOC 贡献率较 FN 处理均显著降低。这可能与不同粒径团聚体的聚合机制有关,减量施氮有利于增加土壤微生物量、促进菌丝生长,从而

使较小粒径团聚体(<0.250 mm)更易向 0.250~2.000 mm 小团聚体聚合^[19-20];而作物根系是聚合土壤 >2.000 mm 大团聚体的重要胶结物质,在减量施氮条件下,作物根系生物量的降低可能减缓了 0.250~2.000 mm 小团聚体向 >2.000 mm 大团聚体的聚合^[21]。

秸秆还田对 SOC 含量和土壤较大粒径团聚体含量的提升作用已被广泛报道^[22-25]。本研究也发现,RS 处理相对 RN 处理,SOC 含量呈现增加趋势,且 >2.000 mm 大团聚体中 SOC 含量的增加达显著水平。然而,就团聚体构成分析,秸秆还田并未造成显著差异。这可能由于:(1)前人研究发现的秸秆还田对土壤团聚体构成的影响多基于旋耕等常规耕作条件^[25],而本研究为玉米季免耕,免耕对土壤结构的保护作用可能掩盖了秸秆还田的影响;(2)秸秆的腐解过程较长,其对土壤团聚体的影响可能在长期尺度上才能表现出显著差异^[26],而本试验仅进行了 3 年,秸秆还田对土壤团聚体的影响尚未显现出来。就作物产量而言,不同处理间无显著差异,表明与常规管理相比,减量施氮和秸秆还田并没有以牺牲作物生产力为代价。因此,减量施氮配合秸秆还田可作为该地区 SOC 含量持续提升的有效手段。

较多研究表明,蚯蚓可提升土壤较大粒径团聚体比例,促进秸秆腐解,强化 SOC 的物理保护机制,从而提升 SOC 含量^[27-29]。例如,Sheehy 等的研究表明,秸秆还田下接种蚯蚓有利于促进 SOC 在 >2.000 mm 大团聚体中的积累^[30]。在本研究中,接种蚯蚓后 SOC 贡献量的显著提升仅发生在

>2.000 mm 大团聚体中,而>0.250~2.000 mm 小团聚体的比例及其 SOC 贡献量在接种蚯蚓后均显著降低。袁新田等的研究也发现了相似的趋势,相比单施秸秆,秸秆配施蚯蚓后土壤>2.000 mm 大团聚体比例提升了 295%,但>0.250~2.000 mm 小团聚体比例降低了 67.1%^[31]。这可能是由于:(1)秸秆还田条件下,>0.250~2.000 mm 小团聚体中 SOC 的活度最高,其 LOC 的贡献量也高于其他粒径团聚体,在蚯蚓活动影响下可能更易于被利用分解^[32];(2)供试土壤为沙土,相比前人研究中的黏壤土^[27],SOC 易于向深层土壤淋溶,而蚯蚓的掘土行为使土壤孔隙增加^[33],促进了 SOC 的淋溶过程;(3)供试蚯蚓为上食下居型,可将在上层取食的 SOC 迁移到深层土壤,导致表层 SOC 含量降低^[34];(4)蚯蚓的分泌物和排泄物使土壤中微生物活性增强,促进了 SOC 分解的激发效应,导致部分老碳分解^[35-37]。由于 SOC 是团聚体形成的核心,蚯蚓接种处理下 SOC 的消耗也可能是 0.250~2.000 mm 小团聚体比例降低的主要原因^[38]。同时,本研究发现,减量施氮、秸秆还田和蚯蚓接种对 SOC 含量的影响均主要体现在土壤>0.250~2.000 mm 小团聚体中,因此小团聚体可认为是调控黄河故道区土壤固碳的重要因子。

