

分类号：
学号：20232010036

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



生物炭和腐殖酸施加对滴灌棉田土壤质量和棉花生长的影响研究

学位申请人	黄田雨
指导教师	朱艳 副教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号：
学号：20232010036

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



生物炭和腐殖酸施加对滴灌棉田土壤质量和棉花生长的影响研究

学位申请人	黄田雨
指导教师	朱艳 副教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**A Study on the Effects of Biochar and Humic Acid Application on
Soil Quality and Cotton Growth in Drip-Irrigated Cotton Fields**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Huang Tianyu

(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Zhu Yan

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

黄田雨

时间：

2026年05月20日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

黄田雨

时间：

2026年05月20日

导师签名：

朱艳

时间：

2026年05月20日

摘要

目的: 新疆滴灌棉田土壤质量下降、盐分积累等问题,影响着棉花产量与农田可持续发展。生物炭与腐殖酸在改善土壤理化性质、提升作物产量品质方面具有明显潜力,但其在滴灌棉田中的施加量、施用方式及长期效应尚不明确。本研究通过 Meta 分析并结合田间试验,系统评估生物炭与腐殖酸对滴灌棉田土壤质量与棉花生长的综合影响,明确其调控效应及适宜施加模式。

方法: 本研究运用 Meta 分析,整合 2019-2024 年已发表的中英文文献,从改良剂种类、施加量及施加年限三个方面,定量阐述生物炭和腐殖酸对土壤理化生性质及作物产量的影响效应。在此基础上,于 2024-2025 年开展滴灌棉田田间试验,设置 0 (S)、20 (S1) 和 40 t/hm² (S2) 3 个生物炭施加水平和 0 (F)、75 (F1) 和 150 kg/hm² (F2) 3 个腐殖酸施加水平,进行完全组合试验,共设置 9 个处理,每个处理重复 3 次。分析生物炭和腐殖酸不同添加量和组合或单施对土壤三相、机稳性团聚体、养分、酶活性及棉花产量、品质的影响,并基于结合主成分分析和熵权-TOPSIS 等方法,对土壤质量指数 SQI、棉花产量品质、灌溉水利用效率及氮肥偏生产力等指标进行综合评价。

结果: (1) Meta 分析结果表明,施加生物炭和腐殖酸能够显著提高作物产量。施加量大于 40 t/hm² 和年限大于 4 年时增产效果最显著,产量增幅分别为 20.43%和 18.4%。生物炭和腐殖酸的施加量对土壤理化性质和养分状况的影响最大。施加量 0~20 t/hm² 显著提高了有效磷、碱解氮含量、脲酶及过氧化氢酶活性,增幅分别为 28.29%、10.01%、12.37%和 2.69%;施加量 20~40 t/hm² 提高土壤 pH 值 (3.77%) 和硝态氮含量 (47.85%);而施加量大于 40 t/hm² 显著降低容重 (8.66%),增加孔隙度 (15.75%)、全氮含量 (20.31%) 和有机质含量 (40.51%)。

(2) 2024-2025 两年田间试验结果表明,施加生物炭和腐殖酸显著提高了花铃期土壤质量含水率(15.05%~59.09%);降低电导率(2.54%~24.03%)。施加生物炭显著提高 MWD(3.17%~7.67%);施加腐殖酸显著降低 PAD (17.98%~42.61%);在配施处理下,提高 R_{>0.25mm} 机稳性团聚体含量 (3.40%~5.89%)、提高 GMD (1.21%~14.12%)、降低 D (1.73%~8.00%),显著提高 GSSI (2.58%~3.43%),提升 SQI (18.19%~53.88%)

(3) 施加生物炭和腐殖酸极显著提高了花铃期土壤全氮含量 (3.84%~10.21%) 和蕾期有机碳含量 (2.07%~17.44%)。生物炭和腐殖酸极显著的提高了蕾期酸性磷酸酶活性 (5.14%~31.57%)、吐絮期固氮酶活性 (2.09%~19.54%) 和花铃期蔗糖酶活性 (11.09%~22.02%),但在配施条件下,随施加量的增加土壤酶活性反而降低。

