

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22362

磺化炭基复合肥对盐化潮土小麦生长及土壤养分的影响

程运龙¹, 郑文魁^{1, 3*}, 高 强², 王 淳¹, 郭新送³

(1. 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

2. 山东鲁北化工股份有限公司, 山东 滨州 251909;

3. 山东农大肥业科技股份有限公司, 山东 肥城 271600)

摘 要: 为探究有机废硫酸低温炭化技术制备的新型磺化炭基复合肥在滨海盐化潮土区小麦上的施用效果, 采用大田试验, 研究了不施肥 (CK)、磷酸二铵 (DP)、15-15-15 三元复合肥 (CF) 及炭添加量分别为 6%、8%、12%、16% 和 20% 的磷酸二铵炭基肥和三元炭基复合肥对小麦干物质累积量、产量、养分利用率及土壤养分状况的影响。结果表明: 施用生物炭基复合肥显著提高了小麦籽粒产量, 且随着生物炭添加比例的增加, 小麦籽粒产量呈先增加后降低的规律。磷酸二铵炭基肥中 CDP8% 和 CDP12% 处理增产效果较好, 分别较 DP 处理增产 6.42% 和 5.82%; 三元炭基复合肥中 CCF12% 处理较 CF 处理籽粒产量显著提高 4.92%。生物炭的添加可增加植物体内氮、磷、钾养分的累积量, 从而提高肥料养分利用率, 其中炭添加量 6% ~ 12% 表现效果最佳。施用生物炭基复合肥对小麦各生育期土壤速效养分具有不同程度的提高作用。在小麦拔节和孕穗期, 炭添加量为 6% ~ 12% 的两种类型炭基复合肥对土壤硝态氮含量增加显著, 增幅分别为 17.40% ~ 40.34% 和 5.45% ~ 12.31%; 在成熟期, CDP6%、CDP8% 和 CDP12% 处理土壤有效磷含量较 DP 处理显著提高了 8.49% ~ 13.95%。另外, 施用磺化炭基复合肥较普通复合肥显著降低了小麦返青期耕层土壤 pH。综上所述, 施用生物炭添加量 6% ~ 12% 的磺化炭基复合肥对于提高土壤速效养分含量具有积极作用, 可提高小麦籽粒产量和养分利用效率。

关键词: 磺化; 炭基复合肥; 小麦; 产量; 土壤肥力

生物炭是生物质在低氧或缺氧条件下通过热化学转化形成的高度芳香化、富含碳的多孔颗粒有机物^[1], 生物炭在改善土壤理化性状、促进作物生长发育等方面的效果已得到广泛认可^[2]。生物炭制备常见技术包括高温限氧热解、气化热解、水热炭化、闪蒸炭化以及烘焙炭化 5 种类型^[3]。各类工艺中, 热解和气化是当前生物炭生产的主要技术手段, 热解生物炭在农业生产领域的应用研究较为广泛。然而, 热解法得到的生物炭一般只能保留一半的碳, 且 pH 普遍偏高, 是制约其在盐碱土壤应用的主要障碍^[4]。

生物炭可作为土壤改良剂单独使用, 也可与肥料混合制成生物炭基肥, 具有养分缓释、固碳减排、增产稳定等优点, 符合国家化肥“零增长”

的发展方向。目前被广泛研究应用的生物炭基肥种类主要包括炭基有机肥、氮肥、复合肥等, 并在水稻、小麦、玉米等作物上取得了较好的施肥效果^[5-6]。但是, 生物炭基肥的施用效果因其种类、制备工艺及土壤条件不同而产生一定的差异^[6]。国内外学者多关注于生物炭基肥在中性和酸性土壤中的改良及增产作用, 几年来在盐碱土壤改良方面也做了很多有益探索, 但相关应用研究尚处于起步阶段^[4]。

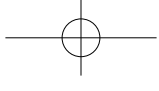
本试验所用磺化炭基复合肥采用山东鲁北化工股份有限公司和中国科学院过程工程研究所联合开发的有机废硫酸低温炭化新技术, 以滨州当地芦苇为生物质原料, 将其加入到废硫酸中, 加热至 100 ~ 300℃使生物质和废硫酸中的酸溶油在硫酸作用下聚合炭化分离得到生物质磺化炭, 并制备磺化炭基复合肥。磺化后的生物炭具有丰富的 -SO₃H、-OH 等官能团^[7]。因此, 本试验通过大田试验, 评价磺化炭基复合肥对滨海盐渍土耕层养分及小麦生长的影响, 以期对磺化炭基肥在盐渍土上的应用推广提供数据支撑。

收稿日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-09-12

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2020QD113)。

作者简介: 程运龙 (1998-), 在读硕士, 主要从事土壤养分高效利用研究。E-mail: chengyunlong0312@163.com。

通讯作者: 郑文魁, E-mail: wkzheng2013@163.com。



1 材料与方法

1.1 试验区概括

试验于2020年10月至2021年6月在山东省滨州市滨城区秦皇台乡杀虎刘村(37° 29' 12" N, 118° 9' 39" E)进行,该地处于黄河三角洲腹地,属温带大陆性季风气候区,多年平均气温12.7℃,年平均降水量564.8 mm,无霜期205 d。试验地土壤类型是滨海盐渍土,0~20 cm土壤的部分理化性质为:pH 8.01(水土比2.5:1),电导率630.87 $\mu\text{S}/\text{cm}$,全盐含量0.21%,全氮含量0.69 g/kg,有机质含量9.57 g/kg,铵态氮含量7.20 mg/kg,硝态氮含量7.74 mg/kg,有效磷含量14.00 mg/kg,速效钾含量186.00 mg/kg。

