

不同灌溉方式下施用生物炭对 土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响

贾咏霖¹, 屈忠义^{1*}, 丁艳宏², 杨威¹, 马贵仁¹, 李争争¹

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】研究不同灌溉方式下生物炭对土壤水盐运移特征、作物生长及水分利用效率的中长期综合影响效应, 推荐适宜的灌溉方式和生物炭用量, 为内蒙古河套灌区农田水资源高效利用及盐碱化耕地治理提供理论依据和技术支撑。【方法】以灌溉方式、玉米秸秆生物炭用量为二因素, 设计完全随机区组田间小区试验, 共设置6个处理, 其中灌溉方式为地下水滴灌、地下水畦灌、黄河水畦灌, 生物炭用量为0、30 t/hm²。生物炭在2016年玉米播种前施入土壤表面并通过旋耕机混入土壤耕层, 2017年和2018年不再施用生物炭。2018年玉米生长季考察并分析不同灌溉条件-生物炭耦合处理下的土壤水分动态、降盐效果、玉米产量、蒸散量和水分利用效率。【结果】地下水滴灌条件下, 与未施加生物炭的处理相比, 施加生物炭的脱盐量增加13.3%, 作物蒸散量提高10.5%, 水分利用效率6.0%, 产量提高3.5%。而畦灌条件下, 施用生物炭的脱盐量增加5.0%, 蒸散量提高1.3%, 产量提高4.8%, 水分利用效率增加3.1%。【结论】生物炭施用后的第3年仍能抑制不同灌溉方式下玉米农田0~100 cm土壤的盐分积累, 提高作物水分利用效率, 增加作物产量, 相比而言, 膜下滴灌下施用30 t/hm²的生物炭的节水降盐增产效果更优。

关键词: 不同灌溉条件; 生物炭; 中长期效应; 脱盐量; 土壤水分; 产量构成要素

中图分类号: S156.2; S152.7+1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020150

贾咏霖, 屈忠义, 丁艳宏, 等. 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤水盐运移规律及玉米水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 44-51.

JIA Yonglin, QU Zhongyi, DING Yanhong, et al. The Effects of Soil Amendment with Straw Biochar on Water and Salt Dynamics as Well as Water Use Efficiency of Corn under Different Irrigations [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 44-51.

0 引言

【研究意义】水资源是维持生态系统的基本要素, 同时也是支撑人类社会发展的关键战略资源^[1]。我国西北干旱区面积占全国面积24.5%, 但水资源仅占全国5%左右, 农业一直面临严峻的水资源短缺问题。内蒙古河套灌区是我中国的粮食主产区, 为保障我国的粮食安全做出了重要贡献。然而该区土壤蒸发强烈, 土壤盐碱化问题严重, 且灌溉水利用效率较低^[2]。灌区目前主要依靠黄河水进行漫灌和畦灌, 这种灌溉方式尽管能有效减轻土壤盐碱化问题^[3], 但灌水量较大, 农田水分利用效率较低, 水资源浪费严重^[4]。滴灌是

河套灌区目前广泛推广应用的节水灌溉方式, 其不仅能提高作物水分利用效率和产量, 同时也能改变土壤水盐运移规律^[5-6]。减轻土壤盐碱化程度、提高农田水分利用效率。【研究进展】生物炭是由植物生物质在高温缺氧条件下裂解碳化而成的一种土壤改良剂^[7]。已有研究表明, 生物炭不仅能改变土壤理化性质^[8], 同时还具有较好的固碳节肥能力^[9-10]。生物炭具有的多孔结构及较大表面积使得其具有较强的阳离子交换能力^[11], 应用生物炭对盐渍土进行改良, 对有效缓解土壤含盐量积累, 减少盐胁迫对作物生长的不利影响^[12-13]。国内外学者也对施加生物炭条件下土壤盐分、水分运动进行了大量研究。朱成立等^[14]在滨海垦区研究畦灌条件下咸淡交替灌溉对土壤盐分分布时发现, 生物炭可以促进玉米光合作用、减轻水分胁迫、避免离子毒害, 最终提高产量和收获指数。岳燕等^[15]在通过土柱模拟畦灌条件下施加生物炭对土壤盐分淋洗作用时, 发现施加生物炭可提高土壤洗盐效率, 将电

收稿日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779117)

作者简介: 贾咏霖(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水理论与农田水土环境效应研究。E-mail: 65151436@qq.com

通信作者: 屈忠义(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水理论与农田水土环境效应研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

