

刘昊颢,徐 聪,孙 丽,等. 生物炭和聚丙烯酰胺施用对土壤有机碳含量的影响及生态经济效益分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):215-222.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.12.030

生物炭和聚丙烯酰胺施用对土壤有机碳含量的影响 及生态经济效益分析

刘昊颢^{1,2}, 徐 聪^{1,2}, 孙 丽², 朱翰绅^{1,2}, 李冠霖¹, 汪吉东^{2,3}, 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/
农业农村部江苏耕地保育科学观测站,江苏南京 210014; 3. 江苏大学农业装备工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:为探究在黄河故道区中低产田平衡作物生产力、经济效益和生态可持续性的综合改良方案,通过田间试验方法,设置耕作方式、聚丙烯酰胺(PAM)施用、生物炭施用3个因素各2个水平,共8个处理,对作物产量、土壤有机碳(SOC)含量、土壤团聚体组成、净生态经济效益(NEEB)等指标进行分析。结果表明,生物炭施用分别提高SOC含量、大团聚体含量和作物产量6.7%~23.3%、1.7%~10.3%和1.74%~5.14% ($P < 0.05$)。每提升1%的大团聚体含量,可提升0.379 1 g/kg的SOC;每提升1 g/kg的SOC,可以提升0.186 9 t/hm²产量。耕作方式对SOC储量影响显著,相同物料施用下免耕处理的SOC储量、大团聚体含量和作物产量均高于旋耕处理,但仅施PAM处理对SOC含量、大团聚体含量及产量无显著影响($P > 0.05$)。线性回归模型表明,SOC含量分别与大团聚体含量和作物产量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),表明提升土壤团聚性和SOC含量是作物增产的关键因素。免耕条件下,PAM与生物炭配施处理下的SOC含量、产量均为最高,分别为11.95 g/kg和1.11 t/hm²,且温室气体排放成本为各处理中最低,可作为兼顾作物生产力和生态效益的改良方案,但由于投入成本提高,生物炭与PAM配施措施下的农户经济效益和NEEB较对照均显著降低,因此从粮食安全及生态改善角度考虑,应完善生态补偿机制,以调动农户积极性,促进改良措施落地。

关键词:生物炭;聚丙烯酰胺;免耕;有机碳;净生态经济效益

中图分类号:S158.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)12-0215-08

良好的土壤地力是粮食丰产的重要基础^[1],而目前我国耕地中仍有约70%为中、低等地,极大限制了粮食的可持续增产^[2]。通过合理措施提升土壤地力是保障我国粮食安全的关键举措。

黄河故道区总耕地面积达183.2万hm²,属黄淮海平原的一部分,是我国重要的粮食生产区^[3]。但由于土壤肥力普遍较低,作物生产力较差,该地区成为土壤改良的重点区域,也是粮食增产的主要潜力区之一。该地区农户在生产中一般采用增加化学肥料投入的方式保障作物产量水平,但由于该地区土壤有机碳(SOC)含量低、养分保蓄能力

差^[4],高量肥料投入非但对产量增加效果不明显^[5],还导致了一系列的环境问题^[6]。因此,要实现可持续性的土壤改良,在优化化学养分施用方式的同时,还应重视改善土壤的基础肥力^[7-8]。

SOC在优化土壤结构、提升保水保肥能力方面发挥着关键作用,是土壤基础肥力的重要保证^[7-8]。较多研究表明,施用生物炭是提升SOC累积的有效手段^[9-10],但黄河故道区土壤沙性重、结构差的特征使生物炭的固碳效率受到一定限制^[11]。因此,在施用有机物料的同时,应配合其他调理措施以提升土壤固碳速率。聚丙烯酰胺(PAM)是一种高分子聚合物,可作为土壤调理剂用于提升土壤团聚性,提高土壤保水性能等^[12]。较多研究表明,PAM与有机物料配施可有效提升有机物料固碳效率,促进SOC含量快速提升^[13]。然而针对黄河故道区土壤,探究有机物料与PAM配施对土壤SOC含量影响的研究还较少。

各项措施应用后短期内的改良、增收成效是影响农户接纳程度和技术推广规模的重要因素^[14],因此,虽然较多研究表明SOC的提升需要经历长期过

收稿日期:2022-08-30

基金项目:江苏省重点研发计划(编号:BE2019378);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(21)1009];国家甘薯产业技术体系建设专项(编号:CARS-10);国家自然科学基金(编号:41907069)。
作者简介:刘昊颢(1997—),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为土壤肥力提升。E-mail:liuhaokuang1@163.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:xcu@jaas.ac.cn;张永春,博士,研究员,研究方向为作物营养与施肥,E-mail:yczhang66@sina.com。