1.2 试验材料与设计

供试肥料为磷酸二铵(N 14%, P_2O_5 43%)、普通三元复合肥(N 15%, P_2O_5 15%, K_2O 15%),以磷酸二铵和普通复合肥为原料分别与生物炭进行混合造粒制备出含炭量6%、8%、12%、16%和20%的炭基复合肥。其生物炭采用有机废硫酸低温炭化新技术制成,原材料为当地芦苇秸秆,采用BET法在氮气介质下测定生物炭的比表面积、孔径和孔容(ASAP 2460, Micromeritics, 美国),其基本性质见表1。供试肥料均由山东鲁北化工股份有限公司提供。供试小麦品种为师栾02-1号,属于半冬性中熟品种。

表1 生物炭的基本属性

强酸量 (mmol/g)	BET 比 表面积 (m^2/g)	平均 孔径 (nm)	孔容 (cm^3/g)	C (%)	N (%)	S (%)	H (%)
5.62	35.55	2.76	0.0246	51.17	2.76	8.89	4.02

试验采用随机区组设计,共设13个处理,每个处理重复3次,共39个小区,分别为不施肥(CK);磷酸二铵处理(DP);含炭6%、8%、12%、16%和20%的磷酸二铵处理(CDP6%、CDP8%、CDP12%、CDP16%和CDP20%);普通复合肥处理(CF);含炭6%、8%、12%、16%和20%的炭基复合肥处理(CCF6%、CCF8%、CCF12%、CCF16%和CCF20%)。试验小区面积为40 m^2 (5 m $\times$ 8 m),小麦行距17 cm,播种量225 kg/hm^2 。各复合肥料基施量900 kg/hm^2 ,返青期追施300 kg/hm^2 。田间管理按常规进行。

1.3 样品采集与测定

分别在小麦返青期、拔节期、孕穗期和成熟期采集土壤和植株样品。每个小区随机选取30 cm行长的具有代表性的小麦植株,105℃杀青30 min,75℃烘箱内烘干至恒重,测定干物质重。将所有样品磨细、过0.25 mm筛,混合均匀,得到分析样品,测定植株全氮、全磷、全钾含量。收获时采集具有代表性的1 m^2 小麦样品,考种后风干脱粒,计算不同施肥处理小麦有效穗数、穗粒数和千粒重。生育期内各试验小区采用对角线5点取样法,采集0~20 cm土层土壤样品混合均匀,四分法保留500 g土壤样品,带回实验室自然风干,研磨并分别过2和0.25 mm筛,测定土壤的理化性质。

土壤和植株各项指标的测定方法参见《土壤农化分析》^[8],其中土壤pH采用酸度计测定,水土比为1:2.5;电导率采用1:5水土比浸提,电导率仪测定;有效磷采用0.5 mol/L NaHCO_3 浸提,钼蓝比色法测定;速效钾采用1 mol/L NH_4OAc 溶液浸提,火焰光度计测定;土壤硝态氮采用2 mol/L氯化钾浸提,紫外双波段比色法测定;铵态氮用靛酚蓝比色法测定;土壤全氮含量采用浓硫酸消煮-凯氏法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。植株经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮后,全氮采用凯氏法测定,全磷采用钒钼黄比色法测定,全钾采用火焰光度计测定。

肥料利用率^[9](%)=(施肥区作物吸收养分总量-不施肥区作物吸收养分总量)/施用肥料中该养分的总量 $\times 100$

1.4 数据处理

试验数据通过Excel 2010和SAS 8.2进行处理和统计分析,ANOVA方差分析及Duncan差异显著性检验,比较不同处理间在 $P<0.05$ 的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对小麦产量和肥料利用率的影响

施肥显著增加了小麦籽粒产量,其中三元复合肥CF处理小麦籽粒产量显著高于磷酸二铵DP处理(表2)。随着生物炭添加比例的增加,两种炭基肥处理的小麦籽粒产量均呈先增加后降低的规律。CDP8%和CDP12%处理小麦籽粒产量较DP处理分别增加6.42%和5.82%,而CDP6%、CDP16%和CDP20%处理与DP处理之间小麦籽粒产量差异

性不显著。与 CF 处理相比, CCF12% 处理小麦籽粒产量显著提高 4.92%, 而 CCF20% 处理小麦籽粒产量则出现减产效果。

在产量构成方面, 两种炭基肥处理的小麦穗粒数随生物炭添加比例的增加均呈先增加后降低的规律。磷酸二铵炭基肥处理中, CDP8% 和 CDP12% 处理小麦穗粒数最高, CDP6%、CDP16% 和 CDP20% 处理与 DP

处理之间小麦穗粒数差异不显著。三元炭基复合肥处理中, 除 CCF6% 处理小麦穗粒数显著高于 CCF20% 处理外, 各施肥处理间差异不显著。小麦穗数随生物炭添加比例的增加均呈先增加后降低的趋势。磷酸二铵炭基肥处理中 CDP8% 处理小麦穗数最高, 三元炭基复合肥处理中 CCF12% 处理最高。施肥显著提高了小麦千粒重, 且不同施肥处理间差异不显著。