导率淋洗至 5 mS/cm 的时间缩短了 41~100 d。也有研究表明, 施加生物炭可提高土壤蓄水持水能力^[16], 显著提高沙土土壤有效含水率, 减少黏土有效含水率^[17]。安艳等^[18]、李昌见等^[19]研究表明, 在地下水滴灌条件下施加生物炭可有效提高土壤团聚体的吸湿系数, 增加了土壤总孔隙度和田间持水率。岑瑞等^[20]研究发现, 黏土中施加生物炭 30 t/hm² 时土壤含水率增加 9%、累积入渗量增加 45.5%。魏永霞等^[21]通过野外大田试验发现施加生物炭可提高土壤持水保水能力, 土壤含水率提高 7.1%~14.5%, 随着施碳年限越长, 其效果越弱。综上所述, 施加生物炭不仅可以减低土壤含盐量, 加快盐分淋洗, 同时也可以有效提高土壤持水保水、土壤入渗能力。【切入点】目前河套灌区针对土壤水盐运移规律的研究主要集中在不同覆膜方式、节水灌溉等方面, 对比不同灌溉方式下水盐运移规律的研究较少, 针对不同灌溉条件下单次施加生物炭对土壤水盐运移特征及作物水分利用效率的中长期综合影响效应尚不清楚。【拟解决的关键问题】本文旨在研究不同灌溉方式下, 秸秆生物炭添加对土壤水盐运动规律的中长期影响效应, 提出生物炭田间应用参数, 为河套灌区水资源高效利用及盐碱化耕地生态治理提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016—2018 年每年 5—10 月在内蒙古河套灌区临河区双河镇进步村九庄农业合作社 (107°18'E, 40°41'N, 海拔 1 042 m) 进行。该地属于中温带半干旱大陆性气候, 云雾少、日照充足、降水量少、风大气候干燥。多年年均降水量 140 mm 左右, 年平均气温 6.8 °C, 平均日照时间 3 229.9 h, 无霜期 130 d 左右。经计算^[22], 玉米生育期蒸散量为 891.3 mm, 非生育期蒸散量 457.8 mm。生育期降雨量 126.6 mm, 非生育期降雨量 23.4 mm。生育期地下水平均埋深为 3.04 m。试验地地势东高西低, 地面坡降 1/6 000。供试土壤为砂壤土 (0~60 cm), 基本理化性质见表 1。

1.2 试验材料

生物炭来源于辽宁金和福农业开发有限公司, 采用玉米秸秆为原料, 在 450 °C 无氧条件烧制而成 (粒径 1.5~2.0 mm), 其基本理化性质见表 1。

1.3 小区试验设计

以灌溉方式、玉米秸秆生物炭用量为二因素进行完全随机区组小区试验设计, 其中灌溉方式为地下水滴灌、地下水畦灌、黄河水畦灌, 生物炭用量为 0、30 t/hm², 共设置 6 个处理: 地下水滴灌处理 (D)、

黄河水畦灌处理 (H)、地下水畦灌处理 (J)、地下水滴灌+生物炭处理 (DB)、黄河水畦灌+生物炭处理 (HB)、地下水畦灌+生物炭处理 (JB)。每个处理设置 3 个重复, 共 18 个试验小区, 每个小区面积 90 m² (15 m×6 m)。2016 年 4 月将生物炭均匀撒施于土壤表层, 而后用旋耕机将生物炭与耕层 20 cm 土壤均匀混合, 2017 年和 2018 年不再重复施加生物炭。

表 1 土壤、生物炭的基本理化性质

项目 Project	砂壤土 Sandy loam	生物炭 Biochar
体积质量 Bulk Density /(g·cm ⁻³)	1.39	0.59
pH 值	8.5	9.1
电导率 EC/(μS·cm ⁻¹)	318.5	/
有机质量 Organic matter/(mg·kg ⁻¹)	14.47	9.26
碱解氮量 Alkeline-N/(mg·kg ⁻¹)	14.47	159.15
有效磷量 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	5.3	394.18
速效钾量 Olsen-K/(mg·kg ⁻¹)	184	783.98
碳质量分数 C mass fraction/(g·kg ⁻¹)	/	47.17
氮质量分数 N mass fraction/(g·kg ⁻¹)	/	0.71
氢质量分数 H mass fraction/(g·kg ⁻¹)	/	3.83
碳氮比 C/N/%	/	67.03

表 2 灌溉水的水质状况

项目	地下水 Groundwater	黄河水 Yellow river water
Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	70.1	70.1
Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	72.9	79
Na ⁺ +K ⁺ /(mg·L ⁻¹)	150.3	37.5
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	159.5	106.4
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	216.1	264.2
CO ₃ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	0	0
HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	396.6	183.1
pH 值	8	8.76
全盐量/(g·L ⁻¹)	1.07	0.74