程^[15],但相关改良措施的短期应用成效和经济效益也是需要考量的关键因素。同时,通过改良措施实现对 SOC 储量的提升是中和温室气体(GHG)排放的重要途径之一,在“碳中和”背景下,还应重视评估土壤固碳过程所带来的生态效益^[16]。净生态经济效益(NEEB)是从货币角度量化措施施行后经济和生态效益的综合性指标,在分析中兼顾了作物产量、农户经济效益、碳排放及土壤固碳效应等因素,在评估技术的应用效益方面被较多采用^[17-18]。Xu 等通过分析 NEEB,评估了在黄河故道区实现增产、固碳、经济效益提升的有机物料最优施用量^[3]。然而,该地区生物炭及 PAM 施用下的 NEEB 仍缺乏系统分析。

本研究以黄河故道区典型中低产田为研究对象,通过田间试验方法,探究旋耕和免耕条件下生物炭和 PAM 施用后 SOC、作物产量、NEEB 等指标的变化规律,以期为该地区土壤地力快速提升措施的制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验始于 2020 年 10 月,试验地点位于江苏省盐城市滨海县现代农业产业园区(34.020 449°N, 119.798 872°E),属黄河故道区典型中低产田区,种植模式为小麦—玉米轮作。该地气候属暖温带季风气候,年平均降水量 942.6 mm,年平均气温 14.1℃。供试土壤 0~20 cm 的基础理化性质为:pH 值 8.60, SOC 含量 9.47 g/kg,碱解氮含量 64.43 mg/kg,有效磷含量 16.26 mg/kg,速效钾含量 213 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采取田间试验的方法,共设置耕作方式、PAM 施用、生物炭施用 3 个因素。其中耕作方式分为小麦、玉米季均旋耕处理(简称旋耕)和小麦季旋耕—玉米季免耕处理(简称免耕)2 类;PAM 施用量分为 0、30 kg/hm² 2 个水平;生物炭施用量分 0、15 000 kg/hm² 2 个水平。共设置 8 个处理,分别为仅旋耕(CT)、旋耕+PAM(PT)、旋耕+生物炭(BT)、旋耕+PAM+生物炭(P+BT)、仅免耕(CN)、免耕+PAM(PN)、免耕+生物炭(BN)、免耕+PAM+生物炭(P+BN)。每处理重复 3 次,采用随机区组设计,小区面积为 25.2 m²。本研究供试 PAM 为阴离子型,分子量为 1 000 万~1 200 万;

供试生物炭购自江苏建湖倍增生物科技有限公司,其基本理化性质为:pH 值 7.12,全氮、全磷、全钾含量分别为 7.13、1.61、35.02 g/kg,全碳含量为 65.6%,比表面积为 89.16 m²/g。对每个小区施用等量化肥,施用方式为撒施。玉米季氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥施用量分别为 270.0、72.0、45.0 kg/hm²;小麦季氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥施用量分别为 270.0、75.0、37.5 kg/hm²。小麦季氮肥分基肥、拔节肥 2 次施用,比例为 1:1;玉米季氮肥分基肥、苗肥和穗肥施用,比例为 2:1:2。小麦、玉米季磷、钾肥均在播种前一次性施用。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集与测定 采样时间为玉米季收获期(2021 年 9 月 30 日),小麦季收获期(2021 年 6 月 9 日)。

1.3.1.1 作物产量及植株氮含量测定 作物产量采用样方法测定。小麦收获时,于每小区选取 3 组 0.5 m² 样方对小麦穗部进行采收,风干后进行脱粒;玉米收获时,于每小区选取 1 组 2.8 m² 样方对穗进行采收,风干后进行脱粒。样方籽粒脱粒后进行称质量,计算作物产量。在测产同时,每小区选取代表性的小麦植株 10 株和玉米植株 3 株进行采集、风干,分籽粒和秸秆 2 部分于 105℃ 下杀青、65℃ 下烘干后称取干质量,计算风干样品含水率和各处理干物质累积量。采用凯氏定氮法对植株样品的氮含量进行测定,根据各部位氮含量和干物质累积量计算氮累积量^[3,19]。

1.3.1.2 土壤样品采集与测定 于玉米收获后,采用“S”形采样法对每小区 0~20 cm 土壤样品进行采集,经风干磨细后过 100 目筛待测。在每小区内用铲子铲取 3 点样品,置于塑料盒中,去除根系、作物残茬后进行风干、待测。分别运用重铬酸钾—外加加热法及 333 mmol/L 高锰酸钾氧化比色法对 0~20 cm 土壤 SOC 含量、土壤易氧化有机碳(LOC)进行测定。采用湿筛法对塑料盒内样品进行团聚体分级,筛子孔径为 2、0.25、0.053 mm,其中粒径大于 0.25 mm 的团聚体计为大团聚体。分级后将每级样品于 40℃ 下烘干后称质量并分别保存,采用重铬酸钾—外加加热法测定各级团聚体 SOC 含量^[19]。

