



生物质缓释土壤保水增肥剂对宁夏盐池县土壤及其作物的影响

武金龙^{1, 2, 3}, 李郝琪^{1, 2, 3}, 马锋茂⁴, 韩凤兰^{1, 2, 3},
黄家和^{1, 2, 3}, 刘燕华⁵, 邵自强⁵, 江成云⁶

(1. 北方民族大学材料科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北方民族大学高分子材料及制造技术重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. “工业废弃物循环利用及先进材料”国际科技合作基地, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏盐池县农牧科学研究所, 宁夏 盐池 751500; 5. 北京理工大学材料学院, 北京 100081; 6. 宁夏宁东市政建设发展有限公司, 宁夏 银川 750409)

摘要: 为探讨生物质缓释土壤保水增肥剂对农田土壤水环境、土壤养分吸收和作物产量的影响, 在宁夏回族自治区吴忠市盐池县以玉米、马铃薯、燕麦等为供试作物, 生物质缓释土壤保水增肥剂为供试材料, 采用田间试验, 设置生物质缓释土壤保水增肥剂不同梯度的施用量, 测定土壤含水量、酸碱度、电导率、容重和土壤养分等, 研究其对试验地区土壤理化性质、土壤养分以及不同作物产量的影响。结果表明: 在施用量不同的情况下, 所种植的作物总体上产量都有所增加。苏丹草和燕麦草增产率最高, 分别达到 36.26% 和 24.35%。荞麦在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为 120 kg/hm² 时产量增产率达到 23.19%, 而马铃薯在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为 120 kg/hm² 时产量增产率最高, 达到了 77.78%, 增产效果显著。但玉米产量变化趋势有所不同, 在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为 60 kg/hm² 时产量反而有所下降, 当施用量增加至 120 kg/hm² 时产量有所上升, 但增产率只有 0.69%, 主要是由于地块所处位置、地势以及土壤组分存在一定程度的差异性, 导致生物质缓释土壤保水增肥剂施用量对玉米产量影响不大。

关键词: 羧甲基纤维素; 农作物; 产量; 土壤性质; 保水增肥作用

土壤是所有陆地生态系统中最重要的重要组成部分, 它本身就是一个独特的生态系统, 土壤覆盖确保了地球上所有植物、动物和人类的生命, 其中肥力是土壤的独特属性。我国北方地区, 尤其是西北地区有相当数量的贫瘠黄土或沙化土地, 农作物或绿色植被种植难度大, 且常年降水量少, 造成了较为严重的土地荒漠化和水土流失现象。如何提高土地利用效率、作物产量以及创建绿水青山的优美环境是今后重要的工作之一。采用自然或半自然的理念和方法, 通过种植一年生或多年生绿植, 锁住土壤水分, 改善土壤养分循环, 减少地表径流, 对提高耕地面积、保护农业生产显得至关重要。

英国牛津大学的群体生物学家 Charles 表示, 在过去 30 年里, 中国生产的粮食养活了 14 亿人口中的绝大多数, 创造了一个农业奇迹, 但也为此付

出了巨大的环境代价。化肥(如含氮、钾、磷普通化肥)在增加作物产量的同时, 也让土壤面临酸化、板结的问题, 污染了水源, 并导致全球变暖(导致土壤微生物活跃, 增加土壤中有机质的分解而释放二氧化碳, 造成往复的恶性循环)。“减少化肥使用但不减少农民收益”是中国农业的最大挑战^[1-2]。多年来, 对改善土壤结构、避免土壤污染进行了大量研究, 生物质炭基材料、纳米生物炭材料、铁基(或钙基)材料、蒙脱土吸附材料及高分子基亲水材料等大量涌现^[3-6]。另外, 有研究用无机基质填料处理土壤, 发现其对氮、磷的吸附有饱和性, 需要周期性更新和处理无机填料, 这样既增加了治理土壤污染的运行成本, 又难以进行填料的后续处理, 这也促使了低价、可降解生物基质材料的研究发展^[7]。土壤调理剂具有促进团粒结构形成, 提高土壤持水能力, 增加有效水供应, 调理土壤养分体系以及促进有效养分供应的作用, 尤其是绿色的生物质基土壤调理剂研制和应用得到关注。土壤中水分的存在对植物的生存至关重要, 液态水保证了植物对营养元素的吸收, 为植物获得更好的生长速度提供可能, 在干旱胁迫时, 植物地上生长