(4) 施加生物炭和腐殖酸极显著的提高了单株有效铃数 (3.14%~18.75%) 和百铃质量 (2.95%~35.22%);增加上半部平均长度 (0.99%~9.78%) 和马克隆值 (2.46%~19.67%)。基于熵权-TOPSIS 综合评价,生物炭施加量为 40 t/hm² 与腐殖酸施加量为 75 kg/hm²,是实现新疆滴灌棉

田土壤提质、棉花增产提质的最优组合模式。

结论：施加生物炭与腐殖酸可改善滴灌棉田土壤结构、提升保水保肥能力、增强酶活性，有效提升滴灌棉田土壤质量并促进棉花增产。明确了生物炭和腐殖酸的最佳施用策略、为北疆地区生物炭和腐殖酸农业应用提供了理论依据，为农田土壤改良提供了实践指导。

关键词：生物炭；腐殖酸；土壤质量指数；产量；品质

Abstract

Objective: Problems such as declining soil quality and salt accumulation in drip-irrigated cotton fields in Xinjiang are affecting cotton yields and the sustainable development of farmland. Biochar and humic acid show significant potential for improving soil physicochemical properties and enhancing crop yield and quality; however, their application rates, application methods and long-term effects in drip-irrigated cotton fields remain unclear. This study employs a meta-analysis combined with field trials to systematically evaluate the comprehensive effects of biochar and humic acid on soil quality and cotton growth in drip-irrigated cotton fields, with the aim of clarifying their regulatory effects and determining appropriate application regimes.

Methods: This study employed a meta-analysis to synthesise published Chinese and English literature from 2019 to 2024, quantitatively elucidating the effects of biochar and humic acid on soil physicochemical and biological properties as well as crop yields, based on three factors: type of amendment, application rate and duration of application. Building on this, field trials were conducted in drip-irrigated cotton fields from 2024 to 2025. A full factorial design was employed, with three biochar application rates (0 (S), 20 (S1) and 40 t/hm² (S2)) and three humic acid application rates (0 (F), 75 (F1) and 150 kg/hm² (F2)), resulting in a total of nine treatments. with each treatment replicated three times. The study analysed the effects of different application rates and combinations of biochar and humic acid, as well as their individual applications, on soil triphasic fractions, mechanostable aggregates, nutrients, enzyme activity, and cotton yield and quality. Furthermore, based on a combination of principal component analysis and entropy-weighted TOPSIS methods, a comprehensive evaluation was conducted of indicators including the Soil Quality Index (SQI), cotton yield and quality, irrigation water use efficiency, and nitrogen fertiliser productivity.

Results: (1) The results of the meta-analysis indicate that the application of biochar and humic acid can significantly increase crop yields. The most significant yield increases were observed when application rates exceeded 40 t/hm² and the duration of application exceeded four years, with yield increases of 20.43% and 18.4% respectively. The application rates of biochar and humic acid had the greatest impact on soil physicochemical properties and nutrient status. Application rates of 0–20 t/ hm² significantly increased available phosphorus, alkali-hydrolysable nitrogen content, urease and catalase activity, with increases of 28.29%, 10.01%, 12.37% and 2.69% respectively; application rates of 20–40 t/hm² increased soil pH (3.77%) and nitrate nitrogen content (47.85%); whereas application rates exceeding 40 t/hm² significantly reduced bulk density (8.66%), whilst increasing porosity (15.75%), total nitrogen content

(20.31%) and organic matter content (40.51%).

(2) Results from the 2024–2025 two-year field trials indicate that the application of biochar and humic acid significantly increased the soil moisture content during the flowering and bell stage (15.05%~9.09%) and reduced electrical conductivity (2.54%~24.03%). The application of biochar significantly increased MWD (3.17%~7.67%); the application of humic acid significantly reduced PAD (17.98%~42.61%); under combined application treatments, it increased the content of mechanically stable aggregates >0.25 mm (3.40%~5.89%), increased GMD (1.21%~14.12%), reduced D (1.73%~8.00%), significantly increased GSSI (2.58%~3.43%), and improved SQI (18.19%~53.88%).