表 2 不同施肥处理的小麦产量及构成

处理	籽粒产量 (kg/hm ²)	穗粒数 (每穗)	穗数 (穗 /m ²)	千粒重 (g)
CK	2371.19 ± 45.85f	22.72 ± 0.53f	237.00 ± 6.66f	31.26 ± 0.54b
DP	5762.88 ± 91.70e	28.00 ± 0.29de	488.33 ± 2.60c	35.07 ± 0.28a
CDP6%	5797.90 ± 57.69de	28.22 ± 0.68de	503.33 ± 2.73ab	35.41 ± 0.34a
CDP8%	6133.07 ± 70.04ab	32.61 ± 0.49a	515.00 ± 3.60ab	35.40 ± 0.07a
CDP12%	6098.05 ± 109.03ab	31.39 ± 0.91ab	504.00 ± 3.60ab	34.68 ± 0.34a
CDP16%	5827.91 ± 25.01cde	29.44 ± 0.53cd	490.67 ± 4.10bc	35.23 ± 0.52a
CDP20%	5742.87 ± 73.69e	26.67 ± 0.59e	456.67 ± 8.65de	35.34 ± 0.17a
CF	5993.00 ± 58.98bcd	29.50 ± 0.44cd	457.33 ± 3.28de	35.30 ± 0.07a
CCF6%	5998.00 ± 57.69bcd	30.17 ± 0.35bc	468.33 ± 2.73d	35.27 ± 0.06a
CCF8%	6033.02 ± 77.98bc	29.61 ± 0.55bcd	465.67 ± 7.31d	35.31 ± 0.07a
CCF12%	6288.14 ± 30.02a	28.56 ± 0.73cd	496.67 ± 5.04bc	35.54 ± 0.17a
CCF16%	5822.91 ± 54.11cde	29.78 ± 0.64bcd	468.00 ± 3.21d	35.30 ± 0.07a
CCF20%	5647.82 ± 83.26e	27.94 ± 0.44de	444.33 ± 3.38e	35.30 ± 0.07a

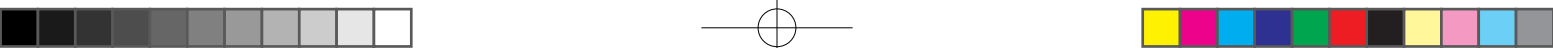
注: 数据表示方法为平均值 ± 标准误差, 同列数据后标有相同小写字母表示处理间差异不显著 (P>0.05)。下同。

随着生物炭添加比例的增加, 磷酸二铵炭基肥处理的氮素利用率、籽粒氮素吸收量均呈先增加后降低的趋势 (表 3)。除 CDP8% 处理外, 其他磷酸二铵炭基肥处理氮素利用率显著高于 DP 处理, 其中 CDP16% 处理的氮素利用率最高, 较 DP 处理提

高了 41.19%, 并且籽粒中氮素含量显著高于其他处理。三元炭基复合肥处理中 CCF12% 处理的氮素利用率显著高于 CCF6%、CCF8%、CCF16% 处理。与 CF 处理相比, 三元炭基复合肥处理的氮素利用率显著提高 12.00% ~ 22.02%, 在籽粒氮素含量方面表现

表 3 不同施肥处理中籽粒养分含量和肥料养分利用率

处理	肥料利用率 (%)			籽粒养分累积量 (kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	—	—	23.32 ± 1.16e	14.56 ± 0.48h	14.16 ± 0.33g
DP	27.63 ± 0.01f	8.63 ± 0.22i	—	78.83 ± 0.38cd	51.35 ± 0.66e	27.94 ± 0.71f
CDP6%	30.88 ± 0.00e	12.56 ± 0.08g	—	77.38 ± 0.43d	69.44 ± 0.58b	39.87 ± 0.28cd
CDP8%	28.93 ± 0.00f	11.59 ± 0.12h	—	76.64 ± 1.33d	63.56 ± 1.01d	36.53 ± 0.89e
CDP12%	30.90 ± 0.01e	12.97 ± 0.26g	—	76.12 ± 1.06d	67.01 ± 0.88c	38.68 ± 0.63d
CDP16%	39.01 ± 0.01c	16.21 ± 0.37e	—	81.64 ± 0.86bc	76.83 ± 1.37a	41.75 ± 0.84bc
CDP20%	34.76 ± 0.01d	14.10 ± 0.21f	—	78.47 ± 0.61ed	66.63 ± 0.92e	40.41 ± 0.66cd
CF	34.92 ± 0.00d	18.70 ± 0.39c	46.94 ± 0.31d	81.57 ± 0.48bc	45.72 ± 0.93fg	39.34 ± 0.86d
CCF6%	39.11 ± 0.00c	20.75 ± 0.22b	50.68 ± 0.76c	84.04 ± 1.36ab	46.54 ± 0.30fg	44.01 ± 0.96a
CCF8%	40.34 ± 0.00bc	21.85 ± 0.18a	51.85 ± 0.30c	84.44 ± 1.04ab	48.04 ± 0.13f	42.71 ± 0.83ab
CCF12%	42.61 ± 0.01a	17.72 ± 0.20d	56.85 ± 0.35a	86.63 ± 1.16a	45.40 ± 0.26g	42.47 ± 0.25ab
CCF16%	40.61 ± 0.00bc	17.48 ± 0.63d	54.43 ± 0.90b	78.95 ± 0.87cd	45.15 ± 0.98g	40.31 ± 0.29cd
CCF20%	41.54 ± 0.01ab	17.32 ± 0.40d	57.37 ± 1.29a	77.29 ± 1.63d	44.65 ± 0.55g	43.43 ± 0.18ab