供试玉米品种为西蒙 6 号, 种植的株距为 30 cm, 行距为 60 cm, 密度为 56 667 株/hm²。播种前基施磷酸二铵(N 质量分数 18%, P 质量分数 46%) 450 kg/hm², 氮磷钾复合肥 (N 质量分数 15%, P 质量分数 15%, K 质量分数 15%) 337.5 kg/hm²。拔节期前、中、后期追肥 3 次, 抽雄期 1 次, 灌浆期 1 次, 每次追尿素 (N 质量分数 46%) 75 kg/hm², 共追施尿素 375 kg/hm²。膜下滴灌的水源为黄河水, 滴灌带为内镶片式滴灌带, 管径 16 mm, 滴头流量 1.38 L/h, 滴头间距 0.3 m。滴灌带铺设于地膜中间, 每条滴灌带控制 2 行玉米。通过埋于膜内滴头正下方 20 cm 处的张力计控制灌溉,

灌水下限-25 kPa, 灌溉定额 $270 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。分别于 2018 年 5 月 30 日 (150 d)、6 月 27 日 (178 d)、8 月 6 日 (218 d) 进行灌溉黄河水畦灌、黄河水滴灌, 共灌溉 3 次, 灌溉量均参照当地农业灌溉实际情况, 滴灌单次灌水 22.5 mm, 畦灌单次灌水 100 mm。

1.4 样品采集与数据分析

2018 年玉米生长季每隔 10~15 d, 使用土钻分别在膜上(滴头正下方位置)、膜中(距滴头 17.5 cm 处)、膜间(距滴头 35 cm 处)、膜外(距滴头 60 cm 处) 4 个位置进行土壤取样(图 1), 其中 0~40 cm 土层每 10 cm 采集 1 次, 40~100 cm 土层每 20 cm 采集 1 次, 每个处理重复 3 次, 每次共取 1 512 个土样(6 个处理 \times 3 个重复 \times 4 个取样点 \times 7 层)。取回的土壤样品分成二部分, 一部分通过烘干法测定土壤含水率, 另一部经自然风干后研磨过筛(2 mm), 使用便携式全自动电导率分析系统(DS-307, 上海霖诺环保科技有限公司)测定土壤浸提液的电导率根据土壤含盐量与电导率的经验转换公式 $S=0.349 \times EC_{1:5}$, 估算土壤全盐量^[23]。并在试验过程中监测与分析土壤的水盐平衡状况, 计算脱盐率和作物水分利用效率, 各指标的计算公式如下:

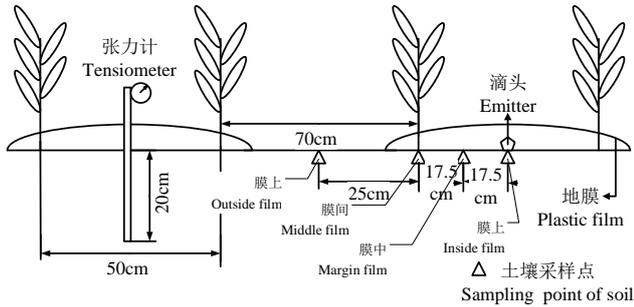


图 1 土壤水盐取样位置示

Fig.1 Soil water-salt sampling points

1) 盐分平衡分析

对 1 m 土层进行盐分平衡分析是土壤盐分累积分析的重要方法, 根据不同取样点进行加权平均计算^[24], 公式如下:

$$S = \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^n (S_{xy} \cdot L_y \cdot h_x \cdot 1.2^{-1}) \cdot 10000 \cdot \gamma_x, \quad (1)$$

式中: S 为盐分总量 (kg/hm^2); S_{xy} 为土壤取样点含盐量 (g/kg); L_y 为取样控制土层宽度 (m); h_x 为取样点土层厚度 (m); γ_x 为相应点土壤体积质量 (g/cm^3), i 为计算深度内取样层数; n 为控制宽度 1.2 m。

2) 脱盐率

$$RSDR = (S_2 - S_1) / S_1, \quad (2)$$

式中: $RSDR$ 为脱盐率 (%), $RSDR$ 为正值时表示土层盐分增加, 脱盐率为负值时表示土层盐分减少, S_1 为 2016 年播种前土层盐分初始值 (kg/hm^2), S_2 为 2018