1.3.2 计算方法 SOC 储量使用以下公式计算:

$$SOC_{ST} = SOC_{CT} \times BD \times H \times 10. \quad (1)$$

式中: SOC_{ST} 为 SOC 储量,t/hm²; SOC_{CT} 为 SOC 含量,g/kg; BD 为土壤容重,t/m³; H 为采样土层厚度,m。

土壤活度(Lability)使用以下公式计算:

$$Lability = LOC/SOC_{CT}。 \quad (2)$$

式中:LOC 为易氧化有机碳含量,g/kg。

非易氧化有机碳(NLOC)含量等于 SOC 含量减去 LOC 含量。

平均质量直径使用以下公式计算:

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

式中:MWD 为平均质量直径,mm; D_i 是各粒径等级团聚体的平均直径,mm; W_i 是各个粒级的团聚体质量与团聚体总质量的比例。

氮肥偏生产力使用以下公式计算:

$$PFP = Y/F。 \quad (4)$$

式中:PFP 为氮肥偏生产力,kg/kg; Y 是施用氮肥作物的产量,kg/hm²; F 是氮肥纯氮投入量,kg/hm²。

在计算 NEEB 时,成本包括农事成本和生态成本 2 个部分。农事成本是指物料、机械和人工成本。其中,氮肥(N)价格 3.7 元/kg,磷肥(P₂O₅)价格 5.0 元/kg,钾肥(K₂O)价格 5.0 元/kg;生物炭单价 3 000 元/t;PAM 单价 200 元/kg;麦种单价为 4.5 元/kg,播种量为 300 kg/hm²;玉米种单价为 55.6 元/万粒,播种量为 10.5 万粒/hm²。机械耕作单价为 600 元/(hm²·季);其他机械成本为 600 元/(hm²·季)。物料施用的人力费用为 200 元/t;其他人力费用为 2 200 元/(hm²·年)。生态成本主要考虑总温室气体(GHG)排放成本,包括土壤 N₂O 排放、燃料引起的 CO₂ 排放和 SOC 损失等部分。本研究假设 PAM、生物炭施用对土壤 N₂O 排放没有显著影响^[20],N₂O 排放根据按照化肥氮排放因子为 1% 进行计算;根据 N₂O 相对 CO₂ 的辐射强迫(265 W/m²)将其折算为 CO₂ 当量^[21]。本研究中没有考虑 CH₄,因为旱地土壤通常为 CH₄ 排放的库,且 CH₄ 的吸收对总 GHG 排放的贡献较小^[22]。燃料消耗引起的 CO₂ 排放系数取 3.93 kg/L^[23]。SOC 损失[t/(hm²·年)]计算为土壤固碳量的负数,具体通过以下公式计算:

$$SOC_{loss} = -1 \times (stock_t - stock_i) / d。 \quad (5)$$

式中:SOC_{loss} 为 SOC 损失,t/(hm²·年);stock_t 和 stock_i 分别是试验结束和试验起始年份的 SOC 储量,t/hm²;d 是试验持续时间,年,在本研究中为 1。

总 GHG 排放[GHG,t/(hm²·年)]使用以下公式计算:

$$GHG = C_{N_2O} + C_{fuel} + C_{SOC}。 \quad (6)$$

式中: C_{N_2O} 、 C_{fuel} 和 C_{SOC} 分别代表土壤 N₂O 排放、燃料引起的 CO₂ 排放和 SOC 损失的 CO₂ 当量,t/(hm²·年)。

根据前人研究,将 CO₂ 的价格定为 232.7 元/t。GHG 排放成本[元/(hm²·年)]表示将温室气体排放到大气中加速全球变暖的货币成本,通过 GHG [t/(hm²·年)]乘以 CO₂ 价格(元/t)计算^[18]。

产量收益中,小麦和玉米的价格参照《中国农产品价格调查年鉴》,分别取 2.52、2.49 元/kg。农户经济效益等于产量收益减去农事成本。NEEB 等于农户经济效益减去 GHG 排放成本。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2020 对试验数据进行收集与整理,采用 SPSS 21.0 单因素方差分析及 LSD 多重比较方法对不同处理间的各项数据进行差异性分析及均值比较,并对耕作方式、生物炭的施用及 PAM 的施用进行多因素方差分析,采用 GraphPad Prism 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 SOC 含量及 SOC 储量

生物炭施用对 SOC 含量影响极显著($P < 0.01$, 表 1)。相比无生物炭施用处理,生物炭施用处理下的 SOC 含量均显著提升($P < 0.05$),且免耕条件下的提升幅度(19.2% ~ 23.3%)高于旋耕(6.7% ~ 12.1%)。耕作方式也对 SOC 含量无显著影响($P > 0.05$),相同物料施用处理下,免耕条件下的 SOC 含量均高于旋耕。但 PAM 施用对 SOC 含量无显著影响($P > 0.05$)。就各处理进行整体分析可知,P + BN 处理下的 SOC 含量为最高(11.95 g/kg)。在 SOC 活度方面,PN 处理的 SOC 活度最高(0.57),但各处理间的 SOC 活度并无显著性差异($P > 0.05$)。相比无生物炭施用处理,生物炭施用处理下的 SOC 活度均呈下降趋势,且免耕条件下的下降幅度(21.9% ~ 28.8%)高于旋耕(6.1% ~ 17.6%)。SOC 储量趋势与 SOC 含量一致,P + BN 处理的 SOC 储量为最高(26.81 t/hm²) (图 1)。

