

秸秆还田和有机肥配施对引黄灌区灌淤土养分和有机碳组分及玉米产量的影响

高总元¹, 贺静静¹, 李虹², 马俊花², 岳翔², 梁翔宇², 马成²,
武常荣³, 王锐¹, 刘汝亮^{4,5}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏回族自治区农业环境保护监测站, 宁夏银川 750002;
3. 宁夏沃川农业科技发展有限公司, 宁夏灵武 750400; 4. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所,
宁夏银川 750002; 5. 农业农村部银川野外科学观测研究站, 宁夏银川 750002)

摘要: 针对宁夏引黄灌区灌淤土肥力低和有机碳库稳定性差的问题, 利用定位小区试验研究了连续秸秆还田和有机肥配施对土壤理化性状和有机碳组分以及玉米产量的影响, 为宁夏引黄灌区灌淤土改良与农业绿色可持续生产提供理论支撑。试验共设4个处理, 即CK (不施用肥料)、FP (常规施肥: N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²)、FP+M (常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²)、FP+S (常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²)。结果表明, 连续6 a 秸秆还田和有机肥配施, 均能降低土壤pH, 优化土壤酸碱环境。常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理、常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理土壤速效磷含量分别较常规施肥显著增加了55.67%、75.98%, 且常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理对土壤铵态氮、硝态氮的提升效果优于常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理; 总有机碳含量较常规施肥分别增加3.10%、29.80%, 且常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理的微生物量碳含量最高, 达72.73 mg/kg, 较常规施肥处理提高30.48%, 有效增强了土壤碳库功能与微生物活性。常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²、常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理的玉米籽粒产量较常规施肥分别增产20.70%、18.52%, 玉米穗粒数增幅明显。综上, 秸秆还田和有机肥配施均为提升宁夏引黄灌区灌淤土肥力与玉米产量的有效技术模式, 其中常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理的综合效果最优, 可作为该区域农业可持续发展的优选技术方案。

关键词: 秸秆还田; 有机肥配施; 引黄灌区; 灌淤土; 有机碳组分; 玉米; 产量

中图分类号: S513; S147.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2026)03-0216-06

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2026.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2026.03.004)

宁夏引黄灌区是我国重要的商品粮生产基地, 以灌淤土为主要土壤类型, 砂壤特性导致其土壤有机质含量较低, 保水保肥性能较差^[1-2]。尽管区域内土壤综合肥力指数相对较高, 但仍面临有机质匮乏、养分失衡等问题, 严重制约了农业的可持续发展^[3]。长期高强度、集约化的种植模式导致土壤生产力下降, 限制了作物增产潜力。土壤碳库组分变化对全球碳循环调节至关重要^[4]。农田土壤有机质分解缓慢, 且变化存在滞后性, 短期研究难以反映真实碳库特征^[5]。土壤中活性有机质 (包括微生物生物量、溶解性有机碳等) 虽然含量较低, 但受土壤环境、植物和微生物影响强烈, 分解速率较快, 直接影响土壤质量和作物

产量^[6]。因此, 通过科学施肥提升土壤碳库水平、改善耕地质量, 是化解耕地退化问题与粮食增产的关键。

秸秆还田和有机肥配施可显著提升土壤碳库及活性有机质含量, 进而改善耕地质量、提高作物产量^[7-8]。Chaudhary等^[9]研究发现, 化肥与有机肥配施可显著提高土壤碳稳定性。郭振等^[10]研究表明, 长期施用有机肥可增加土壤微生物量碳氮含量。胡乃娟等^[11]研究指出, 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分和产量具有显著短期效应。Yan等^[12]研究表明, 秸秆还田配施有机肥可使东北黑土总有机碳含量提升15%~25%。Liu等^[13]在南方红壤上的研究表明, 有机肥配施更利于硝

收稿日期: 2025-11-26; 修订日期: 2025-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFD1700404); 国家自然科学基金(32460324); 宁夏回族自治区重大成果转化项目(2025CJE09007)。

作者简介: 高总元 (1978—), 男, 甘肃武威人, 工程师, 硕士, 研究方向为农业废弃物无害化处理及资源化利用。Email: gzy197885@126.com。

通信作者: 王锐 (1981—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士, 研究方向为耕地质量提升。Email: amwangrui@126.com。