年对应土层秋收后含盐量 (kg/hm^2)。

3) 土壤贮水量

$$H = \sum_{i=1}^n (\Delta \theta_i \cdot C_i \cdot Z_i), \quad (3)$$

式中: H 为土壤贮水量; $\Delta \theta_i$ 为土层 i 的土壤质量含水率 (%); C_i 为土层 i 的土层体积质量 (g/cm^3); Z_i 为土层 i 厚度 (mm)。

4) 作物生育期耗水量

$$ET_c = P + I + K + RO - D + \Delta H, \quad (4)$$

式中: P 为作物全生育期的降雨量 (mm); I 为作物生育期的灌溉定额 (mm); K 为地下水补给量 (mm); RO 为地表径流 (mm), 因为试验用地平整, 故不考虑地表径流; D 为深层渗漏量 (mm), 其中地表滴灌, 每次灌水量较少, 顾不考虑深层渗漏量; 畦灌深层渗漏量经计算为 11.23 mm, ΔH 为 0~100 cm 土壤剖面贮水量变化量 (mm)。

5) 玉米水分利用效率及灌溉水分利用效率

$$WUE = Y / ET_c, \quad (5)$$

式中: WUE 为水分利用效率 (kg/m^3); Y 为玉米籽粒产量 (kg/hm^2); ET_c 为玉米全生育期的耗水量 (m^3/hm^2)。

$$IWUE = Y / I, \quad (6)$$

式中: $IWUE$ 为灌溉水分利用效率 (kg/m^3); Y 为玉米籽粒产量 (kg/hm^2); I 为玉米全生育期的灌溉水量 (m^3/hm^2)。

6) 收获指数

$$HI = Y / DB, \quad (7)$$

式中: HI 为收获指数; Y 为玉米籽粒产量 (kg/hm^2); DB 为玉米全生育期的干物质累积量 (kg/hm^2)。

1.5 数据处理方法

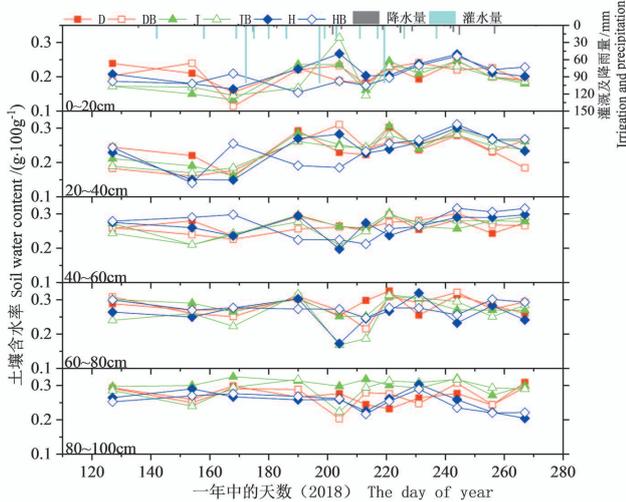
采用 Microsoft Excel 2016 软件对原始观测数据进行整理与分析, 使用 Origin 9.1 和 Sufer 12.0 软件绘图, 利用 SPSS 20.0 对整理的数据进行二因素方差分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤水分时空动态变化规律

不同观测日期 0~100 cm 土层土壤含水率动态变化规律如图 2 和图 3 (注: 箱线图中箱体上黑线表示均值, 黑点表示特异质, 箱体代表 75%~25%, 误差线代表最大值和最小值) 所示。从图 2 可以看出, 不同灌溉方式下土壤含水率变化规律不同, 在不施用生物炭的条件下, 生育前期表层地下水滴灌处理 (D) 的土壤含水率明显高于地下水畦灌 (J) 和黄河水畦灌处理 (H), 在生育中后期滴灌处理与畦灌处理含水率变化趋势相近, 整体趋于平稳状态。相同灌溉条件

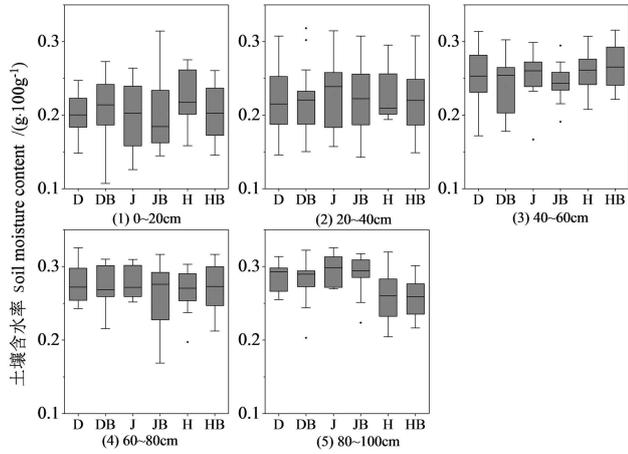
下,生物炭处理的土壤含水率整体上高于未施用生物炭的空白对照小区。继续分析发现(图3),不同灌溉方式下,生物炭处理施用后0~20、60~80 cm的土壤含水率波动范围明显高于未施加生物炭处理,20~60 cm土层施加生物炭处理的土壤含水率变化范围与未施加生物炭处理的基本相同,而80~100 cm土层各处理的土壤含水率波动范围较小。