2.2 土壤团聚体

生物炭施用可极显著影响土壤大团聚体含量($P < 0.01$, 表 1)。相比无生物炭施用处理,生物炭施用处理的土壤大团聚体含量均显著提升($P < 0.05$),平均增加 1.7% ~ 10.3%。虽然 PAM 施用和耕作方式都对土壤大团聚体含量无显著影响($P > 0.05$),但仅施加 PAM 处理较无物料施用处理

表 1 多因素方差分析

因素	因变量									
	SOC 含量	SOC 储量	LOC	NLOC	活度	大团聚体含量	MWD	产量	氮累积量	偏生产力
耕作方式	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
生物炭	**	ns	ns	ns	ns	**	**	**	ns	**
PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
耕作方式×生物炭	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
耕作方式×PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
生物炭×PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
耕作方式×生物炭×PAM	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	**

注: * 和 ** 分别表示两指标间显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 相关。

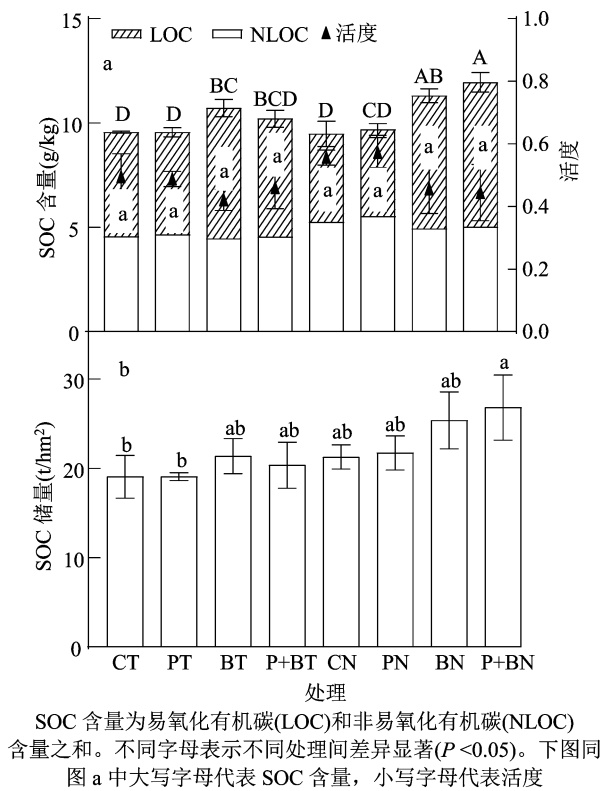


图 1 各处理下 SOC 含量、活度(a)及 SOC 储量(b)

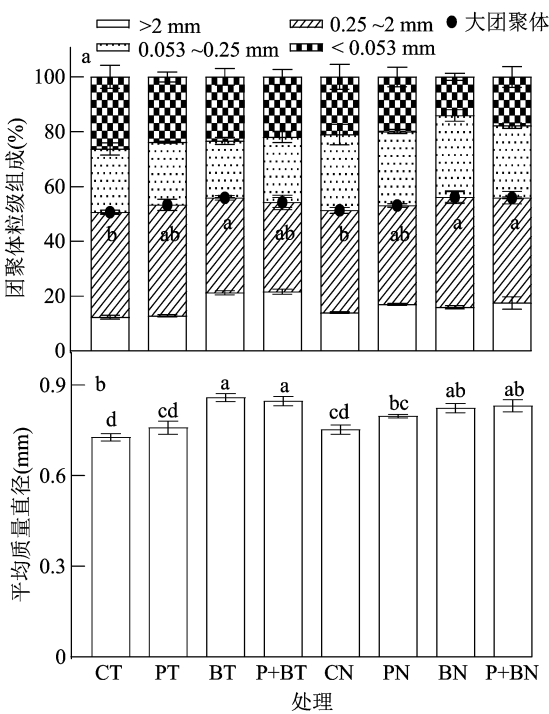


图 2 各处理下的土壤团聚体粒级组成(a)及平均质量直径(b)

2.3 产量及氮累积量

可提升大团聚体含量,增加比例为 3.45% ~ 5.17%。就各处理进行整体分析可知,BN 处理下的土壤大团聚体含量为最高(56.1%)。在平均质量直径方面,相比无生物炭施用处理,生物炭施用处理下的土壤平均质量直径均显著提升($P < 0.05$),且旋耕条件下的提升幅度(11.5% ~ 18.0%)高于免耕(4.27% ~ 9.44%)。PAM 施用和耕作方式对土壤平均质量直径皆无显著影响($P > 0.05$)。BT 处理下的土壤平均质量直径为最高(0.86 mm)(图 2)。