出先增加后降低的趋势,其中 CCF12% 处理中籽粒氮素累积量最高。与普通复合肥相比,两种生物炭基肥均能显著提高小麦磷素利用率。磷酸二铵炭基肥处理磷素利用率依次为 CDP16%>CDP20%>CDP6%、CDP12%>CDP8%,其中 CDP16% 处理的磷素利用率较 DP 处理提高了 8.78 个百分点。三元炭基复合肥处理中,CCF6% 和 CCF8% 处理的磷素利用率较 CF 处理分别提高 10.96% 和 16.84%,而 CCF12%、CCF16% 和 CCF20% 处理磷素利用率较 CF 处理显著降低,在籽粒磷素累积量中表现出与磷肥利用率相一致的规律性。与普通复合肥相比,三元炭基复合肥处理显著提高了小麦钾素利用率,钾素利用率依次为 CCF12%、CCF20%>CCF16%>CCF6%、CCF8%。相较 CF 处理,添加生物炭增加了籽粒中钾素累积量,增加幅度为 2.47% ~ 11.87%,其中生物炭添加量为 6% 的三元复合肥处理籽粒钾素累积量最高。

2.2 不同施肥处理对小麦地上部生物量的影响

施肥显著增加小麦地上部生物量(表 4)。在返青期,磷酸二铵炭基复合肥的小麦地上部生物量与普通二铵复合肥处理之间差异不显著。除 CCF6% 处理外,其他磷酸二铵炭基肥处理小麦地上部生物量显著高于 DP 处理。在拔节期,磷酸二铵炭基肥处理小麦地上部生物量显著高于 DP 处理,而 5 个不同生物炭添加比例的磷酸二铵炭基肥处理之间差异不显著。除 CCF6% 处理外,其他三元炭基复合肥处理的小麦地上部生物量显著高于 CF 处理,而 CCF8%、CCF12%、CCF16% 和 CCF20% 处理之间差异不显著。在孕穗期和成熟期,随着生物炭添加比例的增加,两种炭基肥处理的小麦地上部生物量均呈先增加后降低的规律。在成熟期,CDP12% 处理小麦地上部生物量较 DP 处理增加 12.30%,CCF12% 处理小麦地上部生物量较 CF 处理显著提高 4.33%。

表 4 不同施肥处理的小麦地上部干物质累积量 (kg/hm²)

处理	返青期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	261.00 ± 11.10d	1363.53 ± 19.60e	3452.64 ± 170.47e	5541.74 ± 130.59g
DP	564.75 ± 34.44a	4149.20 ± 10.37d	8681.02 ± 92.83d	13212.83 ± 188.04f
CDP6%	548.50 ± 13.78a	5213.53 ± 147.78ab	9734.99 ± 106.25bc	14256.45 ± 82.72e
CDP8%	515.25 ± 26.08ab	5132.53 ± 96.93ab	9953.29 ± 50.71ab	14774.02 ± 194.96bcd
CDP12%	503.50 ± 11.43ab	5004.30 ± 143.14b	9678.97 ± 61.88bc	14838.65 ± 138.12abcd
CDP16%	514.25 ± 12.56ab	4987.83 ± 68.68b	9687.77 ± 125.41bc	14486.81 ± 146.27cde
CDP20%	518.00 ± 12.17ab	5077.03 ± 90.21ab	9431.67 ± 238.46c	14272.27 ± 142.54e
CF	426.38 ± 3.25c	4622.33 ± 26.64c	9720.45 ± 70.57bc	14618.60 ± 89.35cde
CCF6%	462.38 ± 1.95bc	4660.90 ± 113.24c	9773.85 ± 98.90bc	14886.80 ± 90.14abc
CCF8%	505.50 ± 41.29ab	5225.83 ± 151.64ab	10158.62 ± 131.65a	15091.42 ± 135.49ab
CCF12%	513.00 ± 3.90ab	5256.90 ± 123.78ab	10253.95 ± 81.65a	15250.99 ± 80.87a
CCF16%	518.63 ± 5.85ab	5330.87 ± 3.09a	9996.89 ± 57.14ab	14662.91 ± 116.49bcde
CCF20%	522.00 ± 3.90ab	5373.80 ± 35.28a	9902.04 ± 78.37ab	14430.32 ± 168.20de

2.3 不同施肥处理对土壤速效养分含量的影响

施肥显著提高了 0 ~ 20 cm 土层土壤硝态氮含量(表 5)。在小麦返青期和成熟期,CDP6% 处理的土壤硝态氮含量显著高于 DP 处理,CDP8%、CDP12%、CDP16% 和 DP 处理之间差异不显著;三元炭基复合肥处理之间土壤硝态氮含量差异不显著。在拔节期,CDP6% 和 CDP12% 处理的土壤硝态氮含量显著高于 CDP16% 和 CDP20% 处理。CCF6%、CCF8% 和 CCF16% 处理土壤硝态氮含量显著高于 CF 处理。在孕穗期,两种生物炭基肥的土壤硝态氮含量与普通复合肥之间差异不显著。