共同通信作者: 刘汝亮 (1982—), 男, 河南夏邑人, 研究员, 博士, 研究方向为农业面源污染防治。Email: ru-liang_liu@126.com。

态氮的累积, 秸秆还田对速效磷的提升作用更显著。然而, 当前研究有机肥源多为养分波动较大的常规农家肥, 有关商品有机肥长期配施效果的研究较少, 且试验周期多为3 a以内的短期试验, 难以反映土壤碳库累积效应与肥力持续变化, 研究区域多集中于黑土、红壤等传统耕作土壤, 针对灌淤土等特殊成因土壤的研究较为匮乏, 尤其是宁夏引黄灌区这类气候干旱少雨、灌溉条件特殊的农业生态系统中, 相关研究尤为不足。不同区域与土壤类型下, 秸秆还田和有机肥配施效应存在显著差异。然而, 上述结论源于有机质丰富、结构良好的典型土壤, 难以直接外推至质地偏砂、有机质贫乏、养分保持能力弱的灌淤土。为此, 基于6 a长期定位试验, 选用养分稳定的商品有机肥, 系统分析秸秆还田和有机肥配施对灌淤土碳库变化的影响, 探讨碳库与耕地质量、作物产量的关联机制, 为宁夏引黄灌区灌淤土改良与农业绿色可持续生产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

定位试验开始于2018年, 地点位于宁夏回族自治区青铜峡市叶盛镇地三村(106°11'35" E、38°07'26" N), 是宁夏引黄灌区的核心区域。该区域属典型的大陆性干旱气候, 平均海拔1 100 m, 近5 a平均年降水量为180 mm, 蒸发量为1 400 mm, 平均温度为8.9 °C, 全年无霜期为165 d, 年平均积温为3 900 °C。土壤耕作层厚度约为23 cm, 土壤类型为灌淤土, 种植模式为水旱轮作, 种植制度为一年一熟。0~20 cm耕层土壤含有机质12.14 g/kg、全氮0.86 g/kg、全磷0.69 g/kg、速效氮60.58 mg/kg、速效磷17.42 mg/kg、速效钾142 mg/kg, pH为8.31, 容重1.36 g/kg, 土壤肥力水平中等。前茬种植作物为玉米。

1.2 供试材料

2023年种植作物为玉米, 指示玉米品种为先玉1225, 由铁岭先锋种子研究有限公司北京分公司提供。供试有机肥为商品鸡粪(含N 16.3 g/kg、P 15.4 g/kg、K 8.5 g/kg、有机质455.0 g/kg), 由宁夏顺宝现代农业股份有限公司生产。供试尿素(N≥46%)由河南心连心化学工业集团有限公司生产, 重过磷酸钙(P₂O₅≥46%)由云南三环化工有限公司生产, 硫酸钾(K₂O≥50%)由国投新疆罗

布泊钾盐有限责任公司生产。

1.3 试验设计

试验共设计4个处理, 分别为CK(不施用肥料)、FP(常规施肥)、FP+M(常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²)、FP+S(常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²); 其中FP、FP+M、FP+S处理常规施肥用量均为N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²。试验随机区组排列, 小区面积108.0 m² (7.2 m×15.0 m), 重复3次。于5月16日播种, 9月28日收获, 种植株行距为60 cm×20 cm, 玉米全生育期灌水2次, 分别为6月20日、7月25日, 每次灌水约1 800 m³/hm²。采用平作漫灌种植模式, 按试验设计结合整地一次性施入全部磷肥、钾肥、有机肥以及50%氮肥, 剩余50%氮肥于大喇叭口期做追肥施入(6月19日)。秸秆施用为玉米收获后将秸秆用闸刀切成约5~10 cm小段, 整地时翻压还田。各小区之间田埂在试验开始前用塑料棚膜隔离, 塑料棚膜埋深60 cm, 防止各小区之间串水串肥, 各小区均设置有单独的灌水口, 玉米生育期间单独灌水。各处理生育期间田间除草和农事管理均按照当地常规管理进行。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 农艺性状及产量 于玉米成熟期按小区收获全部果穗, 统计穗数, 称取果穗鲜重, 并计算果穗平均鲜重, 按平均鲜重法选取20个果穗作为样本带回实验室, 风干后脱粒计算玉米籽粒出籽率和含水量^[1]。以14%含水量计算实收产量。玉米收获时每小区随机选取长势均匀的10株, 分为秸秆和籽粒, 105 °C杀青20 min, 70 °C烘干至恒重, 用于计算秸秆和籽粒产量^[14]。玉米株高在收获时贴地收割, 用直尺量取株高, 籽粒烘干后称量测得百粒重, 秸秆和籽粒烘干后, 按照6.7万株/hm²种植密度计算产量^[1]。