(3) The application of biochar and humic acid significantly increased the total nitrogen content in the soil during the flowering and boughlet stage (3.84%~10.21%) and the organic carbon content during the budding stage (2.07%~17.44%). Biochar and humic acid significantly increased acid phosphatase activity during the budding stage (5.14%~31.57%) and nitrogenase activity during the boll-opening stage (2.09%~19.54%) and sucrase activity during the flowering and boll-forming stage (11.09%~22.02%); however, under combined application conditions, soil enzyme activity decreased as the application rate increased.

(4) The application of biochar and humic acid significantly increased the number of effective bolls per plant (3.14%~18.75%) and the weight of 100 bolls (2.95%~35.22%); it also increased the average length of the upper half of the boll (0.99%~9.78%) and the Macron value (2.46%~19.67%). Based on the entropy-weighted TOPSIS comprehensive evaluation, an application rate of 40 t/hm² of biochar combined with 75 kg/hm² of humic acid represents the optimal combination for improving soil quality and increasing cotton yield and quality in drip-irrigated cotton fields in Xinjiang.

Conclusion: The application of biochar and humic acid improves soil structure in drip-irrigated cotton fields, enhances water and nutrient retention capacity, and boosts enzyme activity, thereby effectively improving soil quality and promoting cotton yield increases. This study has identified the optimal application strategies for biochar and humic acid, providing a theoretical basis for their agricultural application in Northern Xinjiang and practical guidance for agricultural soil improvement.

Key words: Biochar; Humic Acid; Soil Quality Index; Yield; Quality

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究概况.....	3
1.2.1 土壤改良的研究进展.....	3
1.2.2 生物炭和腐殖酸对土壤理化生性质的研究.....	5
1.2.3 生物炭和腐殖酸对作物生长及产量品质的影响.....	6
1.3 研究目的与内容.....	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	7
1.4 技术路线图.....	7
第 2 章 试验材料与方法.....	9
2.1 Meta 分析.....	9
2.1.1 数据来源及筛选.....	9
2.1.2 数据分类与分组.....	10
2.1.3 数据处理与分析.....	10
2.1.4 增强回归树 BRT 模型分析.....	11
2.2 大田试验.....	11
2.2.1 试验地概况.....	11
2.2.2 试验方法与设计.....	12
2.2.3 指标检测与方法.....	14
2.3 数据统计和工具.....	17
第 3 章 基于 Meta 探究生物炭和腐殖酸对作物产量和土壤理化性质的影响.....	18
3.1 生物炭和腐殖酸对产量及各土壤指标的总体影响.....	18
3.2 分类变量对作物产量的影响.....	18
3.3 分类变量对土壤物理指标的影响.....	19
3.4 分类变量对土壤化学指标的影响.....	21
3.5 各分类变量对土壤生物指标的影响.....	23

3.6 产量、土壤指标效应因子贡献度分析	24
3.7 讨论	25
3.7.1 生物炭和腐殖酸对作物产量的影响	25
3.7.2 生物炭和腐殖酸对土壤理化生性质的影响	26
3.8 小结	27
第4章 生物炭与腐殖酸对土壤理化生指标的影响	28
4.1 生物炭和腐殖酸对土壤物理指标的影响	28
4.1.1 生物炭和腐殖酸对土壤质量含水率的影响	28
4.1.2 生物炭和腐殖酸对土壤电导率的影响	29
4.1.3 生物炭和腐殖酸对土壤机稳性团聚体结构分布和稳定性的影响	30
4.1.4 生物炭和腐殖酸对土壤三相指标的影响	34
4.2 生物炭和腐殖酸对土壤化学指标的影响	37
4.2.1 生物炭和腐殖酸对土壤全氮的影响	37
4.2.2 生物炭和腐殖酸对土壤有机碳的影响	39
4.3 生物炭和腐殖酸对土壤生物指标的影响	42
4.3.1 生物炭和腐殖酸对土壤酸性磷酸酶的影响	42
4.3.2 生物炭和腐殖酸对土壤固氮酶的影响	43
4.3.3 生物炭和腐殖酸对土壤蔗糖酶的影响	45
4.4 土壤质量指数 SQI	47
4.5 讨论	49
4.6 小结	52
第5章 生物炭和腐殖酸对棉花产量、品质的影响及综合评价	53
5.1 生物炭和腐殖酸对棉花产量指标的影响	53
5.2 生物炭和腐殖酸对棉花品质指标的影响	56
5.3 基于熵权-TOPSIS 对 SQI、产量、品质及水氮利用效率的综合评价	58
5.3.1 模型构建	58
5.3.2 评价指标及改良效果评价	60
5.4 讨论	61
5.5 小结	62
第6章 结论与展望	64
6.1 结论	64
6.2 展望	64
参考文献	66