生物炭施用对小麦、玉米总产量影响极显著($P < 0.01$,表 1)。相比无生物炭施用处理,生物炭施用处理下的总产量均显著提升($P < 0.05$),平均增加 1.74% ~ 5.14%,但 PAM 施用和耕作方式都对总产量无显著影响($P > 0.05$)。对各处理进行整体分析可知,免耕处理当中 P+BN 处理下的总产量为最高(1.11 t/hm²),相较于 CN 处理增幅为 3.82% ($P < 0.05$);而旋耕条件下 P+BT 处理下的总产量也为最高(1.09 t/hm²),比 CT 处理提升了 4.51% ($P < 0.05$)。就氮累积量而言,P+BN 处理下的氮累积量为最高(275.57 kg/hm²)。偏生产力

的趋势与总产量相一致,以 P + BN 处理下的偏生产力为最高(20.52 kg/kg)(图 3)。

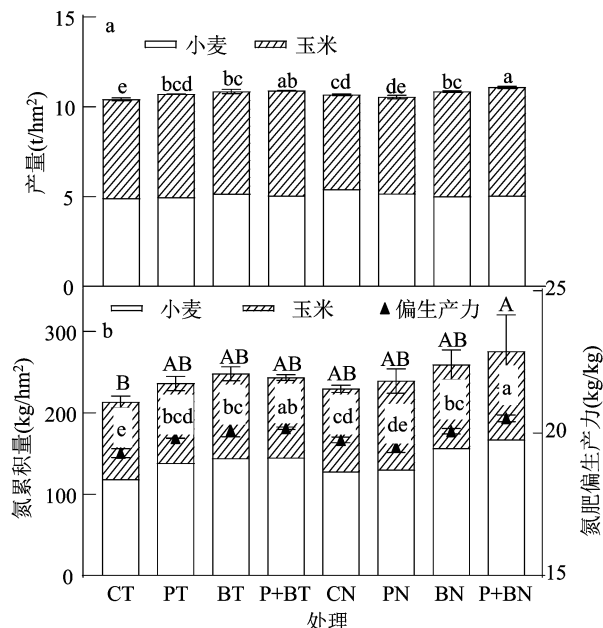
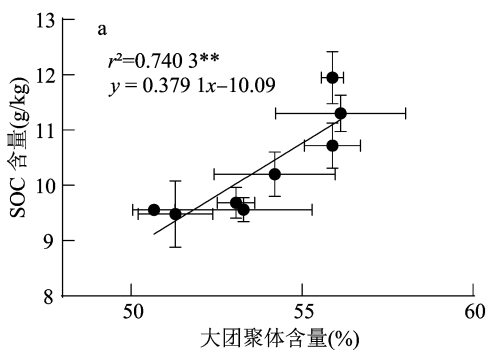


图 b 中大写字母代表氮累积量,小写字母代表氮肥偏生产力

图3 各处理下产量(a)、氮累积量及偏生产力(b)

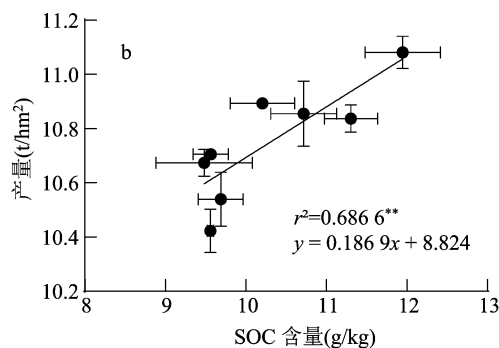
2.4 土壤大团聚体含量、SOC 含量及作物产量间的关系

土壤大团聚体含量与 SOC 含量间及 SOC 含量



图中**表示两指标间线性关系极显著($P < 0.01$)

图4 土壤大团聚体含量与 SOC 含量(a)及 SOC 含量与产量(b)间的关系



2.5 不同粒级团聚体的 SOC 含量

在 >2 mm 粒级的团聚体中,BT 处理下的 SOC 含量最高(18.92 g/kg),且旋耕条件下的提升幅度(0.8% ~ 17.5%)高于免耕条件(1.4% ~ 11.0%)。在 0.25 ~ 2 mm 粒级的团聚体中,SOC 含量与全土 SOC 含量趋势一致,且免耕条件下的提升幅度(23.8% ~ 24.5%)高于旋耕(3.7% ~ 6.5%),以 P + BN 处理下的 SOC 含量为最高(20.62 g/kg)。在 <0.25 mm 粒级的团聚体中,各处理团聚体的 SOC 含量并无显著性差异($P > 0.05$)。在 0.053 ~ <0.25 mm 粒级的团聚体中,以 PN 处理下的 SOC 含量为最高(17.73 g/kg)。在 <0.053 mm 粒级的团聚体中,以 BN 处理下的 SOC 含量为最高(11.46 g/kg)(图 5)。