注: 图中含水率为由膜上、膜中、膜间、膜外四点位置算数平均值

图2 不同处理下0~100 cm土壤含水率动态

Fig.2 Dynamic of soil moisture content of 0~100 cm under different treatment



注: 箱线图中箱体上黑线表示均值, 黑点表示特异质, 箱体代表75%~25%, 误差线代表最大值和最小值

图3 2018年不同处理下全生育期0~100 cm土壤含水率箱线图

Fig.3 Results of 0~100 cm soil water content in the whole growth period under different treatment

2.2 土壤盐分运移规律

玉米收获期不同灌溉条件下土壤盐分分布情况如图4所示。由图4可知,在相同灌溉方式下,施加生物炭处理的小区较未施加生物炭的小区更能减少0~100 cm的盐分累积。地下水滴灌方式下, DB处理积盐主要集中在膜外位置, D处理盐分主要集中在膜上距滴头60 cm处和膜外表层土壤。地下水畦灌处理, JB处理的含盐量变化较小, J处理盐分主要集中在膜间

位置50 cm处。黄河水畦灌处理, HB处理剖面盐分小于90.7 g/kg, H处理的盐分在滴头正下方60 cm处达到最大值。畦灌条件下土壤盐分分布较为均匀,而地下水滴灌处理盐分主要集中于膜外及膜间位置,这主要是因为地下水滴灌处理单次灌水量较小,单次灌水入渗区域在0~30 cm土层,无法均匀将盐分淋洗至深层土壤。

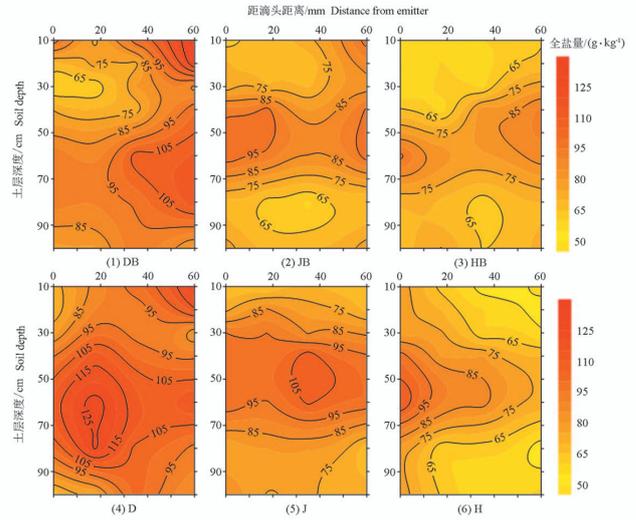


图4 不同处理下生育末期0~100 cm土壤全盐含量(g/kg)

Fig.4 Total salt content in 0~100 cm soil at the end of growing stage under different treatment

对根系主要集中的0~40 cm土层及0~100 cm盐分较2016年改变量进行进一步统计分析(表3),发现不同处理0~40 cm土层盐分的改变量相差较大(31.5~345.2 kg/hm²),脱盐效果存在显著差异(3.1%~33.6%)。不同灌溉方式下,施加生物炭处理0~40 cm和0~100 cm的脱盐率明显小于未施加生物炭处理,其中地下水滴灌+生物炭处理降盐效果最优,其次为地下水畦灌+生物炭处理,黄河水畦灌+生物炭处理的脱盐效果最差。进一步分析发现,地下水滴灌条件下土壤施用生物炭的相对脱盐率(0~100 cm)比地下水畦灌、黄河水畦灌下施用生物炭处理高出1.24倍和3.30倍。