致谢.....	76
作者简介.....	77

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

土壤质量是农业可持续发展的核心要素之一,它不仅直接决定作物的产量与品质,还深刻影响农业生态系统的稳定性与可持续利用水平^[1]。近年来,随着我国棉花产业格局的不断优化,新疆已成为全国最重要的优质长绒棉生产基地这对促进地区经济增长、改善农民生活质量方面发挥了不可替代的作用^[2]。然而,新疆地区独特的干旱气候条件和长期不合理的耕作措施叠加导致土壤问题日益凸显^[3],主要表现为耕层有机质含量偏低、团聚体结构脆弱等,严重制约着农田生产潜力的进一步提升^[3]。数据显示,新疆各种类型的盐碱土总面积达1336.1万 hm^2 ,占全国总盐碱化土壤面积的36.8%,是我国土壤盐碱化面积最大、种类最多的内陆型分布区^[6-7]。而土壤盐分过高会显著影响作物生长发育及土壤微生物活性;也会导致作物根系因渗透压失衡,难以有效吸收土壤中的水分和必需营养物质,进而影响作物产量品质^[7]。有研究表明土壤中大量复杂的离子成分会对作物及土壤健康产生不可逆的影响^[8]。Malik等^[9]发现,盐分胁迫显著降低了水稻干物质累积量,在较高盐胁迫水平下会显著降低超氧化物歧化酶、多酚过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶活性。Rodrigue等^[10]研究表明,盐胁迫会影响田间气体交换和降低玉米中矿物元素水平。土壤有机碳含量的下降与土壤质量退化之间存在密切关系^[11]。土壤有机质含量较低会减少土壤微生物生物量及其群落数量,从而导致各类酶活性显著降低^[12]。因此,通过实施有效的土壤修复措施提升土壤质量,有助于增加土壤有机碳含量,进而提高土壤生产力^[13]。

前人研究表明,施肥、耕作和灌溉等农田管理措施可通过改善土壤微环境、促进作物根系生长以及调节有机质的矿化与分解过程,从而改变土壤理化性质^[15-16]。膜下滴灌因可通过滴灌管直接将水分和肥料输送到作物根部,在减少地表水分蒸发的同时也有效提高了作物产量而在新疆地区得到广泛应用^[17]。然而,也有研究表明,滴灌土壤湿润范围相对较小,作物根系对湿润区以外的养分吸收利用差^[18]。在土壤含盐量较高的地区,盐分易在湿润区边缘富集,并可能随水分进入作物根区,对作物生长产生不利影响^[19]。且随着农业的大力发展,各类作物的长期连续种植以及化肥的大量施用,在提高作物产量的同时,也在一定程度上加剧了农田土壤退化,如土壤有机质含量显著下降、通气性变差、土壤结构易板结等,进而导致土壤有益微生物数量减少、病原菌比例增加,土传病害频发^[20]。土壤肥力降低对农业生产的限制愈加显著,研究如何通过土壤改良技术,降低土壤盐分、提高土壤质量,改善和提高作物的耐盐机制,将