1.4.2 土壤养分 玉米收获后, 每小区按照“S”形5点取样法, 使用土钻采集0~20 cm耕层土样, 将土样均匀混合后平均分成2份, 一份过2.00 mm筛后低温保存, 用于测定土壤微生物量碳和可溶性有机碳含量; 另一份风干研磨后过0.15 mm筛, 用于测定土壤有机碳、易氧化有机碳和其他理化指标^[15]。土壤有机碳和团聚体有机碳含量(团聚体的有机碳测定值)采用重铬酸钾-外加加热法测定^[16]; 土壤微生物量碳采用0.5 mol/L K₂SO₄浸提

法测定^[16]；未熏蒸的浸提液中的可溶性有机碳(DOC)采用岛津TOC-VCPH有机碳分析仪测定,由熏蒸与未熏蒸浸提液DOC的差值除以转化系数0.45计算出微生物量碳(MBC);易氧化碳使用0.333 mol/L的KMnO₄氧化-比色法测定^[16]。

1.5 数据处理

数据处理采用Excel 2016软件进行数据处理和作图,用DPS数据处理系统进行方差分析和差异显著性检验,选择Duncan新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤基本理化性状的影响

由图1可以看出,pH以FP处理最高,为8.48;FP+M、FP+S处理分别为8.30、8.26,均显著低于CK、FP处理($P < 0.05$)。土壤全盐含量以FP+M处理最高,为1.01 g/kg,与FP处理差异不显著,显著高于CK、FP+S处理($P < 0.05$),较CK、FP处理分别增加12.46%、9.78%;FP+S处理为0.97 g/kg,与CK、FP处理差异不显著($P > 0.05$),较FP处理增加5.43%,增幅不明显,未引发土壤盐渍化风险。各处理全磷含量均无显著差异($P > 0.05$),为0.65~0.72 g/kg,且施肥处理全

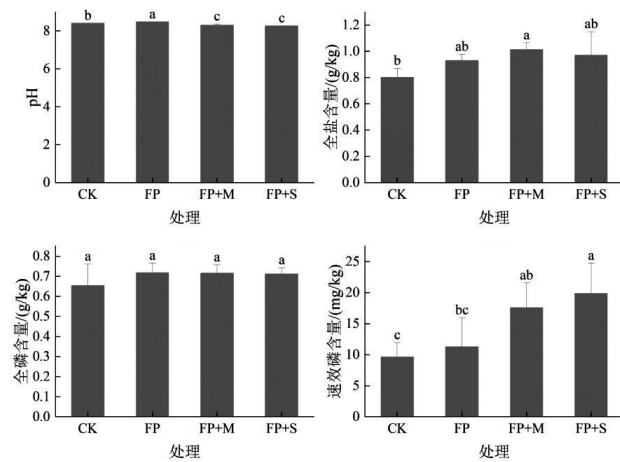


图1 不同处理的土壤基本理化性状

磷含量均高于CK。速效磷含量以FP+S处理最高,为19.85 mg/kg,与FP+M处理差异不显著,显著高于CK、FP处理,分别较CK、FP处理增加105.27%、75.98%;FP+M处理较高,为17.56 mg/kg,与FP处理差异不显著,显著高于CK,分别较CK、FP处理增加81.59%、55.67%。

2.2 不同处理对土壤氮素形态的影响

氮素是影响土壤肥力和作物产量形成的重要营养元素^[17]。由表1可以看出,各施肥处理均可提高土壤铵态氮、硝态氮、速效氮、微生物量氮、全氮含量($P < 0.05$),且均以FP+M处理效果最优。相较于FP处理,FP+M处理土壤铵态氮、硝态氮、速效氮含量分别显著提高68.48%、168.84%、46.90%($P < 0.05$),而FP+S处理仅分别提高28.20%、21.79%、7.90%。土壤可溶性有机氮含量以FP+M处理最低,为1.80 mg/kg,分别较CK、FP处理降低41.75%、39.80%;FP+S处理较低,为1.87 mg/kg,分别较CK、FP处理降低39.48%、37.46%。各施肥处理间土壤微生物量氮含量无显著差异($P > 0.05$),较CK提高10.63%~21.74%。FP、FP+M、FP+S处理间土壤全氮含量无显著性差异($P > 0.05$),为0.98~1.06 g/kg,均显著高于CK($P < 0.05$)。