收稿日期: 2023-08-11; 录用日期: 2024-01-26

基金项目: 宁夏重点研发计划(2019BBF02015); 宁夏自然科学基金(2023AAC03312); 北方民族大学科研项目(2023XYZCL03)。

作者简介: 武金龙(1987-), 博士, 讲师, 主要研究方向为天然高分子材料及应用。E-mail: wjl15@nmu.edu.cn。

受到的影响要比地下生长（根）大得多，而亲水聚合物在增加有效水分的同时，有助于减轻植物的水分胁迫，从而提高植物的生长和性能。

在现代农业中许多亲水聚合物被用来提高植物的营养和水分状况，Liu 等^[8]以小麦秸秆粉碎为原料，通过丙烯酸（Acrylic acid, AA）和化学改性麦秸粉（chemically modified pulverized wheat straw, C-mpcws）接枝共聚，制备了一种新型的高吸水性、生态友好高分子材料 PAA-g-Cmpws，结果表明，该产品在蒸馏水中的吸收率为 417 g/g，在 0.9% NaCl 溶液中的吸水率为 45 g/g，可用于提高土壤的保水性。韩玉国等^[9]利用含亲水性网络的超吸水高聚物（SAP）降低土壤容重，改善土壤渗透性，提高土壤孔隙度。张涛等^[10]用再生木质素稳定粉质土试验研究，发现小应变剪切模量和无侧限抗压强度随养护期的增长呈对数增长趋势。Hataf 等^[11]用壳聚糖来增加土壤颗粒间的相互作用，改善了土壤的力学性能，但随着时间的延长，壳聚糖增强效果便会消失。Smith 等^[12]报道了可用羧甲基纤维素（CMC）和纤维素磺酸酯改良农业土壤残留物和相关物质的聚集稳定化作用；Cai 等^[13]将 CMC 作为稳定剂，与零价铁能快速地将土壤中的硝基苯转化为亚硝基苯，但随后中间体（亚硝基苯→苯胍→苯胺）转化相对较慢。刘海林等^[14]将 CMC 作为水溶性保水剂，通过土壤培养和土柱淋溶试验，研究肥料的保水缓释效果，发现添加水溶性保水剂的保水缓释肥料均具有一定的保水性能，而且均能降低肥料养分淋出率，延缓养分释放，减少养分淋溶损失，具有一定的缓释效果；吴大付等^[15]将 CMCNa 作为改良剂处理土壤，进行磷淋溶特性研究，发现 CMCNa 作用于土壤颗粒时，由于分子链的絮凝性，使土壤颗粒形成较强的黏着力，能够增强土壤对磷肥的淋溶性；Olad 等^[16]以 CMCNa、AA、纳米二氧化硅等为原料制备的缓释肥料，在土壤中具有有良好的保水性，在农业和园艺的应用中可提高肥料和水的利用率。但 CMC 在土壤中的反复使用会使土壤中 Na⁺ 的数量累计，其含量超过一定浓度会导致土壤分散和结构破坏而使入渗率下降。若对农业废弃秸秆中的纤维素亲水组分进行改性，将既含有羧甲基又含有钠和钾元素的生物质材料应用于土壤中，开发出生物质缓释土壤保水增肥剂，替代现有农业低分子有机化肥，一方面，可以充分增加当地农业废弃料（秸秆木屑和棉