对增加农民收入、保障重要农产品有效供，给保护生态安全等具有重要意义^[23]。

国内外学者就如何提高各类农田土壤质量已开展了大量科学研究和实践应用，并提出了一系列改良技术。对土壤质量提升主要体现在两个方面：一是通过科学的管理措施，维持土壤有机质及氮、磷、钾等关键营养元素，从而保障作物的基本生长需求^[23]；二是对土地投入生产材料，在补充土壤流失有益成分的同时，增强土壤对作物的供养能力^[24]。而土壤改良措施不仅要与土壤改良技术的发展相适应，更要与当地经济发展相匹配。我国作为农业大国，秸秆资源丰富，其在提高土壤肥力及作物产量方面具有显著潜力^[25]。已有学者研究发现，将秸秆等有机物在无氧或有氧条件下热解成的一种富碳的稳定性物质—生物炭^[26-27]，具有孔隙度高、比表面积大、吸附能力强等特性^[28-29]。有研究表明，添加生物炭能够改善土壤理化性质（如土壤 PH、孔隙度等）^[30]、增强土壤保水保肥能力^[14]，并促进土壤微生物群落的多样性^[31]。腐殖酸作为一种天然高分子有机物，是由土壤微生物分解和转化的复杂生物地球化学过程产生的^[32]。腐殖酸的施用对土壤养分供应有直接和间接的影响^[33]，在土壤中施加腐殖酸能增强多种土壤类型的养分吸收潜力和缓冲能力，改善土壤微生物多样性，从而有利于作物生长和产量^[35]。也有研究表明，腐殖酸作为土壤颗粒之间的胶结剂，可以促进土壤聚集体的形成，增强土壤结构稳定性^[36-37]。因此，施加物料既可以改善土壤的理化生性质，又可以降低因有机物料不当处理造成的影响，同时提高资源的使用效率，使土壤质量得到有效改善并显著提高作物产量，对改善生态环境具有重要意义。但施用生物炭和腐殖酸及不同施加量和施用年限对土壤指标及产量的影响各不相同。如 Li 等^[38]研究表明，10 t/hm² 生物炭处理棉花产量最高。邹瑞晗等^[39]研究表明，当生物炭施加量为 45 t/hm² 时，土壤质量指数和土壤中碳含量均达到最高。孔德庸等^[40]研究表明，化肥减量 20% 配施 67.5 kg/hm² 腐殖酸对土壤理化性质和微生物多样性改善效果最佳。Song 等^[34]发现施加腐殖酸 2a 后土壤 0~40 cm 土壤全碳和有机碳含量及储量均高于化肥处理 9%~40%。然而，前人研究多局限于单一区域、单一因素或短期试验，缺乏系统性评估，但这对科学合理应用生物炭和腐殖酸具有重要意义。

因此，本研究针对新疆地区农业生产中土壤质量下降等现实问题。首先，基于 Meta 分析，综合 2019-2024 年的相关文献，探究生物炭和腐殖酸对土壤性质的影响；同时进行滴灌田间试验，研究不同施加量和施加方式的生物炭和腐殖酸对棉田土壤理化性质及对棉花产量品质的影响，在此基础上，结合土壤质量指数 SQI、棉花产量品质指标，筛选出最优的施用策略寻求最优，以期新疆农田资源的合理利用和农业可持续发展提供一定的理论依据。本研究对提升新疆棉田地力、棉花增产提质具有重要理论和现实意义。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 土壤改良的研究进展

农田是人类赖以生存和发展的宝贵资源，是保障人类粮食安全和助力我国经济可持续发展的基石。据第3次全国国土调查，我国耕地总面积约 1.3×10^8 hm^2 ，占世界耕总面积的 8%^[41]，对人类文明发展具有无可替代的重要作用。随着农业新技术的推广和耕作制度的不断调整，我国耕地土壤质量在一定程度上得到改善的同时，也暴露出新的问题和挑战。以我国西北地区为例，耕地面积广阔但奇特的土壤质地及不合理耕作管理，导致农业资源利用效率低下，中低产田比例较高，进一步加剧了生态环境压力^[42]。因此，加强农田土壤质量提升对于缓解耕地生产压力、保障粮食安全和促进农业可持续发展具有重要意义。

国内外学者提出了许多有效的措施来调节土壤质量，按其原理大致可划分为：物理改良法、化学改良法、生物改良法和农业技术改良^[42,44]。物理措施主要包括换土、深耕晒垡、表面平整、深松等耕作等方法。该方法通常要破坏地表植被，适于耕作区或盐渍化较严重的地区，且只能短期改善表层盐碱土^[46]。刘洪光等^[47]研究发现，通过深度粉垄耕作，可降低 0~60 cm 土壤盐分和 pH 值，与常规耕作交替能够实现南疆重度盐碱棉田改良与增产增效协同。刘祖汀^[48]研究发现，春灌对研究区 0~100 cm 的盐碱地土壤均有淋洗效果，对 0~20 cm 土层的盐分淋洗效果最好，但随着土壤深度的增加土壤脱盐效果递减。其中，物理改良和水利措施如客土、营建排水、灌溉和淋洗系统等方法，虽对盐碱地改良可操作性强，但成本昂贵且调控效果受土壤质地、气象、水质等因素影响，不可持续，难以大面积推广应用^[49]。