本研究发现,相比未进行秸秆还田的处理,秸秆还田后土壤碱解氮含量显著提升了 24.7%。这可能主要归因于高 C/N 值秸秆(本研究中供试秸秆的 C/N 值为 76:1)还田后,微生物对可利用氮的固定增加,从而降低了氮素损失^[39]。然而,在秸秆还田的基础上接种蚯蚓后,土壤碱解氮含量显著降低,这同样可能与蚯蚓掘土行为导致的氮素淋溶增多有关。在沙质土壤中接种蚯蚓后,磷素也有较高的淋溶风险,但在本研究中,接种蚯蚓后土壤有效磷含量高于仅秸秆还田处理,这可能是由于蚯蚓肠道内的微生物活动促进了有机磷的矿化,从而增加了土壤有效磷的供应^[40-41]。

相比常规施氮,减量施氮可通过增加土壤>0.250~2.000 mm 小团聚体的 SOC 含量提升全土 SOC 水平。减量施氮配合秸秆还田可显著提升>0.250~2.000 mm 小团聚体 SOC 含量,但土壤团聚体构成未发生显著变化。在减量施氮、秸秆还田基础上接种蚯蚓后,>0.250~2.000 mm 小团聚体比例及其 SOC 贡献量均显著降低,从而导致全土 SOC 含量下降。因此,土壤 0.250~2.000 mm 小团

聚体是影响黄河故道区沙质潮土 SOC 固持的关键因素;相比常规施氮,减量施氮配合秸秆还田是提升土壤肥力的有效手段;但在该地区通过接种蚯蚓改善土壤团粒结构、提高 SOC 水平的可行性仍有待进一步验证。

参考文献:

- [1] Yan H M, Ji Y Z, Liu J Y, et al. Potential promoted productivity and spatial patterns of medium - and low - yield cropland land in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(3): 259 - 271.
- [2] 李传哲, 章 欢, 姚文静, 等. 生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3424 - 3432.
- [3] Yan X Y, Cai Z C, Wang S W, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(3): 1487 - 1496.
- [4] 苏成国, 尹 斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. *土壤*, 2005, 37(2): 113 - 120.
- [5] Kubar K A, Huang L, Lu J W, et al. Long - term tillage and straw returning effects on organic C fractions and chemical composition of SOC in rice - rape cropping system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 65(1): 125 - 137.
- [6] Zhou B J, Jiao C X. Effects of straw return on soil nitrogen leaching [J]. *Bioresources*, 2023, 18(1): 220 - 227.
- [7] Xu C, Han X, Zhuge Y P, et al. Crop straw incorporation alleviates overall fertilizer - N losses and mitigates N₂O emissions per unit applied N from intensively farmed soils; an in situ ¹⁵N tracing study [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 764: 142884.
- [8] Han X, Xu C, Dungait J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China; a system analysis [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 1933 - 1946.
- [9] Xu C, Wang J D, Wu D, et al. Optimizing organic amendment applications to enhance carbon sequestration and economic benefits in an infertile sandy soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303: 114129.
- [10] Lian H L, Wang Z Y, Li Y N, et al. Straw strip return increases soil organic carbon sequestration by optimizing organic and humus carbon in aggregates of mollisols in Northeast China[J]. *Agronomy*, 2022, 12(4): 784.
- [11] Manirakiza N, Seker C. Effects of natural and artificial aggregating agents on soil structural formation and properties - a review paper [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, 27(12A): 8637 - 8657.
- [12] Lemtiri A, Colinet G, Alabi T, et al. Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review[J]. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 2014, 18(1): 121 - 133.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Vogel H J, Balseiro - Romero M, Kravchenko A, et al. A holistic

- perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13152.
- [15] Yang C, Liu N, Zhang Y J. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration [J]. *Geoderma*, 2019, 337: 444 – 452.
- [16] Gao Y X, Song X, Liu K X, et al. Mixture of controlled – release and conventional urea fertilizer application changed soil aggregate stability, humic acid molecular composition, and maize nitrogen uptake [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147778.
- [17] 周 莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99 – 105.
- [18] Zhu Z K, Fang Y Y, Liang Y Q, et al. Stoichiometric regulation of priming effects and soil carbon balance by microbial life strategies [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 169: 108669.
- [19] Sheldrake M, Rosenstock N P, Mangan S, et al. Responses of arbuscular mycorrhizal fungi to long – term inorganic and organic nutrient addition in a lowland tropical forest [J]. *The ISME Journal*, 2018, 12: 2433 – 2445.
- [20] Pan S, Wang Y, Qiu Y P, et al. Nitrogen – induced acidification, not N – nutrient, dominates suppressive N effects on arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6568 – 6580.
- [21] Bai T S, Wang P, Ye C, et al. Form of nitrogen input dominates N effects on root growth and soil aggregation: a meta – analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 157: 108251.
- [22] Dong L L, Wang H H, Shen Y, et al. Straw type and returning amount affects SOC fractions and Fe/Al oxides in a rice – wheat rotation system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 183(4): 104736.
- [23] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942 – 27952.
- [24] Bu R Y, Ren T, Lei M J, et al. Tillage and straw – returning practices effect on soil dissolved organic matter, aggregate fraction and bacteria community under rice – rice – rapeseed rotation system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106681.
- [25] Ndzelu B S, Dou S, Zhang X W. Corn straw return can increase labile soil organic carbon fractions and improve water – stable aggregates in Haplic Cambisol [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(6): 1018 – 1030.
- [26] Zhao H L, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize – wheat double cropping system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178 – 186.
- [27] Zhu X Y, Hu Y C, Wang W, et al. Earthworms promote the accumulation of maize root – derived carbon in a black soil of Northeast China, especially in soil from long – term no – till [J]. *Geoderma*, 2019, 340: 124 – 132.
- [28] Li Y P, Wang J, Shao M A. Application of earthworm cast improves soil aggregation and aggregate – associated carbon stability in typical soils from Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278(Pt1): 111504.
- [29] Zhang W X, Hendrix P F, Dame L E, et al. Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2576.
- [30] Sheehy J, Nuutinen V, Six J, et al. Earthworm *Lumbricus terrestris* mediated redistribution of C and N into large macroaggregate – occluded soil fractions in fine – textured no – till soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 140: 26 – 34.
- [31] 袁新田, 焦加国, 朱 玲, 等. 不同秸秆施用方式下接种蚯蚓对土壤团聚体及其中碳分布的影响 [J]. *土壤*, 2011, 43(6): 968 – 974.
- [32] Zhang M, Zou X M, Schaefer D A. Alteration of soil labile organic carbon by invasive earthworms (*Pontoscolex corethrurus*) in tropical rubber plantations [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 74 – 79.
- [33] Brown G G, Barois I, Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36(3/4): 177 – 198.
- [34] Prescott C E, Vesterdal L. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 498(1/2/3/4): 119522.
- [35] Binet F, Fayolle L, Pussard M, et al. Significance of earthworms in stimulating soil microbial activity [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(1): 79 – 84.
- [36] Wachendorf C, Potthoff M, Ludwig B, et al. Effects of addition of maize litter and earthworms on C mineralization and aggregate formation in single and mixed soils differing in soil organic carbon and clay content [J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(3): 161 – 169.
- [37] Wu Y P, Shaaban M, Peng Q, et al. Impacts of earthworm activity on the fate of straw carbon in soil: a microcosm experiment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(11): 11054 – 11062.
- [38] Yang S, Wang Y X, Wang Z G, et al. Interactive effects of conservation tillage on the aggregate stability and soil organic carbon [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, 185(4): 505 – 512.
- [39] Xu C, Han X, Ru S H, et al. Crop straw incorporation interacts with N fertilizer on N₂O emissions in an intensively cropped farmland [J]. *Geoderma*, 2019, 341: 129 – 137.
- [40] Ros M B H, Hiemstra T, van Groenigen J W, et al. Exploring the pathways of earthworm – induced phosphorus availability [J]. *Geoderma*, 2017, 303: 99 – 109.
- [41] Vos H M J, Ros M B H, Koopmans G F, et al. Do earthworms affect phosphorus availability to grass? A pot experiment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 79: 34 – 42.