花边角料）的高附加值利用；另一方面，该系列的生物质缓释土壤保水增肥剂具有良好的增肥、保水和不易流失性等功效，其钠与钾的释放是缓慢长期的释放，肥效期长，对作物无任何伤害，随水流失少，价格低，在农业领域具有重大的推广价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在宁夏盐池县高沙窝镇施记圈村南场自然村（37° 96′ N，106° 87′ E）进行，属于大陆性季风气候，年平均气温 7.8℃，年平均降水量 280 mm，无霜期 105 ~ 139 d，土壤类型为沙质荒漠化土地，土壤比重 2.65 kg/m³。试验地土壤耕层（0 ~ 10 cm）化学性质如下：pH=8.8 ~ 9.0，全磷含量 0.28 g/kg，全钾含量 31.23 g/kg，铵态氮含量 0.40 mg/kg，硝态氮含量 0.46 mg/kg，有效磷含量 19.54 mg/kg，速效钾含量 635.40 mg/kg。供试品种为燕麦草、苏丹草等畜草作物和玉米、荞麦、马铃薯等粮食作物。供试材料为北京理工大学材料学院提供的生物质保水增肥剂，以秸秆浆、竹浆及棉纤维为原料，经过碱化、羧甲基醚化、中和以及纯化、干燥粉碎等工艺制备得到。主要成分为 CMCNa+CMCK，其基本指标如表 1 所示。

表 1 生物质保水增肥剂主要成分基本指标		
指标	CMCNa	CMCK
取代度	≥ 0.9	0.6 ~ 0.8
干燥减量（%）	≤ 10	≤ 10
pH 值	6 ~ 9	6 ~ 11
氯离子（%）	≤ 1.2	—

1.2 试验设计

1.2.1 农田粮食作物种植试验

粮食作物试验共 3.33 hm²，试验基地共分 16 个地块，8 块种马铃薯，5 块种玉米，3 块种荞麦，每块按不同施肥标准进行种植。选择的施肥方案如下：对不同作物分别各自设置不添加任何肥料的空白对照组地块，生物质缓释土壤保水增肥剂设置 60、120 kg/hm² 两个不同梯度。本次种植试验中玉米于 2020 年 5 月 10 日播种，10 月 8 日收获；马铃薯于 2020 年 5 月 22 日播种，10 月 17 日收获；荞麦于 2020 年 7 月 4 日播种，9 月 26 日收获。

1.2.2 农田畜草作物种植试验研究

畜草作物试验面积为 8.1 hm²，试验基地共设置

了72个试验小地块和10个大面积试验地块,其中36个地块种植苏丹草,其余为燕麦草。各地块根据规划按不同施肥标准进行种植。使用羊粪为底肥,此外不再使用其他任何化肥。施肥方法:将事先称好的生物质缓释土壤保水增肥剂与5 kg土按照一定比例进行充分混合均匀,撒于每块试验田,用旋耕机旋入15~20 cm。时间历程:因开春以来一直无有效降水未种植,至7月10日施肥(生物质缓释土壤保水增肥剂、羊粪),7月12日灌水,7月16日播种(荞麦 120 g/30 m²、苏丹草 120 g/30 m²),10月17日收获。

1.2.3 试验测定项目及方法

将土壤样品与水按重量比1:2.5配置成浸提液,利用JF-WQ-2型水质五参数分析仪测定pH值,将土壤样品与水按1:5配置成浸提液,利用JF-WQ-2型水质五参数分析仪测定电导率;土壤容重采用环刀法测定;土壤孔隙度(%)=(1-土壤容重/土壤比重)×100;土壤含水率采用称重法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定;速效钾采用醋酸铵-火焰光度计测定;全磷、全钾、钠使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定;有效磷采用NaHCO₃