图5为0~40 cm及0~100 cm各处理膜内、膜中、膜间、膜外盐分较2016年改变量。0~40 cm土层不同灌溉方式下生物炭处理对不同取样位置土壤盐分的影响规律存在差异, D处理在膜上、膜中、膜间、膜外位置的积盐量分别比DB处理少158.3、1263.4、776.2、-499.7 kg/hm², JB处理在膜上、膜中、膜间、膜外位置的积盐量分别比J处理少481.9、523.9、719.6、-692.1 kg/hm², 其中在膜上、膜中、膜间位置差异显著。HB处理在膜上、膜中、膜间、膜外位置的积盐量分别比H处理少1036.7、709.9、-87.3、-903.9 kg/hm², 其中在膜上、膜中、膜外位置较H处理差异显著。不

同灌溉处理中,滴灌处理盐分累积主要集中在膜外位置,盐分从膜外向膜上位置逐渐减少。地下水畦灌处理盐分累积量较小,盐分分布较稳平均,而黄河水畦灌处理整体上呈脱盐状态。

表3 不同处理下0~40和0~100 cm土层盐分的改变量及脱盐率计算

Table 3 Calculation of salinity change and desalination rate in 0~40 and 0~100 cm soil layers under different treatment

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatments	土层含盐量/(kg·hm ⁻²) Salinity			脱盐率/% Rate of desalination	相对脱盐率/% Relative desalination rate
		初始值 Initial	生育期末值 End of growing stage	改变量 Change amount		
0~40	DB	1 028.43	1 293.42	264.99	25.77 b	-7.80
	D	1 028.43	1 373.67	345.24	33.57 a	
	JB	1 028.43	1 292.01	263.58	25.63 b	22.56
	J	1 028.43	1 059.97	31.54	3.07 d	
	HB	1 028.43	1 227.73	199.30	19.38 c	0.53
	H	1 028.43	1 222.28	193.85	18.85 c	
0~100	DB	1 094.52	1 268.98	174.46	15.94 b	-11.43
	D	1 094.52	1 394.12	299.60	27.37 a	
	JB	1 094.52	1 080.42	-14.10	-1.29 d	-7.91
	J	1 094.52	1 167.03	72.51	6.62 c	
	HB	1 094.52	987.09	-107.43	-9.82 e	1.55
	H	1 094.52	970.12	-124.40	-11.37 f	

注 表中大小写字母不同表示同一生育期不同处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平(下同); 土层含盐量初始值为2016年本底值。总含盐量由膜上、膜中、膜间、膜外四点位置加权平均值。

Note: Different letters in the table indicated that the difference between different treatments in the same growth period reached the significant level of $P<0.05$ (the same below). The initial value of soil salt content is the background value of 2016. The total salt content was weighted by the four points: above, in, between and outside the membrane.

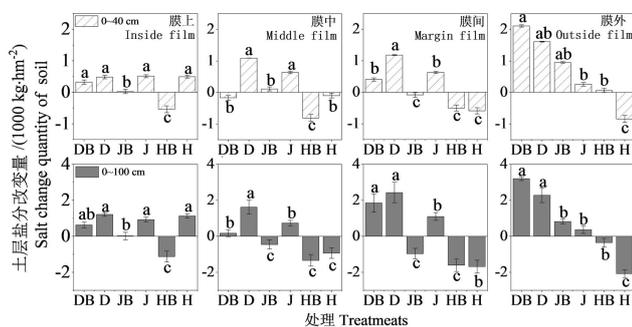


图5 不同处理下0~40 cm和0~100 cm土层剖面脱盐量

Fig.5 Desalination of 0~40 cm and 0~100 cm soil profiles under different treatments

2.3 玉米产量性状与水分利用效率

由灌水量、蒸散量、产量及产量构成要素推算水分利用效率、灌溉水分利用效率及收获指数如表4所示。不同灌溉方式下施加生物炭与未施加生物炭处理的作物蒸散量没有显著差异。地下水滴灌、黄河水畦灌条件下施加生物炭与未施加生物炭处理水分利用效率、灌溉水利用效率差异显著。作物产量在施加生物炭与未施加生物炭处理间差异不显著,但是地下水滴灌条件下产量显著高于未施加生物炭处理。而产量构成由百粒质量及穗粒数共同决定,不同处理间百粒质量差异不显著,而滴灌处理穗粒数显著高于畦灌处理。干物质质量除黄河水畦灌条件下施加生物炭处理与未施加生物炭处理无显著差异外,地下水滴灌、地下

水畦灌条件下均表现出显著差异。不同灌溉方式下,滴灌处理较畦灌处理可减少蒸散量的同时提高水分利用效率及灌溉水利用效率,减少水资源的浪费。同时由于滴灌处理少量高频的灌溉方式,使得其产量显著高于畦灌处理。