2.3 不同处理对土壤有机碳组分的影响

土壤有机碳组分是衡量土壤肥力和生产能力的重要指标^[18]。由表2可以看出,各施肥处理均可提高土壤总有机碳、微生物量碳、颗粒有机碳、矿质有机碳含量,降低溶解性有机碳含量。其中,土壤总有机碳含量以FP+S处理最高,为12.98 g/kg,较CK显著增加35.77%($P < 0.05$);分别较FP、FP+M处理增加29.80%、25.90%($P > 0.05$);FP+M处理较高,为10.31 g/kg,较CK增加7.84%($P < 0.05$);较FP处理增加3.10%($P >$

表1 不同处理的土壤氮素形态^①

处理	铵态氮含量 / (mg/kg)	硝态氮含量 / (mg/kg)	速效氮含量 / (mg/kg)	可溶性有机氮含量 / (mg/kg)	微生物量氮含量 / (mg/kg)	全氮含量 / (g/kg)
CK	2.36±0.76 c	3.68±0.40 b	9.81±1.51 b	3.09±0.28 a	6.21±0.85 a	0.81±0.03 b
FP	4.22±1.12 b	4.59±1.38 b	10.00±0.13 b	2.99±1.23 ab	6.87±0.72 a	0.98±0.04 a
FP+M	7.11±0.47 a	12.34±1.61 a	14.69±0.86 a	1.80±0.13 b	7.56±1.76 a	1.06±0.09 a
FP+S	5.41±1.35 ab	5.59±2.60 b	10.79±0.39 a	1.87±0.13 ab	7.26±1.70 a	1.05±0.08 a

①同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

0.05)。土壤微生物量碳含量以FP+M处理最高, 达72.73 mg/kg, 较FP处理增加30.48%; FP+S处理较高, 为60.66 mg/kg, 较FP处理增加8.83%, 差异均不显著 ($P > 0.05$)。土壤溶解性有机碳含量以FP+M处理最低, 为19.82 mg/kg, 较FP处理降低34.52% ($P > 0.05$); FP+S处理较低, 为20.23 mg/kg, 较FP处理降低33.17% ($P > 0.05$)。土壤易氧化有机碳含量各处理间差异均不显著 ($P > 0.05$), 以FP+M处理最高, 为2.97 g/kg, 较FP处理增加64.09%; FP+S处理较高, 为2.88 g/kg, 较FP处理增加59.12%。土壤颗粒有机碳含量和矿质有机碳含量均以FP+S处理最高, 分别为7.20、9.80 g/kg, 分别较FP处理显著增加87.99%、21.59% ($P < 0.05$); FP+M处理较高, 分别为4.15、8.86 g/kg, 分别较FP处理增加8.36%、9.93%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 不同处理对玉米产量的影响

从表3可以看出, 不同施肥处理均能显著提高玉米株高、穗粒数、百粒重、秸秆产量及籽粒产量 ($P < 0.05$), 且FP、FP+M、FP+S处理间玉米株高、穗粒数、百粒重、秸秆产量均差异不显著 ($P > 0.05$)。其中, 玉米株高以FP处理最高, 为314.33 cm, 分别较FP+M、FP+S处理增加2.06%、4.20%。玉米穗粒数以FP+M处理最高, 为692.67粒, 较FP处理增加8.12% ($P > 0.05$); FP+S处理较高, 为661.67粒, 较FP处理增加3.28% ($P > 0.05$)。百粒重以FP处理最高, 为33.54 g, 分别较FP+M、FP+S处理增加2.29%、3.74%。玉米秸秆产量以FP+S处理最高, 为14 568.31 kg/hm², 较

FP处理增加5.08% ($P > 0.05$); FP+M处理较高, 为14 543.63 kg/hm², 较FP处理增加4.90% ($P > 0.05$)。玉米籽粒产量以FP+M处理最高, 为13 108.45 kg/hm², 较FP处理显著增加20.70% ($P < 0.05$); FP+S处理较高, 为12 871.69 kg/hm², 较FP处理显著增加18.52% ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