浸提-钼锑抗比色法测定;植物产量使用电子秤测定。

2 结果与分析

2.1 生物质缓释土壤保水增肥剂对土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤pH及电导率分析

图1所示为试验土壤pH及电导率随生物质缓释土壤保水增肥剂用量变化的情况。图中横坐标为生物质缓释土壤保水增肥剂在试验地块中的用量。由图1a可以看出,未施生物质缓释土壤保水增肥剂的对照组pH值最高,而加入生物质缓释土壤保水增肥剂后,土壤pH值有所下降,最低降至8.37,表明生物质缓释土壤保水增肥剂的使用降低了土壤的盐碱性,这对农作物生长具有重要作用。由图1b可以看出,土壤电导率整体上随着生物质缓释土壤保水增肥剂添加量的增加而逐渐增大。这可能是生物质缓释土壤保水增肥剂中的钾、钠离子更多发生了解离而引起的。这也表明了生物质缓释土壤保水增肥剂可以有效释放作物生长所需的电解质元素,从而起到增肥作用。

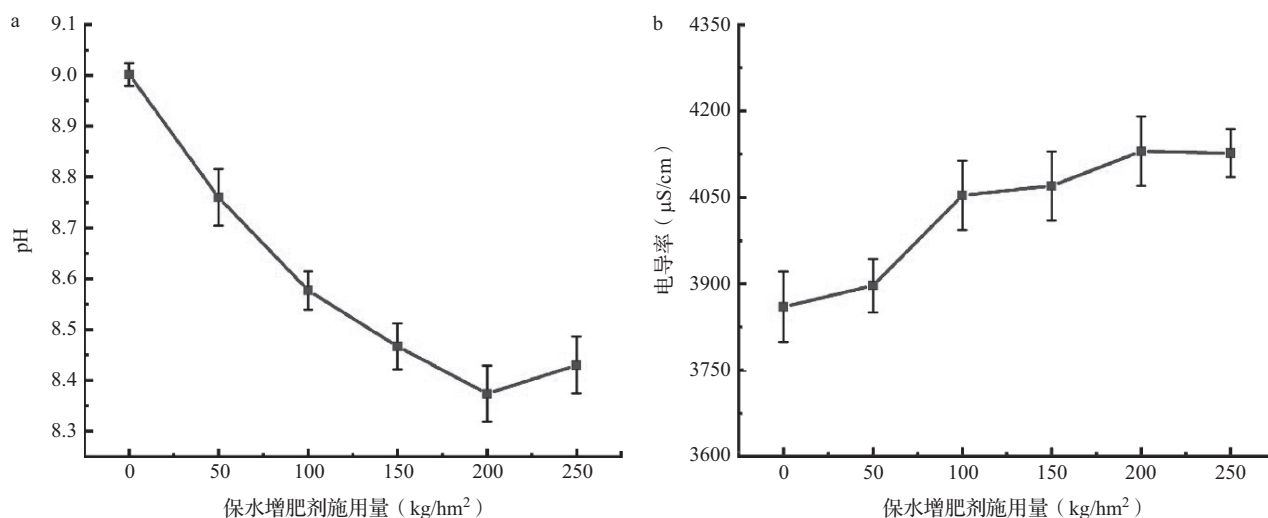


图1 不同生物质缓释土壤保水增肥剂用量的土壤pH值及电导率

2.1.2 土壤孔隙度与容重分析

相较于普通土壤,沙土的粘结性较弱,一般孔隙率较大。由图2可以看出,加入生物质缓释土壤保水增肥剂后,试验地块的沙土孔隙度随着加入量呈现出先减小后增大的变化趋势。而容重则表现出相反的趋势。这表明一定量生物质缓释