3 讨论

3.1 不同灌溉方式下施加生物炭对作物水分利用效率的影响

施用生物炭可明显提高土壤含水率,有利于增加土壤储水量。本研究运用水量平衡方程对作物耗水量进行分析,发现施加生物炭有效减少地下水滴灌条件下土壤蒸散量,这是因为施加生物炭增加了土壤孔隙度,使得土壤水分更多地被生物炭吸附留存在土体中,从而减少了土壤无效蒸散量,提高了土壤储水量,可被作物利用的有效水增加,这与魏永霞等^[25]研究结果一致。畦灌条件单次灌水量大,灌水间隔时长,表层土壤含水率变化较小,使得畦灌条件下施加生物炭处理与未施加生物炭处理土壤蒸散量差异较小。各灌溉方式下灌水量相同,产量直接影响灌溉水利用效率。滴灌处理显著增加了作物产量,这主要由于穗粒数增加显著,少量高频的灌溉模式可以使土壤保持相对稳定的含水率,在玉米需水量较大的抽雄期很好的保障了土壤水分供应,从而进一步促进作物了生长,充足

的花粉及伸展的花丝最终导致了玉米秃尖长的减少及穗粒数的增加^[26]。地下水滴灌条件下施加生物炭可有效减少土壤蒸散量, 增加作物产量, 从而提高水分利用效率及灌溉水利用效率。

3.2 不同灌溉方式下施用生物炭对土壤盐分运移的中长期影响

研究表明, 盐分胁迫是影响作物正常生长的主要因素之一^[27], 生物炭独特孔隙结构、较大的氧化表面积使得其具有较强的吸附能力^[28]、通过促进土壤矿物复合体形成以提高土壤团聚体^[21], 生物炭施用多年后对土壤盐分的减少主要有以下 2 个原因: ①生物炭本身含有大量的可溶性阳离子, 大量的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子交换了盐渍化土壤胶体吸附的 Na^+ 离子^[29], 同时大量的可溶性阳离子作为作物矿物来源的一部分被植物吸收利用^[30]。②由于生物炭自身含有大量有机质, 施入土壤后有效改善了土壤物理化学性质, 增加有机质量, 进而直接参与土壤形成、改变土壤吸水吸肥过程, 促进土壤团聚体的形成^[31], 降低土壤体积质量, 改变土壤持水性, 在生物炭处理中土壤体积质量小、孔隙度大, 促进土壤水分运动, 所以盐分更容易

被淋洗到土壤下层。本试验研究发现, 地下水滴灌条件下施加生物炭处理 3 a 后土壤盐分显著低于未施加生物炭处理, 滴灌处理少量高频的灌水方式使得深层渗漏量减少, 地下水无法得到及时补充, 单次灌水也未能充分将盐分淋洗到深层土壤, 使得在滴灌条件下盐分主要被截留在 40~80 cm 土层, 而在施加生物炭处理中由于生物炭具有多孔结构及较大表面积等物理特性, 使得土壤孔隙度增加, 更有益于盐分运移^[32]。畦灌处理单次灌水量大、灌水次数少、灌水间隔长, 充足的水分使得盐分被淋洗到土壤深层, 土壤体积质量增加、孔隙度降低、土壤透气性变差。黄河水畦灌降盐量明显地下水畦灌, 这是因为地下水盐分较高, 使得盐分不能被充分淋洗到深层土壤。同时畦灌条件下施加生物炭处理较未施加生物炭处理有显著差异, 地下水畦灌处理中, 施加生物炭处理较表现为脱盐效果, 而未施加生物炭处理则表现为积盐效果; 黄河水畦灌处理中施加生物炭处理与未施加生物炭处理均表现出脱盐效果, 但未施加生物炭处理脱盐量显著高于施加生物炭处理。

表 4 不同处理下玉米产量构成要素和水分利用效率

Table4 Yield components and water use efficiency of maize under different treatments

处理 Treatments	蒸散量 ET/mm Evapotranspiration	百粒质量/g 100-grain weight	穗粒数 Number of grain	干物质量/(t·hm ⁻²) Dry biomass	产量/ (t·hm ⁻²) Yield	水分利用效率 $WUE/ (kg·m^{-3})$	灌溉水利用效率 $IWUE/ (kg·m^{-3})$	收获指数 Harvest index
DB	452.04 b	38.40 a	714.67 a	39.21 a	14.75 a	3.01 a	5.76 a	0.40 c
D	499.29 ab	36.52 a	684.89 a	24.67 c	14.23 a	2.84 b	5.25 ab	0.57 a
JB	520.76 a	36.80 a	628.27 b	27.56 c	13.09 b	2.62 c	4.33 c	0.48 b
J	513.54 a	37.29 a	619.73 b	32.43 b	13.10 b	2.67 c	4.37 c	0.40 c
HB	518.96 a	38.36 a	676.00 a	33.92 b	13.71 b	2.63 b	4.90 b	0.43 c
H	515.50 a	36.47 a	600.82 b	29.64 bc	12.41 c	2.41 c	4.14 c	0.42 c