化学改良主要是通过向土壤中加入改良物质，与土壤离子发生置换反应，使得耕层土壤容重下降，提高土壤孔隙度和透水性，进而改善土壤理化性质^[43]。常用的化学改良材料可分为无机改良剂和有机类改良剂两类^[50]。无机改良剂如石膏、脱硫石膏等类似物，这类改良剂通过增加土壤中钙离子含量，形成凝聚力较强的钙胶体，促进土壤团粒结构的形成，进而增加土壤孔隙度，减弱毛细管持水性，同时由于离子置换可以降低钠离子的毒害^[50]。张晓等^[51]发现，在黑土中加入沸石可增大土壤容重、微孔占比、减小土壤总孔隙度，但随着掺配比例的增加，可减弱冻融循环产生的负面效应，进而改善土壤性能。李明珠等^[52]发现，施加脱硫石膏改良剂可以降低土壤 pH 值、碱化度，提高土壤 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子含量，从而达到减轻盐碱地效果。但此类化学改良成本较高，长期施用可能会产生土壤环境安全隐患。有机类改良剂一般如有机物料、膨润土和有机肥等。高萌等^[53]研究发现，施用有机物料可以增加土壤中腐殖类物质和色

氨酸组分含量,提高了菠菜产量。Zhang 等^[54]研究发现,增施有机肥能显著促进盐碱地水稻生长,降低 Na^+ 、 Ca^{2+} 离子含量,提高土壤养分含量。吕轲彦等^[55]结果表明,将褐煤有机肥与脱硫石膏联合使用可以降低 0~20 cm 土壤 pH 和碱化度,提高土壤团聚体的稳定性。但化学改良剂成本昂贵且调控效果受土壤质地、气象、水质等因素影响,不可持续、难以大面积推广应用。

生物措施是通过在盐碱化土壤上直接或间接种植吸盐、耐盐的作物,从而起到吸收土壤盐分,减少耕层蒸发,改善土壤结构的作用^[55]。崔丽洋等^[56]研究发现,微藻具有较高的耐盐性,可降低可溶性盐分并保持土壤水分。Li 等^[57]分析发现,辣椒具有较高的耐盐性,在 150 mmol/L 的盐溶液灌溉下仍能维持正常生长,且随着盐分胁迫时间的延长,生长适应性也增强。Zhang^[58]等研究发现,种植冷季型草坪草和豆科牧草在不同程度上提高了南通滨海盐碱土的养分含量和微生物群落多样性,促进土壤中有机物质的分解和转化,减轻盐碱对作物的危害。Kong 等^[59]发现,丛枝菌根真菌可以促进番茄植株对氮素的吸收,提高番茄可溶性固形物、维生素 C 含量进而提高番茄品质。生物改良措施虽能从根源上优化盐碱土的理化性质,具有持久稳定、环境友好等优势。但该措施见效周期长、对水盐调控条件要求高,难以在短期内形成规模化效应。

农业技术改良主要是通过调节土壤中的水、肥、气、热等因素,逐步提升土壤肥力,进而增强土地生产能力^[58-61]。目前,秸秆还田和有机肥还田已逐渐成为重要的农业技术改良措施。李磊等^[60]研究发现,秸秆还田 2 年,增加了土壤大团聚体含量,提高了脲酶与碱性磷酸酶活性,从而增加油葵产量。申天澳等^[61]研究发现,秸秆深翻还田后,有效提高了土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质含量,降低了土壤 pH 并提高作物产量。Fan 等^[31]发现,盐碱土中加入玉米秸秆,增加了细菌、放线菌等菌群数量以及蛋白酶、淀粉酶和过氧化氢酶的活性。何家帅等^[62]研究发现,秸秆还田改善了 15~30 cm 的土壤结构,提高了 >2 mm 团聚体养分固持能力,小麦季产量显著提 23.03%。在秸秆还田的基础上添加生物炭可进一步改善土壤结构并提升地力,但其施用效果与生物炭施加量和施用年限成正相关。但 Wang 等^[63]发现,生物炭的施用较传统秸秆还田更具生态增益效应。其独特的理化性质不仅能提高土壤酶活性,促进微生物对养分的代谢,还能有效降低温室气体的排放。