施肥显著提高了 0 ~ 20 cm 土层土壤有效磷含

量,三元炭基复合肥处理与普通复合肥处理之间差异不显著(表 6)。在小麦返青期,CDP12% 处理土壤有效磷含量显著高于 CDP16% 和 CDP20% 处理。CDP6%、CDP8% 和 CDP12% 处理土壤有效磷含量与 DP 处理差异不显著。在拔节期,CDP6% 和 CDP12% 处理土壤有效磷含量显著高于 CDP16% 和 CDP20% 处理。在孕穗期,CDP16% 处理土壤有效磷含量显著低于 CDP8% 和 CDP12% 处理,其他磷酸二铵炭基肥处理间差异不显著。在成熟期,CDP6%、CDP8% 和 CDP12% 处理土壤有效磷含量与 DP 处理相比无显著差异,CDP16% 和 CDP20% 处理土壤有效磷含量显著低于 DP 处理。

表 5 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土壤硝态氮含量 (mg/kg)

处理	返青期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	24.58 ± 1.81e	9.65 ± 0.63f	7.74 ± 0.45c	8.19 ± 0.60e
DP	33.48 ± 0.51bcd	10.04 ± 0.55ef	10.32 ± 0.21b	10.24 ± 0.63cd
CDP6%	39.18 ± 2.11a	13.78 ± 0.41ab	11.59 ± 0.56ab	13.06 ± 0.70a
CDP8%	34.83 ± 1.42bcd	12.20 ± 1.27bcd	11.07 ± 0.70ab	11.61 ± 0.47bcd
CDP12%	30.72 ± 1.90cd	14.09 ± 0.15ab	11.59 ± 0.13ab	11.16 ± 0.17bcd
CDP16%	33.55 ± 2.01bcd	10.70 ± 0.96def	12.81 ± 0.55a	11.18 ± 0.67bcd
CDP20%	31.10 ± 0.64cd	10.39 ± 0.60def	11.52 ± 0.09ab	10.37 ± 0.21cd
CF	32.90 ± 1.36bcd	10.40 ± 0.20def	10.10 ± 0.29b	10.97 ± 0.45bcd
CCF6%	35.25 ± 0.58abc	14.33 ± 0.24a	10.65 ± 1.03b	11.75 ± 0.19abc
CCF8%	34.68 ± 0.59bcd	13.97 ± 0.55ab	10.90 ± 0.98ab	11.56 ± 0.20bcd
CCF12%	35.83 ± 0.74ab	12.21 ± 0.42bcd	11.11 ± 0.27ab	11.94 ± 0.25ab
CCF16%	33.64 ± 1.34bcd	13.07 ± 0.28abc	11.42 ± 0.90ab	11.21 ± 0.45bcd
CCF20%	35.27 ± 0.81abc	11.59 ± 0.23cde	10.80 ± 0.64ab	11.76 ± 0.27abc

表 6 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土壤有效磷含量 (mg/kg)

处理	返青期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	20.97 ± 1.43e	14.63 ± 0.39d	12.87 ± 0.55d	12.17 ± 0.24f
DP	59.87 ± 4.75ab	22.53 ± 1.56bc	21.95 ± 1.02ab	20.14 ± 0.60abc
CDP6%	60.40 ± 0.70ab	26.07 ± 0.91ab	21.05 ± 0.18abc	22.95 ± 0.83a
CDP8%	62.60 ± 2.55ab	30.00 ± 2.24a	22.00 ± 0.86ab	21.85 ± 0.78abc
CDP12%	66.10 ± 2.09a	38.17 ± 1.30a	23.14 ± 0.73a	22.65 ± 0.63ab
CDP16%	49.77 ± 4.07c	21.83 ± 0.79bc	19.42 ± 0.51c	19.42 ± 0.51e
CDP20%	57.70 ± 3.69b	22.90 ± 3.59bc	20.20 ± 1.29bc	19.92 ± 0.93de
CF	36.43 ± 1.80d	20.72 ± 0.42c	21.18 ± 0.28abc	20.77 ± 0.41cde
CCF6%	40.72 ± 2.33d	21.30 ± 0.12c	20.45 ± 0.11bc	20.34 ± 0.13cde
CCF8%	40.35 ± 1.01d	21.95 ± 0.03bc	21.58 ± 0.49ab	20.93 ± 0.49bcde
CCF12%	40.70 ± 1.04d	22.40 ± 0.64bc	20.99 ± 0.31abc	21.44 ± 0.09abcd
CCF16%	41.05 ± 0.85d	22.95 ± 0.03bc	21.70 ± 0.31ab	21.00 ± 0.46bcde
CCF20%	40.95 ± 0.85d	22.20 ± 0.17bc	20.02 ± 0.53bc	20.83 ± 0.40cde