2.6 不同处理下的 NEEB

相比无物料施用处理(CT和CN),生物炭与

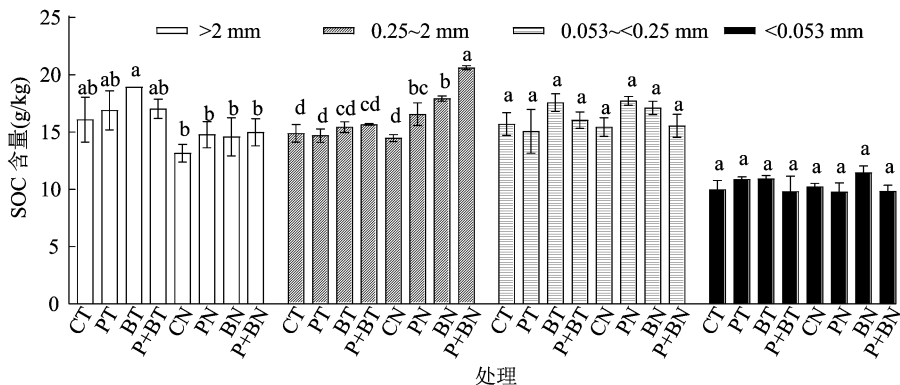


图5 不同粒级团聚体的 SOC 含量

PAM 配施处理下的收益均显著提升 ($P < 0.05$), 且旋耕条件下的提升幅度 (4.21%) 高于免耕 (3.36%)。但生物炭与 PAM 配施处理的农事成本比无物料施用处理高 645% ~ 695%。GHG 排放成本方面, 仅 CT 和 PT 2 个处理下为正值, 其余皆为负值, 且 CT 处理下为最高 (421 元/hm²), P + BN 处理下为最低 (-6 236 元/hm²)。就农户经济效益进行

整体分析可知, 无物料施用处理及仅施加 PAM 的处理均为正值, 仅施用生物炭与配施 PAM 及生物炭的处理均为负值, CN 处理下的农户经济效益为最高 (1.90 万元/hm²), 且各处理间的农户经济效益差异显著 ($P < 0.05$)。不同处理间 NEEB 的变化趋势与农户经济效益基本一致, 且 CN 处理下的 NEEB 为最高 (2.05 万元/hm²) (表 2)。

表 2 各处理下的成本投入及经济、生态效益

处理	产量收益 (万元/hm ²)	农事成本(万元/hm ²)				GHG 排放成本(元/hm ²)				农户经济 效益 (万元/hm ²)	NEEB (万元/hm ²)
		物料	机械	人工	总计	土壤 N ₂ O 排放	燃油排放	SOC 损失	总计		
CT	2.61d	0.38	0.24	0.22	0.84	523	193	-296	421a	1.76b	1.72ab
PT	2.67bc	0.98	0.24	0.23	1.46	523	193	-302	414a	1.22c	1.18b
BT	2.72b	4.88	0.24	0.52	5.64	523	193	-2 269	-1 552ab	-2.93e	-2.78c
P + BT	2.72ab	5.48	0.24	0.53	6.26	523	193	-1 395	-678ab	-3.53g	-3.46d
CN	2.68bc	0.38	0.18	0.22	0.78	523	145	-2 179	-1 511ab	1.90a	2.05a
PN	2.64cd	0.98	0.18	0.23	1.40	523	145	-2 575	-1 906ab	1.24c	1.43b
BN	2.71b	4.88	0.18	0.52	5.58	523	145	-5 673	-5 004ab	-2.87d	-2.37c
P + BN	2.77a	5.48	0.18	0.53	6.20	523	145	-6 904	-6 236b	-3.43f	-2.80c

注: 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 生物炭、PAM 施用及免耕对 SOC 含量及产量的提升效果

较多研究表明, 施用生物炭可显著提升 SOC 含量。例如, Shi 等基于长期定位试验研究发现, 连续 10 年施用生物炭后 SOC 含量较对照显著增长了 15.8% ~ 82.2%^[24]; Cui 等在华北地区的研究发现, 施用生物炭 2 ~ 40 t/hm² 水平下, SOC 含量可提升 62.9% ~ 214%^[25]。与前人长期试验的研究规律相似, 本研究发现生物炭施用 1 年后 SOC 含量较对照增加了 6.7% ~ 23.3%, 表明在黄河故道区中低产田中施用生物炭在短期内可实现 SOC 显著提升。Dong 等在该地区的进行的田间试验结果也得出相似结果(施用 2 年内提升 19.5% ~ 97.5%)^[26]。施用生物炭向土壤中提供的大量稳定碳源是 SOC 含量提升的主要原因^[27]。此外, 本研究发现生物炭施用对大团聚体形成具有显著的提升作用, 且大团聚体含量与 SOC 含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 表明对土壤团聚体形成的促进也是生物炭施用短期内提升土壤 SOC 含量的重要机制^[28]。前人研究同样发现, 生物炭施用可以通过为团聚体的