宁夏引黄灌区灌淤土壤偏碱性且养分有效性低^[19]。本研究中, 连续6 a常规施肥 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²) + 秸秆9 000 kg/hm²的处理和常规施肥 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²) + 有机肥9 000 kg/hm²的处理均较对照不施用肥料显著降低了土壤pH, 秸秆腐解过程中产生的低分子量有机酸可中和土壤中的碳酸根离子, 同时螯合土壤胶体表面的碱性阳离子 (如Ca²⁺), 因而降碱效果优于有机肥^[20]。张慧等^[21]研究表明, 有机物料输入能调节碱性土壤pH, 与本研究结果一致。本研究中, 与常规施肥 (N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²) 处理相比, 常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²、常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理的土壤速效磷含量分别显著增加55.67%、75.98%。这是因为秸秆分解产生有机酸可溶解土壤中难溶性钙磷, 提升土壤磷酸活性; 有机肥中磷素需经微生物矿化且易形成缓效磷^[22]。Nan等^[23]的研究同样证明, 秸秆还田对速效磷提升效果显著优于单一有机肥配施, 与本研究结果一致。本研究还发现, 与常规施肥处理相比, 常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理的铵态氮、硝态氮含量分别显著提升68.48%、168.84%, 均优

表2 不同处理的土壤有机碳组分

处理	总有机碳含量 / (g/kg)	微生物量碳含量 / (mg/kg)	溶解性有机碳含量 / (mg/kg)	易氧化有机碳含量 / (g/kg)	颗粒有机碳含量 / (g/kg)	矿质有机碳含量 / (g/kg)
CK	9.56±0.20 b	46.16±7.66 b	33.24±5.81 a	2.25±0.63 a	3.42±0.50 b	7.71±0.42 b
FP	10.00±0.32 b	55.74±20.78 ab	30.27±10.30 ab	1.81±0.54 a	3.83±1.41 0 b	8.06±1.16 b
FP+M	10.31±0.94 b	72.73±3.98 a	19.82±0.99 b	2.97±0.17 a	4.15±1.20 b	8.86±0.60 ab
FP+S	12.98±1.27 a	60.66±8.32 ab	20.23±0.47 b	2.88±0.83 a	7.20±1.69 a	9.80±0.53 a

表3 不同处理玉米主要性状和产量

处理	株高 /cm	穗粒数 /粒	百粒重 /g	秸秆产量 / (kg/hm ²)	籽粒产量 / (kg/hm ²)
CK	256.33±0.06 b	434.33±42.06 b	22.75±2.06 b	9 411.26±415.12 b	6 197.17±919.02 c
FP	314.33±0.09 a	640.67±16.04 a	33.54±0.69 a	13 864.02±142.34 a	10 860.36±1179.27 b
FP+M	308.00±0.17 a	692.67±57.54 a	32.79±1.59 a	14 543.63±881.24 a	13 108.45±1244.32 a
FP+S	301.67±0.06 a	661.67±8.76 a	32.33±1.52 a	14 568.31±1476.57 a	12 871.69±581.16 a

于常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理。归因于有机肥中氮素易被微生物矿化，能持续释放速效氮；而秸秆腐解初期微生物会大量吸收土壤速效氮用于自身生长，出现“氮素固定”现象^[24]。有机肥配施还能改善土壤通气性和保水性，促进硝化细菌、氨化细菌等功能微生物活性，进一步提升氮素供应稳定性，这与陈忠莎等^[25]研究结论一致。总体来说，连续6 a常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²、常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理均能有效调节宁夏引黄灌区灌淤土的酸碱环境，显著提升土壤速效磷、速效氮含量；其中秸秆还田对速效磷的活化效果更突出，有机肥配施则对铵态氮和硝态氮供应方面更具优势。

土壤有机碳组分的构成与稳定性是衡量土壤肥力和碳库功能的核心指标。本研究中，常规施肥(N 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²) + 秸秆9 000 kg/hm²处理的土壤总有机碳含量较常规施肥处理和常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理分别提高29.80%、25.90%。秸秆中木质素、纤维素等难降解组分多，腐解周期长；有机肥经高温堆肥腐解后易降解有机碳大量损失^[26]。尹献远等^[27]研究同样表明，秸秆等难降解有机物料的碳累积效应显著优于腐熟有机肥。常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理的微生物量碳含量达72.73 mg/kg，较常规施肥处理提升30.48%，略高于常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理。原因是有机肥能为微生物提供均衡营养基质，促进细菌、真菌群落繁殖；而秸秆碳氮比过高，腐解初期微生物生长代谢受到抑制^[28]。此外，二者均显著降低了可溶性有机碳含量，减小碳淋失风险，提升碳库稳定性，这与彭家豪等^[29]研究结论一致。