土壤保水增肥剂的加入可以起到增加沙土粘结性的作用,在一定程度上降低土壤孔隙度,提高容重,这有助于水土保持,减少土壤风化情况的发生。

2.1.3 土壤含水率分析

由图3可以看出,施加生物质缓释土壤保水增肥剂组土壤含水率要高于未施用的空白对照组,表

明施用生物质缓释土壤保水增肥剂确实可以起到有效的保水效果，且为考察生物质缓释土壤保水增肥剂的用量对大田试验地块土壤保水性及其持续性

的影响情况，在畜草生长周期内的 9—11 月，每隔 10 d 进行一次试验地块土壤含水率的实地测量，结果见表 2。

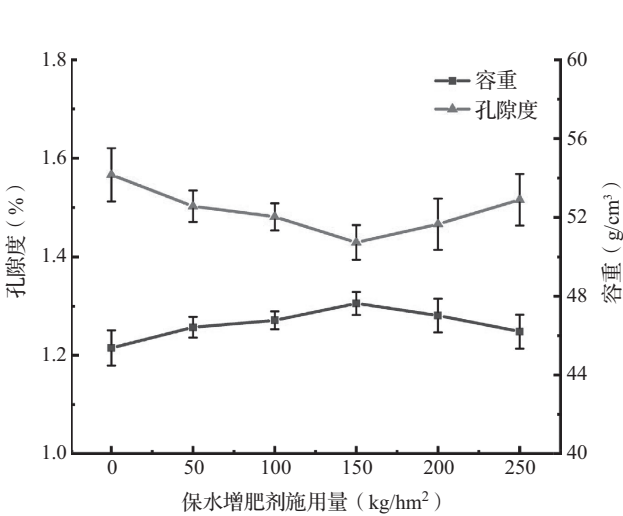


图 2 不同生物质缓释土壤保水增肥剂用量的土壤孔隙度和容重

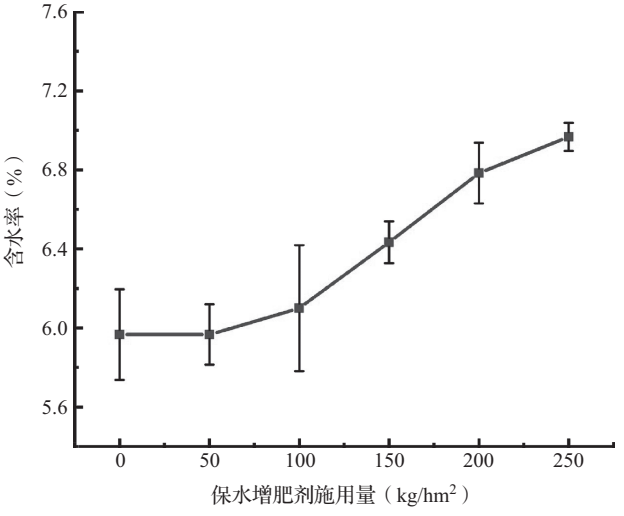


图 3 不同生物质缓释土壤保水增肥剂用量的土壤含水率

由表 2 可以看出，整体上施用了不同量生物质缓释土壤保水增肥剂地块的土壤含水率随时间变化趋势整体上保持一致，这与当地降水情况有关。根据盐池县气象局提供的同期降水情况记录，在测量周期内，9 月中旬、9 月底以及 10 月底均有不同程度的小量降水发生。这是导致含水率随时

间变化的主要原因。参照未施用的空白对照组可知，在施用量为 50 kg/hm² 时，含水率均高于空白对照组或持平。施用量为 200 和 250 kg/hm² 时含水率均显著高于空白对照组。这些结果表明，生物质缓释土壤保水增肥剂的使用对土壤起到了保水的作用。

表 2 20 cm 土层土壤体积含水率均值 (%)

时间 (月 - 日)	保水增肥剂用量					
	0 kg/hm ²	50 kg/hm ²	100 kg/hm ²	150 kg/hm ²	200 kg/hm ²	250 kg/hm ²
09-11	14.927	15.083	14.553	14.353	17.977	17.860
09-22	13.233	14.257	12.960	12.547	16.193	15.083
10-01	15.353	15.483	14.637	14.810	18.207	16.083
10-11	13.920	14.620	12.513	12.430	16.390	15.010
10-22	13.187	13.893	12.050	12.257	15.570	13.837
11-03	13.087	13.803	12.923	13.253	15.677	15.063
11-12	13.017	16.570	12.287	13.200	15.893	14.740