新型技术虽旨在提高土壤质量的同时降低环境负荷,但单一改良剂因成本高、改良效果不稳定难以发挥长期效益及二次污染等问题,在实际中难以大范围。因此,探寻环境友好经济的有机改良剂,推进多改良剂协同施用,已成为提升土壤质量的重要方向。因此,本试验将在新疆滴灌棉田中施加棉花秸秆生物炭与腐殖酸,探究其对土壤性质的综合影响,以期干旱区土壤提质与农业可持续发展提供理论依据与技术支撑。

1.2.2 生物炭和腐殖酸对土壤理化生性质的研究

生物炭是秸秆等生物质在厌氧或无氧条件下经过高温热解产生的一种具有高稳定性、强吸附性的富碳固态产物^[62-63]。Ahmad 等^[64]研究发现,在山地苹果园施加生物炭后,提高了土壤中矿物养分储存量、促进植物对养分吸收。研究表明,施加生物炭可提高土壤含水率和孔隙度、降低容重^[65],改善土壤中有机质、碱解氮、速效磷含量,进而提高土壤微生物活性^[14,66]。王小芳等^[67]发现,施加生物炭可有效降低土壤盐分的累积,当施用量为 10~25 t/hm² 时,脱盐率可达 14.7%~22.3%。Li 等^[68]通过 Meta 分析发现,施用生物炭提高了土壤 pH 和阳离子交换量,改善土壤团聚性和孔隙度。李夏雯等^[69]认为,生物炭和腐殖酸能够有效改善土壤物理性状,促进早直播稻氮素吸收,当生物炭和腐殖酸配施时,可显著降低早播稻田土壤氮素迁移风险。也有研究表明,土壤团聚体稳定性的下降代表着土壤潜在可蚀性增长及土壤肥力水平下降^[70]。邹瑞晗等^[71]研究表明,施加生物炭可以提高 0~40 cm 土层中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和团聚体结合态有机碳,但过量施加生物炭反而会降低土壤结构的稳定性。李红宇^[72]研究发现,生物炭年还田量为 7.5~12.0 t/hm² 时,土壤有机质含量、腐殖质全碳量较对照处理均显著提高。生物炭还可增强土壤水分和养分保持,抑制植物病害,减少温室气体排放^[73]。吴丹等^[74]研究发现,在滨海盐碱土中施加生物炭对土壤营养物质含量及结构的长期稳定性产生了正效应,对土壤盐碱含量产生了负效应。Farooqi 等^[75]试验表明,施加改良剂均提高了非盐碱化土壤和盐碱化土壤的有机碳含量和作物产量,但生物炭对土壤改良效果和温室气体减排效果最佳。

腐殖酸是动植物遗骸经过微生物的分解和转化以及地球化学的一系列过程形成和积累起来的一类大分子有机物质^[76]。腐殖酸作为改良剂可提高土壤孔隙度,促进作物对土壤中养分及水分的利用^[78]。Guo 等^[78]发现,添加 3%腐植酸可以提高夏玉米产量和氮肥利用率,减少 N₂O 的累计排放量。王宏杰等^[79]研究发现,配施腐殖酸促进了土壤细菌群落和真菌群落活性,增加了物种数量和丰富度,改善了北疆棉田土壤细菌和真菌的群落结构。黄家怡等^[80]研究表明,在氮磷减量 20%的基础上,配施腐殖酸能显著提高土壤有效磷和土壤碱解氮含量。也有研究表明,腐殖酸的施用年限也对土壤理化性质存在有影响^[81]。Song 等^[34]发现,施加腐殖酸 2a 后土壤 0~40 cm 土壤全碳和有机碳含量及储量均高于化肥处理 9%~40%。

综上,生物炭可提高土壤碳氮比,提高土壤养分含量。而腐殖酸自身含有丰富的活性基团,不仅能释放自身养分,还可通过吸附、胶结作用改善土壤结构。在土壤中施用生物炭和腐殖酸均可对土壤理化生性质产生重要影响,但不同的施加量、施加方式等因素对新疆地区土壤的影响缺乏一定的规律。