形成提供核心物质促进大团聚体及 SOC 含量^[29]。PAM 长链上的烯胺基可吸附土壤颗粒, 施用后可起到提升土壤团聚性, 促进 SOC 积累的作用^[30-31]。Yang 等通过模拟试验发现, PAM 施用可显著提升土壤大团聚体含量 96%^[32]。然而与同行结果不同, 本试验中 PAM 单独施用对大团聚体含量无显著影响。这可能是由于土壤的降水入渗率与 PAM 的覆盖率成正比^[33], 而本试验中 PAM 仅在小麦季施用, 降水量较少, 且施用年限较短, 造成 PAM 对土壤颗粒的吸附作用受到限制。免耕可以减少土壤扰动, 增强土壤团聚体结构稳定性, 减少土壤 LOC 损失, 从而提升 SOC 含量及储量^[34]。郑凤君等开展的长期定位试验结果表明, 相比常规耕作, 免耕处理下土壤大团聚体含量和 SOC 含量可分别提升 8.8% 和 17.7%^[35]。与前人结果^[36]相似, 本研究发现, 相同物料施用下免耕处理的 SOC 储量较旋耕处理分别增加了 13.7% ~ 21.7%, 这表明免耕可作为该地区快速提升土壤固碳效率的有效手段。线性回归表明, SOC 含量与产量极显著正相关关系 ($P < 0.01$), SOC 含量每增加 1 g/kg 可提升作物产量 0.186 9 t/hm², 且 SOC 含量可解释 68.7%

的产量变异。前人在黄河故道区进行的研究也得到相似规律^[3]。这说明促进土壤固碳是提升该地区作物产量的关键因素。本研究结果显示,相比对照(CT),P + BN 处理对产量、SOC 含量及储量的提升效果最好,且多因素方差分析表明,免耕、生物炭施用、PAM 施用 3 因素的交互作用对产量有极显著影响(表 1, $P < 0.01$)。P + BN 处理在向土壤提供稳定碳源的同时^[27],亦通过减少土壤扰动、促进团聚体形成等方面强化对 SOC 的物理保护^[35],从而提升 SOC 含量和作物产量。因此,免耕结合生物炭与 PAM 施用可作为黄河故道区土壤快速固碳和增产的优化管理措施。此外,PAM 施用对土壤保水能力及作物水分利用效率的提升作用也可能是该措施提升作物产量的关键原因^[37]。

3.2 生物炭、PAM 施用下的 NEEB

经济效益是驱动农户应用改良措施的主要驱动力^[17]。本研究发现,相比无物料施用处理(CT 和 CN),生物炭和 PAM 施用下农户产量收益均显著提升($P < 0.05$),但由于物料及人工成本的增加,农户总经济效益呈现显著下降趋势($P < 0.05$)。Xu 等在黄河故道区进行的研究也发现,随着物料施用成本增加,农户经济效益较对照可显著降低 85.9%^[3]。本研究中施用的生物炭单价为 3 000 元/t,而目前我国施行的有机物料施用补贴仅为 100 ~ 480 元/t^[38],因此,虽然生物炭在短期内具有提升 SOC 含量、增加产量收益的成效,在现有政策下进行大面积推广仍面临较大困难。本研究发现,CT 相比 NT,燃油排放成本显著降低,且作物产量及其收益呈增加趋势,因此仅从农民经济效益出发,在玉米季调整常规耕作为免耕可作为增产增收的可行方案。

本研究对 GHG 排放成本的计算综合考虑了 N_2O 排放量、燃油 CO_2 排放以及 SOC 损失量等因素。除 CT 和 PT 处理外,其他处理下的 GHG 排放成本均为负值,说明通过生物炭、PAM 施用和免耕等措施通过增加土壤碳固存量,可有效中和农作措施所导致的温室气体排放,提升生态效益。黄河故道区 SOC 含量(本研究中为 9.47 g/kg)显著低于黄淮海平原高产田水平(14.6 g/kg)^[39],具有巨大的固碳潜力,对该地区 SOC 含量进行提升是实现“碳中和”目标的重要途径^[3]。然而,由于成本投入的增加,各调理措施实行 1 年内 NEEB 均低于对照(CT),在生产中农户的应用积极性较低。因此,从

提升生态效益和粮食产量方面考虑,目前的补贴力度仍需进一步加强。

综上所述,在黄河故道区典型中低产田,通过免耕结合生物炭和 PAM 施用可在短期内增加 SOC 含量、大团聚体含量和作物产量、中和温室气体排放,是平衡粮食增产和生态效益的综合优化措施。但由于农事成本的增加,上述改良措施应用下的农户经济效益及 NEEB 均显著降低。从粮食安全及生态改善方面考虑,政府应加大补贴力度,完善生态补偿机制,以调动农户积极性,促进改良措施落地。