产量方面，常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²、常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理玉米籽粒产量较常规施肥处理分别增产20.70%、18.52%，这与徐洁章等^[30]研究结果相符，有机物料输入通过降低土壤盐碱化程度、改善养分供应，显著促进作物生长及产量形成。常规施肥+秸秆9 000 kg/hm²处理速效磷和总有机碳含量更高，能满足玉米花芽分化和灌浆期的磷素需求；常规施肥+有机肥9 000 kg/hm²处理则凭借均衡的氮素供应和较高的微生物量碳，为玉米全生育期提供稳定营养支持。综上，常规施肥+秸秆还田和常规施肥配施有机肥均能优化引黄

灌区灌淤土有机碳组分结构，提升玉米产量。

参考文献：

- [1] 王 英, 刘汝亮, 王 芳, 等. 减氮对引黄灌区春玉米氮素吸收利用和淋失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41 (3): 576-584.
- [2] 刘汝亮, 王 芳, 张爱平, 等. 控释氮肥全量基施对宁夏引黄灌区水稻氮素利用效率和淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (5): 251-256.
- [3] 曹 婧, 陈怡平, 毋俊华, 等. 黄河流域五大灌区沿河耕地土壤肥力评价与改良措施[J]. 地球环境学报, 2020, 11 (2): 204-214.
- [4] 陈 洁, 梁国庆, 周 卫, 等. 长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (1): 36-44.
- [5] 梁 斌, 周建斌, 杨学云. 长期施肥对土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮含量动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (2): 321-326.
- [6] 王 晶, 张旭东, 解宏图, 等. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述[J]. 应用生态学报, 2013, 14 (10): 1809-1812.
- [7] 陈 欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47 (13): 2580-2590.
- [8] 马 臣, 刘艳妮, 梁 路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (4): 1240-1248.
- [9] CHAUDHARY S, DHERI G S, BRAR B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 59-66.
- [10] 郭 振, 王小利, 徐 虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (5): 1168-1174.
- [11] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 371-377.
- [12] YAN Y, JI W, LI B, et al. Effects of long-term straw return and environmental factors on the spatiotemporal variability of soil organic matter in the black soil region: A case study[J]. Agronomy, 2022, 12 (10): 2532.
- [13] LIU Z, AO W, WU S, et al. Effects of replacing nitrogen fertilizer with organic fertilizer on soil physicochemical properties and maize yield in yunnan's red soil[J]. Sustainability, 2025, 17 (14): 6634.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日, 等. 不同品种小麦下土壤微生物量和可溶性有机物对不同施氮量的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (7): 1315-1324.