2.2 不同施用量的生物质缓释土壤保水增肥剂对畜草作物产量的影响

如图 4 所示，生物质缓释土壤保水增肥剂施用量在 50 ~ 200 kg/hm² 时苏丹草的产量高于空白对照组。当施用量在 100 kg/hm² 时产量达到最大，增产率最高，达到 36.26%；而当施用量达到 250 kg/hm² 时产量反而略低于空白对照组，增产率变为 -0.55%。而对于燕麦草的情况则有所不同，生物质缓释土壤保水增肥剂施用量在 50 ~ 250

kg/hm² 时燕麦草的产量均高于空白对照组。当施用量在 100 kg/hm² 时产量达到最大，增产率最高，达到 24.35%；而施用量再增大时增产率出现一定程度地下降，当施用量达到 250 kg/hm² 时增产率仍可达到 10.75%。图 4 的数据表明，生物质缓释土壤保水增肥剂对苏丹草和燕麦草这两种畜草作物表现出不同的增产效果。这主要是由于两种畜草所需生长条件有所差异。相较于苏丹草而言，燕麦草蒸腾系数高，生长过程对水分和养分的需求量

更大。因此,生物质缓释土壤保水增肥剂被施用后起到了很好的保水增肥作用,能够为燕麦草的

生长提供更多的水分保障,从而达到更好的增产效果。

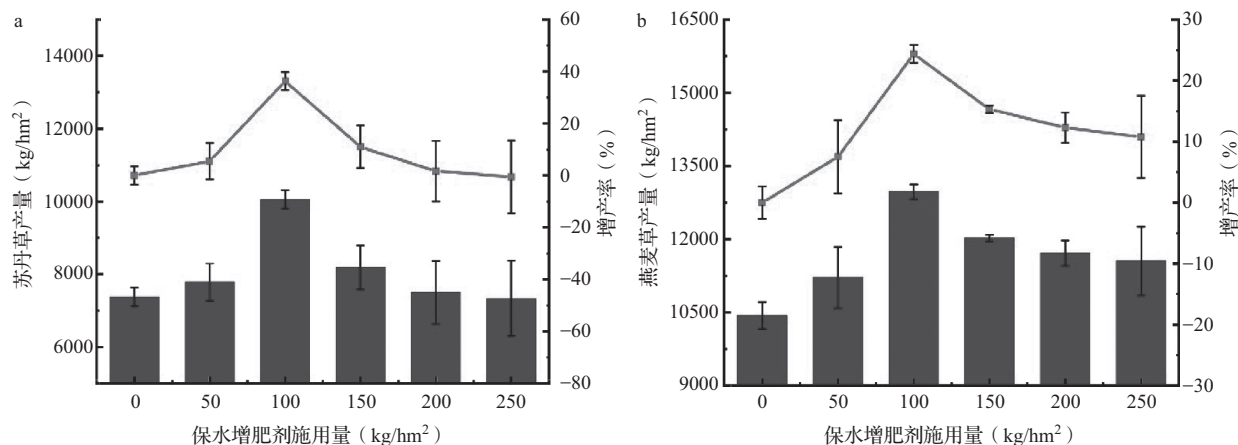


图4 不同生物质缓释土壤保水增肥剂用量对畜草作物产量的影响

2.3 不同施用量的生物质保水增肥剂对粮食作物产量的影响

由图5可知,在施用量不同的情况下,3种作物总体上产量都有所上升。荞麦在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为120 kg/hm²时产量增产率达到23.19%,而马铃薯在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为120 kg/hm²时产量增产率最高,达到了77.78%,增产效果显著。这主要是由于马铃薯生长过程中要供给充足的水分和养分才能获得高产,而生物质缓释土壤保水增肥剂的保水作用及其中含有的钾、钠等元素