不同炭添加量的磷酸二铵炭基肥对小麦不同生育期土壤速效钾含量无显著性影响（表 7）。在小麦返青期，CCF8% 处理土壤速效钾含量显著高于 CCF12%、CCF16% 和 CCF20% 处理，其他处理间差异不显著。在小麦拔节期，三元炭基复合肥处理土壤速效钾含量与普通复合肥差异不显著，且不同炭添加比例炭基肥对土壤速效钾含量无显著性影响。在孕穗和成熟期，CCF20% 处理土壤速效钾含量显著低于 CCF6% 和 CCF8% 处理，其他三元炭基

复合肥与普通复合肥处理之间差异不显著。

不同施肥处理仅对小麦返青期 0 ~ 20 cm 土层土壤 pH 产生影响，对拔节期、孕穗期和成熟期土壤 pH 影响不显著（表 8）。与 CK 相比，小麦返青期单施磷酸二铵和三元复合肥与土壤 pH 无显著性影响。CDP8%、CDP12%、CDP16% 和 CDP20% 的小麦返青期土壤 pH 显著低于 DP 处理。与 CF 处理相比，不同炭添加量的三元炭基复合肥均显著降低了小麦返青期土壤 pH，而三元炭基复合肥处理之间差异性不显著。

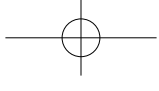


表 7 不同施肥处理 0 ~ 20 cm 土壤速效钾含量 (mg/kg)

处理	返青期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	252.10 ± 5.79g	226.62 ± 11.74d	229.36 ± 4.53f	216.22 ± 1.50f
DP	271.33 ± 4.75f	292.55 ± 4.13abc	280.31 ± 4.76de	263.21 ± 1.14e
CDP6%	286.53 ± 4.76def	278.03 ± 8.93bc	283.92 ± 5.96de	272.81 ± 5.58cde
CDP8%	283.27 ± 10.44ef	303.43 ± 15.17ab	288.68 ± 2.12de	271.29 ± 3.27cde
CDP12%	290.37 ± 3.28cdef	287.37 ± 2.99abc	293.53 ± 4.79bcd	279.36 ± 4.46bcd
CDP16%	282.90 ± 3.71ef	272.63 ± 7.78c	277.77 ± 2.17e	266.33 ± 3.74de
CDP20%	277.50 ± 9.96f	283.35 ± 11.86bc	290.43 ± 9.25cde	269.24 ± 8.73cde
CF	316.87 ± 6.17ab	289.10 ± 5.31abc	306.32 ± 5.51ab	291.00 ± 5.24ab
CCF6%	321.55 ± 5.05ab	303.18 ± 3.80ab	315.35 ± 0.95a	297.90 ± 1.30a
CCF8%	328.60 ± 2.42a	303.83 ± 2.64ab	313.22 ± 144.00a	299.24 ± 1.25a
CCF12%	304.43 ± 8.21bcd	312.03 ± 1.05a	305.57 ± 1.73abc	291.97 ± 3.61ab
CCF16%	308.15 ± 7.42bc	293.88 ± 5.00abc	303.94 ± 6.55abc	287.06 ± 4.79ab
CCF20%	302.30 ± 1.96bcde	286.14 ± 6.46abc	293.95 ± 3.83bcd	282.59 ± 3.15bc

表 8 不同施肥处理的 0 ~ 20 cm 土壤 pH

处理	返青期	拔节期	孕穗期	成熟期
CK	7.92 ± 0.02a	8.18 ± 0.00a	8.04 ± 0.01a	7.97 ± 0.10a
DP	7.92 ± 0.03a	8.13 ± 0.04a	8.00 ± 0.02a	7.89 ± 0.02a
CDP6%	7.85 ± 0.01ab	8.22 ± 0.04a	8.08 ± 0.05a	8.02 ± 0.06a
CDP8%	7.74 ± 0.04c	8.17 ± 0.03a	8.04 ± 0.03a	7.90 ± 0.03a
CDP12%	7.81 ± 0.06bc	8.12 ± 0.04a	7.99 ± 0.07a	8.02 ± 0.01a
CDP16%	7.80 ± 0.03bc	8.09 ± 0.09a	7.96 ± 0.09a	7.90 ± 0.08a
CDP20%	7.78 ± 0.06bc	8.10 ± 0.02a	7.98 ± 0.03a	7.98 ± 0.05a
CF	7.91 ± 0.01a	8.17 ± 0.00a	8.00 ± 0.03a	7.99 ± 0.06a
CCF6%	7.80 ± 0.04bc	8.16 ± 0.03a	8.06 ± 0.02a	7.98 ± 0.05a
CCF8%	7.79 ± 0.01bc	8.16 ± 0.08a	8.03 ± 0.08a	7.99 ± 0.02a
CCF12%	7.76 ± 0.01bc	8.15 ± 0.00a	8.02 ± 0.00a	8.03 ± 0.10a
CCF16%	7.73 ± 0.01c	8.13 ± 0.01a	8.00 ± 0.01a	7.95 ± 0.05a
CCF20%	7.71 ± 0.01c	8.10 ± 0.07a	7.97 ± 0.04a	7.99 ± 0.01a

3 讨论

3.1 生物炭基复合肥对小麦地上部干物质量及产量的影响

地上部干物质量积累是小麦产量形成的物质基础^[10]。在小麦返青期以后,施用不同炭添加比例的生物炭基复合肥对小麦地上部干物质量积累具有不同程度的促进作用,且随着辅料中生物炭添加量的增加,促进效果呈先增加后减少的趋势。原因可能是炭基肥中的生物炭对养分的吸持和缓释作用促进了小麦养分吸收,为地上部营养积累提供了保障^[11]。而过高的生物炭添加量会吸附土壤中更多的养分,造成作物不能及时吸收养分^[12-13],再一方面