参考文献:

- [1] Lyu F R, Deng L Y, Zhang Z T, et al. Multiscale analysis of factors affecting food security in China, 1980—2017 [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29 (5): 6511 – 6525.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 徐 聪, 吴 迪, 王 磊, 等. 菌渣施用对黄河故道区低产田土壤理化性质、小麦根系生长和产量的影响 [J]. 土壤, 2021, 53 (3): 491 – 498.
- [5] Yan M, Pan G X, Lavalley J M, et al. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops [J]. Global Change Biology, 2020, 26 (1): 191 – 199.
- [6] Smith P, House J I, Bustamante M, et al. Global change pressures on soils from land use and management [J]. Global Change Biology, 2016, 22 (3): 1008 – 1028.
- [7] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long – term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 281 – 290.
- [8] Niu L G, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long – term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China plain [J]. Pedosphere, 2011, 21 (6): 813 – 820.
- [9] Schulz H, Dunst G, Glaser B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33 (4): 817 – 827.
- [10] Liu B J, Cai Z H, Zhang Y C, et al. Comparison of efficacies of peanut shell biochar and biochar – based compost on two leafy vegetable productivity in an infertile land [J]. Chemosphere, 2019, 224: 151 – 161.
- [11] 董林林, 何建桥, 陆长婴, 等. 生物炭配施蚯蚓粪提升土壤有机碳对水稻生长的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (2): 87 – 95.
- [12] 夏海江, 肇普兴. PAM 对土壤物理性质影响的试验研究 [J].

- 东北水利水电,1999,17(7):7-8.
- [13] 李娜,耿玉清,赵新宇,等. 生物炭和 PAM 混施影响煤矸石基质水分的入渗和蒸发[J]. 水土保持学报,2020,34(2):290-295.
- [14] Hijbeek R, Pronk A A, Ittersum M K, et al. Use of organic inputs by arable farmers in six agro-ecological zones across Europe: drivers and barriers[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2019, 275:42.
- [15] 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.
- [16] Amelung W, Bossio D, de Vries W, et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):1-10.
- [17] Zhou J, Li B, Xia L L, et al. Organic-substitute strategies reduced carbon and reactive nitrogen footprints and gained net ecosystem economic benefit for intensive vegetable production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225:984-994.
- [18] Song K F, Zhang G B, Yu H Y, et al. Evaluation of methane and nitrous oxide emissions in a three-year case study on single rice and ratoon rice paddy fields[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297:126650.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:20-39.
- [20] Charles A, Rochette P, Whalen J K, et al. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 236:88-98.
- [21] Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al. Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development [M]//Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. London:Cambridge University Press, 2015:1101-1131.
- [22] Xu C, Han X, Bol R, et al. Impacts of natural factors and farming practices on greenhouse gas emissions in the North China Plain: a meta-analysis[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(17):6702-6715.
- [23] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:188-194.
- [24] Shi S W, Zhang Q Z, Lou Y L, et al. Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: results from a decade field experiment[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1):95-103.
- [25] Cui Y F, Meng J, Wang Q X, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5):1064-1074.
- [26] Dong L L, Wang J D, Shen M X, et al. Biochar combined with nitrogen fertilizer affects soil properties and wheat yield in medium-low-yield farmland[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1):584-595.
- [27] Schmidt H P, Kammann C, Hagemann N, et al. Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(11):1708-1730.
- [28] Zou C M, Li Y, Huang W, et al. Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production[J]. *Geoderma*, 2018, 325:49-58.
- [29] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. *Catena*, 2017, 156:176-183.
- [30] 李元元,王占礼. 聚丙烯酰胺(PAM)防治土壤风蚀的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3):1002-1008.
- [31] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1):45-49.
- [32] Yang L X, Li S C, Sun H L, et al. Polyacrylamide molecular formulation effects on erosion control of disturbed soil on steep rocky slopes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(6):917-924.
- [33] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 I 入渗[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2):178-185.
- [34] Wardak D L R, Padia F N, de Heer M I, et al. Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport: a review[J]. *Geoderma*, 2022, 422:115927.
- [35] 郑凤君,王雪,李生平,等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3):596-607.
- [36] 李景,吴会军,武雪萍,等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(2):334-344.
- [37] 张妙. 生物炭与 PAM 共施对土壤水分、玉米生理特性及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018:36-37.
- [38] Wu H X, Ge Y. Excessive application of fertilizer, agricultural non-point source pollution, and farmers' policy choice[J]. *Sustainability*, 2019, 11(4):1165.
- [39] Zhao Y X, Chen Y Q, Dai H C, et al. Effects of organic amendments on the improvement of soil nutrients and crop yield in sandy soils during a 4-year field experiment in Huang-Huai-Hai plain, Northern China[J]. *Agronomy*, 2021, 11(1):157.
- [40] 史思伟,姜翼来,杜章留,等. 生物炭的 10 年土壤培肥效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(6):16-22.