的存在为马铃薯的生长提供了更多的保障。但玉米产量变化趋势有所不同,在生物质缓释土壤保水增肥剂施用量为60 kg/hm²时产量反而有所下降,当施用量增加至120 kg/hm²时产量有所上升,但增产率只有0.69%,影响玉米产量的因素可能是多方面的。根据本课题组玉米盆栽试验的结果,生物质缓释土壤保水增肥剂的施用对玉米的发芽、生长等都有非常显著的促进作用。而此处增产率的不同变化趋势可能是由于大田试验中地块面积较大,各地块所处位置、地势以及土壤组分会存在一定程度的差异性,从而影响产量。

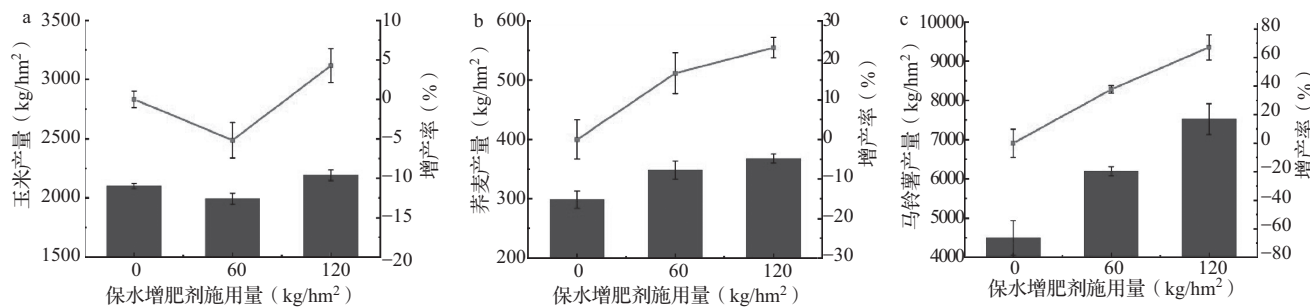
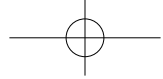


图5 不同生物质缓释土壤保水增肥剂用量对粮食作物产量的影响

3 结论

利用农业废弃秸秆制备的纤维素基生物质缓释土壤保水增肥剂能够显著降低沙质荒漠化土壤的pH,调节土壤容重和孔隙度,改善土壤的盐碱性和土壤结构。施用生物质缓释土壤保水增肥剂的土壤

电导率升高,矿物质元素含量增加,保水性能显著提升。在大面积试验田种植苏丹草、燕麦草等畜草作物与玉米、荞麦、马铃薯等粮食作物中发现,生物质缓释土壤保水增肥剂的使用对畜草和粮食作物能够起到有效的增产作用,对苏丹草和马铃薯的最高增产率分别达36.26%和77.78%。



参考文献:

- [1] David C. Millions of Chinese farmers reap benefits of huge crop experiment [J]. *Nature*, 2018, 3: 7.
- [2] 武良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016 (4): 76-83.
- [3] 刘强, 袁延飞, 刘一帆, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2022, 37 (10): 1005-1024.
- [4] 杨思楠, 赵萍, 陈永春, 等. 改性蛭石-蒙脱土对煤矸石充填复垦区镉污染土壤的修复 [J]. *环境化学*, 2020, 39 (10): 2777-2783.
- [5] 胡磊, 尹应武, 陈思瑞, 等. 秸秆制备拟羧甲基壳聚糖的吸水保水性能研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (3): 104-110.
- [6] 吴愉萍, 王明湖, 席杰君, 等. 不同农业废弃物生物炭及施用量对土壤 pH 值和保水保氮能力的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (1): 87-92.
- [7] 肖其亮, 熊丽萍, 彭华, 等. 不同基质组合对氮磷吸附能力的研究 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35 (5): 1277-1287.
- [8] Liu Z, Miao Y, Wang Z, et al. Synthesis and characterization of a novel super-absorbent based on chemically modified pulverized wheat straw and acrylic acid [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77 (1): 131-135.
- [9] 韩玉国, 武亨飞, 杨培岭, 等. 保水剂对土壤的物理性质与水分入渗的动态影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31 (5): 161-167.
- [10] 张涛, 刘松玉, 蔡国军. 固化粉土小应变剪切模量与强度增长相关性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (11): 1955-1964.
- [11] Hataf N, Ghadir P, Ranjbar N. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170 (1): 1493-1500.
- [12] Smith J, Abegaz A, Matthews R B, et al. What is the potential for biogas digesters to improve soil carbon sequestration in Sub-Saharan Africa? Comparison with other uses of organic residues [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2014, 70: 73-86.
- [13] Cai Z Q, Fu J, Du P H, et al. Reduction of nitrobenzene in aqueous and soil phases using carboxymethyl cellulose stabilized zero-valent iron nanoparticles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 332: 227-236.
- [14] 刘海林, 王龙宇, 林清火, 等. 保水缓释肥料保水性能及养分释放特性 [J]. *热带作物学报*, 2017, 38 (1): 33-37.
- [15] 吴大付, 杨雪芹, 王旭东, 等. 不同土壤结构改良剂处理的磷淋溶特性的研究 [J]. *土壤通报*, 2008 (5): 1102-1105.
- [16] Olad A, Zebhi H, Salari D, et al. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2018, 90 (1): 333-340.

Effects of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent on soil and crops in Yanchi county, Ningxia
WU Jin-long^{1, 2, 3}, LI Hao-qi^{1, 2, 3}, MA Feng-mao⁴, HAN Feng-lan^{1, 2, 3}, HUANG Jia-he^{1, 2, 3}, LIU Yan-hua⁵, SHAO Zi-qiang⁵, JIANG Cheng-yun⁶ (1. School of Materials Science & Engineering, North Minzu University, Yinchuan Ningxia 750021; 2. Key Laboratory of Polymer Materials and Manufacturing Technology, North Minzu University, Yinchuan Ningxia 750021; 3. International Scientific & Technological Cooperation Base of Industrial Waste Recycling and Advanced Materials, Yinchuan Ningxia 750021; 4. Yanchi Scientific Institute of Agriculture and Husbandry, Yanchi Ningxia 751500; 5. School of Materials Science & Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 6. Ningxia Ningdong Municipal Construction Development Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750409)

Abstract: To explore the effects of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent on farmland soil water and temperature environment, soil nutrient absorption and crop yield, field experiment was conducted in Yanchi county, Wuzhong city, Ningxia Hui Autonomous Region. Corn, potatoes, oats and other crops were selected as the test crop, and biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent were used as the test material. Different gradients of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent application rates were set up. Soil moisture content, pH, conductivity, bulk density and soil nutrients were measured, and their effects on soil physicochemical properties, soil nutrients and different crop yields in the experimental area were studied. The results showed that under different application rates, the overall yield of the crops were increased. The highest yield increase rates of Sudan grass and oat grass were 36.26% and 24.35%, respectively. The yield increase rate of buckwheat reached 23.19% when the application amount of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent was 120 kg/hm², while the yield increase rate of potato reached the highest of 77.78% when the application amount of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent was 120 kg/hm², indicating a significant increase in yield. But the trend of corn yield changes was different. When the application amount of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent was 60 kg/hm², the yield actually was decreased. When the application amount increased to 120 kg/hm², the yield was increased, but the yield increase rate was only 0.69%. This was mainly due to the differences in the location, terrain, and soil components of the plot, which resulted in little effect of the application amount of biomass slow-release soil water retaining and fertilizer increasing agent on corn yield.

Key words: carboxymethyl cellulose; crops; yield; soil properties; water retention and fertilization effect