- [16] WANG H, WANG S L, ZHANG Y J, et al. Tillage system change affects soil organic carbon storage and benefits land restoration on loess soil in North China [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 (9): 2880–2887.
- [17] 张平良, 郭天文, 曾 骏, 等. 新垦旱地土壤快速培肥技术规程[J]. *甘肃农业科技*, 2020 (4): 62–65.
- [18] 柳燕兰, 雷康宇, 马明生, 等. 不同耕作方式对旱作区新修梯田土壤理化性质及马铃薯产量的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2025, 4 (8): 707–712.
- [19] 冒辛平, 喻其林, 刘汝亮, 等. 宁夏引黄灌区麦后复种绿肥对后茬小麦产量及土壤性质的影响 [J/OL]. *农业资源与环境学报*, 1–13(2025-07-31)[2025-12-24]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.0140>.
- [20] 寇 娜, 赵 琼, 彭彬玮, 等. 长期秸秆还田对稻麦轮作土壤碳稳定性和土壤肥力的影响 [J/OL]. *生态学杂志*, 1–9 (2025-06-09)[2025-12-24]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250609.1126.010>.
- [21] 张 慧, 胡 娟, 周道玮. 大量添加秸秆对松嫩平原盐碱地改良及玉米生长的影响[J]. *土壤与作物*, 2024, 13 (4): 415–427.
- [22] 窦春宇, 郭赛楠, 高玉婷, 等. 秸秆还田及有机肥替代化肥对(土娄)土物理肥力及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31 (6): 1056–1072.
- [23] NAN H, YANG F, LI D, et al. Calcium enhances phosphorus reclamation during biochar formation: Mechanisms and potential application as a phosphorus fertilizer in a paddy soil[J]. *Waste Management*, 2023, 162: 83–91.
- [24] 郭锦花, 李梦瑶, 张 军, 等. 施用有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦二熟体系作物产量、品质和化肥效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42 (3): 118–126.
- [25] 陈忠莎, 黄 莺. 不同碳氮比有机肥对植烟黄壤氮素的影响[J]. *贵州农业科学*, 2016, 44 (4): 75–78.
- [26] 温云杰, 张建诚, 杨 娜, 等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40 (21): 74–81.
- [27] 尹献远, 张 鑫, 徐秋桐, 等. 不同有机物料与粘土矿物配施对新垦水田土壤有机碳积累的影响[J]. *农学学报*, 2025, 15 (3): 51–59.
- [28] 高日平, 王伟妮, 狄彩霞, 等. 有机肥和秸秆还田对河套灌区盐渍化土壤养分及微生物数量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (2): 43–53.
- [29] 彭家豪, 林少颖, 王维奇, 等. 秸秆与生物炭施加对茉莉园土壤真菌群落及有机碳库特征的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45 (7): 4228–4240.
- [30] 徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29 (12): 23–32.

Effects of Combined Application of Straw and Organic Fertilizer on Soil Nutrients, Organic Carbon Fractions, and Maize Yields in the Siltation Soil of the Yellow River Irrigation Areas

GAO Zongyuan¹, HE Jingjing¹, LI Hong², MA Jun Hua², YUE Xiang², LIANG Xiangyu², MA Cheng²,
WU Changrong³, WANG Rui¹, LIU Ruliang^{4,5}

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021, China; 2. Agricultural Environmental Protection Monitoring Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia 750002, China; 3. Ningxia Wochuan Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Lingwu Ningxia 750400, China; 4. Institute of Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan Ningxia 750002, China; 5. Yinchuan Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan Ningxia 750002, China)

Abstract: To address the issues of low fertility and poor stability of the organic carbon pool in the irrigation silt soil of the Yellow River Irrigation Areas in Ningxia, a long-term fixed field experiment was conducted to investigate the effects of continuous straw returning and organic fertilizer application on soil physical and chemical properties, organic carbon fractions, and maize yields. This study aimed to provide theoretical support for the improvement of irrigation silt soil and the development of sustainable green agriculture in the Yellow River irrigation area of Ningxia. 4 treatments were set up: CK (no fertilizer application), FP (conventional fertilization with N 240 kg/ha, P₂O₅ 90 kg/ha, and K₂O 90 kg/ha), FP + M (conventional fertilization + 9 000 kg/ha organic fertilizer), and FP + S (conventional fertilization + 9 000 kg/ha straw). Results showed that continuous 6-year straw returning and organic fertilizer application could both reduce soil pH and optimize the soil acid-base environment. Compared with the conventional fertilization treatment, the soil available phosphorus content in the FP + M and FP + S treatments increased by 55.67% and 75.98%, respectively. Moreover, the FP + M treatment had a better effect on increasing soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen than the FP + S treatment. Both the FP + M and FP + S treatments significantly increased the total soil organic carbon content by 3.10% and 29.80%, respectively, compared with the conventional fertilization treatment. The FP + M treatment had the highest microbial biomass carbon content, reaching 72.73 mg/kg, which was 30.48% higher than that of the conventional fertilization treatment, effectively enhancing the soil carbon pool function and microbial activity. In terms of yield performance, the maize grain yield in the FP + M and FP + S treatments increased by 20.70% and 18.52%, respectively, compared with the conventional fertilization treatment, and the number of grains per ear also increased significantly. In conclusion, both straw returning and organic fertilizer application are effective technical models for improving the fertility of irrigation silt soil and maize yield in the Yellow River Irrigation Area of Ningxia. Among them, the conventional fertilization + 9 000 kg/ha organic fertilizer treatment had the best comprehensive effect and could be used as a preferred technical solution for sustainable agricultural development in this region.

Key words: Straw returning; Organic fertilizer application; Yellow River Irrigation Area; Siltation soil; Organic carbon fraction; Maize; Yield