可能是由于添加生物炭会增加土壤中的碳氮比,降低土壤中有效氮含量,不利于作物吸收养分^[14]。李正东等^[15]研究表明,以棉花秸秆、玉米秸秆、小麦秸秆、稻壳、花生壳和生活废弃物 6 种生物质原料生产的炭基复合肥对小麦产量提高效果显著,其中花生壳、棉花秸秆和玉米秸秆炭基复合肥增产效果最理想。在本试验中,以芦苇为生物质原料,采用有机废硫酸低温炭化新技术生产的生物炭基肥对小麦增产效果显著,随着生物炭添加比例的增加,两种炭基肥处理的小麦籽粒产量均呈先增加后降低的规律。CDP8%、CDP12% 和 CCF12% 处理的小麦穗数和穗粒数增加是小麦增产的主要原因,不同炭添加量的两种生物炭基肥对小麦千粒重无显著性影响。

Huang 等^[16]在水稻上的研究也表明,长期施用生物炭主要通过增加单位面积穗数和穗粒数提高作物产量。

3.2 生物炭基复合肥对土壤速效养分及养分利用率的影响

炭基肥在提高土壤速效养分含量作用显著,但施用效果受多种因素的影响。Steiner 等^[17]研究发现,用硫酸铵+氯化钾+普通过磷酸钙+生物炭掺混制备的生物炭基复合肥可显著增加土壤全氮、有效磷含量,延长氮素供应期。在本试验中,施用生物炭基肥对小麦拔节期土壤硝态氮影响最为显著;三元生物炭基肥对土壤有效磷影响较小,可能是由于磷肥施用量较低,且供试土壤为滨海盐渍土,对磷吸附、固定比较强烈,因此,土壤有效磷含量变化较小。籽粒中磷素累积量随生物炭添加均呈现增加趋势,可能是生物炭通过影响冬小麦根系形态从而促进磷素的吸收^[18]。总体而言,生物炭能增加作物籽粒中磷素累积量,这也是磷素利用率提高的主要原因。磷酸二铵炭基肥和三元炭基复合肥对土壤速效钾影响较小,可能是由于土壤有效钾本底值较高,但随着生物炭替代比例的增加,土壤速效钾有降低的风险。三元炭基复合肥处理的钾素肥料利用率随着生物炭添加量增加而增加,而籽粒钾吸收量无显著性变化,说明添加生物炭促进了小麦秸秆部分对钾素的吸收利用。总体来讲,施用生物炭基复合肥对小麦各生育期土壤速效养分具有不同程度的提高作用,主要是因为生物炭较大的比表面积和较多的化学官能团可吸附硝酸根、铵根、磷酸根及其他水溶性盐离子,进而延缓肥料在土壤中的释放,降低淋溶和固定损失^[19]。

研究表明,施用生物炭具有提高肥料利用率的作用^[20]。本试验中,施用两种生物炭基肥均能显著提高小麦氮、磷素利用率,主要得益于生物炭的保肥和缓释性能。另外,生物炭较大的孔隙度和比表面积为土壤有益菌群数量增加提供了附着位点和较大空间^[21-22],有利于土壤中速效养分的活化,进而促进作物的养分吸收,提高养分利用率^[23]。

一般认为,施用生物炭或生物炭基肥可提高土壤 pH 和盐基饱和度,对酸性土壤改良和喜碱作物的生产具有积极意义^[6]。在本试验条件下,除 CDP6% 处理外,施用磺化炭基复合肥较普通复合肥显著降低了小麦返青期耕层土壤 pH,主要原因是施用的生物炭基肥是采用有机废硫酸制成,生成的磺化炭中吸附了硫酸,呈酸性^[8]。因此,本试验

中施用的生物质磺化炭基肥推荐在碱性土壤上长期施用,对改良土壤酸碱性可能会产生积极的影响。

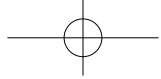
4 结论

施用磺化炭基复合肥显著影响小麦籽粒产量和地上部生物累积量,且随着生物炭添加比例的增加均呈先增加后降低的规律。其中,磷酸二铵炭基肥中 CDP8% 和 CDP12% 处理增产效果较好,三元炭基复合肥中 CCF12% 处理增产效果显著。

施用磺化炭基复合肥对小麦各生育期土壤速效养分具有不同程度的提高作用。炭添加量 6% ~ 12% 的磺化炭基复合肥可显著增加小麦拔节期和孕穗期土壤硝态氮含量,并显著增加成熟期土壤有效磷含量,有利于籽粒中养分的累积,显著提高了小麦氮、磷素利用率。另外,施用炭基复合肥较普通复合肥显著降低了小麦返青期耕层土壤 pH,对小麦生育后期土壤 pH 无显著性影响。

参考文献:

- [1] Li L, Zou D, Xiao Z, et al. Biochar as a sorbent for emerging contaminants enables improvements in waste management and sustainable resource use [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210 (10): 1324-1342.
- [2] Purakayastha T J, Bera T, Bhaduri D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields; Pathways to climate change mitigation and global food security [J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 345-365.
- [3] 计海洋,汪玉瑛,刘玉学,等. 生物炭及改性生物炭的制备与应用研究进展 [J]. *核农学报*, 2018, 32 (11): 2281-2287.
- [4] 刘森,王志春,杨福,等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35 (3): 1-8.
- [5] 刘宇娟,谢迎新,董成,等. 秸秆生物炭对潮土区小麦产量及土壤理化性质的影响 [J]. *华北农学报*, 2018, 33 (3): 232-238.
- [6] 魏春辉,任奕林,刘峰,等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展 [J]. *河南农业科学*, 2016, 45 (3): 14-19.
- [7] Zhou Z M, Yao D Q, Li S F, et al. Sustainable production of value-added sulfonated biochar by sulfuric acid carbonization reduction of rice husks [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 102025.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 99-100.
- [9] 程冬冬,唐亚福,刘艳,等. 活化腐植酸肥料对苹果幼树的生长和养分利用的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (4): 83-90.
- [10] Chu P, Zhang Y, Yu Z, et al. Winter wheat grain yield, water



- use, biomass accumulation and remobilisation under tillage in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 43–53.
- [11] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长, 养分吸收及土壤肥力的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (6): 33–38.
- [12] 王晓玲, 赵泽州, 任树鹏, 等. 生物炭基肥在我国的制备和应用研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (1): 230–238.
- [13] 吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 等. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (3): 492–503.
- [14] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (14): 115–123.
- [15] 李正东, 陶金沙, 李恋卿, 等. 生物质炭复合肥对小麦产量及温室气体排放的影响 [J]. *土壤通报*, 2015, 46 (1): 177–183.
- [16] Huang M, Fan L, Jiang L G, et al. Continuous applications of biochar to rice: Effects on grain yield and yield attributes [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (3): 563–570.
- [17] Steiner C, Glaser B, Gerdal T W, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171 (6): 893–899.
- [18] 李瑞霞, 李洪杰, 霍艳丽, 等. 生物炭对华北冬小麦根系形态和内生真菌多样性的影响 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49 (3): 235–242.
- [19] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 等. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (5): 886–897.
- [20] 谢志坚, 吴佳, 段金贵, 等. 生物炭基肥与紫云英联合还田对红壤区早稻干物质累积和氮素利用特征的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (9): 1732–1739.
- [21] 陈义轩, 宋婷婷, 方明, 等. 四种生物炭对潮土土壤微生物群落结构的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 (2): 394–404.
- [22] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (1): 304–310.
- [23] Sun C, Hao L, Wang D, et al. Nitrogen utilisation and metabolism in maize (*Zea mays* L.) plants under different rates of biochar addition and nitrogen input conditions [J]. *Plant Biology*, 2019, 21 (5): 882–890.

Effects of sulfonated carbon-based compound fertilizer on wheat growth and soil nutrients in salinized aquic soil

CHENG Yun-long¹, ZHENG Wen-kui^{1, 3*}, GAO Qiang², WANG Chun¹, GUO Xin-song³ (1. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian Shandong 271018; 2. Shandong Lubei Chemical Co. Ltd, Binzhou Shandong 251909; 3. Shandong Nongda Fertilizer Technology Co. Ltd, Feicheng Shandong 271600)

Abstract: In order to explore the application effect of a new sulfonated carbon-based compound fertilizer prepared by low temperature carbonization technology of organic waste sulfuric acid on wheat in coastal saline soil area, a field experiment was conducted. The effects of no fertilization (CK), diammonium phosphate (DP), 15-15-15 ternary compound fertilizer (CF) and ternary compound fertilizer with carbon addition of 6%, 8%, 12%, 16% and 20% on wheat dry matter accumulation, yield, nutrient utilization rate and soil nutrient status were studied. The results showed that the application of biochar-based compound fertilizer significantly increased the grain yield of wheat, and the grain yield of wheat was increased first and then decreased with the increase of the proportion of biochar. The yields of CDP8% and CDP12% treatment were better than that of DP treatment, which increased by 6.42% and 5.82%, respectively. Compared with CF treatment, CCF12% treatment in ternary carbon-based fertilizer increased grain yield by 4.92%. The addition of biochar can increase the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in plants, so as to improve the utilization rate of fertilizer nutrients. Among them, carbon addition of 6% ~ 12% showed the best effect. The application of biochar-based compound fertilizer could improve the soil available nutrients in different growth stages of wheat. In the jointing and booting stages of wheat, soil nitrate content was significantly increased by 17.40% ~ 40.34% and 5.45% ~ 12.31% for the two types of carbon-based compound fertilizers with carbon content of 6% ~ 12%. At the mature stage, soil available phosphorus contents under CDP6%, CDP8% and CDP12% treatments were significantly higher than that under DP treatment, with an increase of 8.49% ~ 13.95%. In addition, the application of sulfonated carbon-based compound fertilizer significantly reduced the soil pH in the surface layer of wheat in the green stage compared with the ordinary compound fertilizer. In conclusion, the application of sulfonated carbon-based compound fertilizer with biochar addition of 6% ~ 12% had a positive effect on improving soil available nutrient content, and could improve wheat grain yield and nutrient utilization efficiency.

Key words: sulfonated; carbon-based compound fertilizer; wheat; production; soil fertility