4 结论

1) 滴灌方式下施用生物炭的节水增产效果最为显著, 其蒸散量分别比滴灌处理和畦灌处理降低 47.3、41.5 mm, 水分利用效率分别提高 0.2 和 0.3 kg/m^3 , 灌溉水利用效率分别提高 0.5 和 1.1 kg/m^3 。

2) 地下水滴灌+生物炭处理的脱盐效果最优 (11.43%), 黄河水畦灌+生物炭处理的脱盐效果最差 (7.91%), 地下水畦灌+生物炭处理的脱盐效果居中 (-1.55%)。其中地下水滴灌处理盐分主要集中在膜外 40 cm 处, 而畦灌处理灌水较为均匀, 膜内膜外脱盐效果较为接近。

3) 生物炭+地下水滴灌是河套灌区玉米农田优先选择的田间管理措施。

参考文献:

[1] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 126-135.
TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 126-135.

[2] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.

[3] CASSEL SHARMASARKAR F, SHARMASARKAR S, MILLER S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets[J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3): 241-251.

- [4] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 63-72.
CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 63-72.
- [5] KANG Y H, WANG R S, WAN S Q, et al. Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 117-126.
- [6] 陈四龙, 裴冬, 王振华, 等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005(6): 30-35.
CHEN Silong, PEI Dong, WANG Zhenhua, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005(6):30-35.
- [7] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403-427.
- [8] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1): 81-115.
- [9] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 394-400.
PAN Genxing, ZHANG Afeng, ZOU Jianwen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendment to croplands: An option for low carbon agriculture[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(4): 394-400.
- [10] XU X Y, KAN Y, ZHAO L, et al. Chemical transformation of CO₂ during its capture by waste biomass derived biochars[J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 533-540.
- [11] 王欣, 尹带霞, 张凤, 等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248-257.
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 248-257.
- [12] LASHARI M S, YE Y X, JI H S, et al. Biochar-manure compost in conjunction with pyroigneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: A 2-year field experiment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1 321-1 327.
- [13] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F L. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2015, 158: 61-68.
- [14] 朱成立, 吕雯, 黄明逸, 等. 生物炭对咸淡轮灌下盐渍土盐分分布和玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 226-234.
ZHU Chengli, LÜ Wen, HUANG Mingyi, et al. Effects of biochar on coastal reclaimed soil salinity distribution and maize growth with cycle fresh and saline water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 226-234.
- [15] 岳燕, 郭维娜, 林启美, 等. 加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 914-919.
YUE Yan, GUO Weina, LIN Qimei, et al. Salt leaching in the saline soil relative to rate of biochar applied[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 914-919.
- [16] LIN Y, MUNROE P, JOSEPH S, et al. Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars[J]. Chemosphere, 2012, 87(2): 151-157.
- [17] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1): 81-115.
- [18] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 293-300.
AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shixiang, et al. Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 293-300.
- [19] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2 187-2 193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2 187-2 193.
- [20] 岑睿, 屈忠义, 孙贯芳, 等. 秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 284-289.
CEN Rui, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effects of biochar on the physical properties and infiltration of clay loam[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 284-289.
- [21] 魏永霞, 王鹤, 肖敬萍, 等. 生物炭对黑土区土壤水分扩散与溶质弥散持续效应研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 308-319.
WEI Yongxia, WANG He, XIAO Jingping, et al. Persistent Effect of Biochar on Soil Water Diffusion and Solute Dispersion in Black Soil Region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 308-319.
- [22] Ren Xiaodong, Qu Zhongyi, Martins D S, et al. Daily reference evapotranspiration for hyper-arid to moist sub-humid climates in Inner Mongolia, China: I. Assessing temperature methods and spatial variability[J]. Water Resources Management, 2016, 30(11): 3 769-3 791.
- [23] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144-152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 144-152.
- [24] LI Xianwen, JIN Menggui, YUAN Jingjin, et al. Evaluation of soil salts leaching in cotton field after mulched drip irrigation with brackish water by freshwater flooding. [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2014, 45(9): 1 091-1 098, 1 105.
- [25] 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 201-207.
- WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201-207.
- [26] KUZUYAKOV Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: A comparison of four methods[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(11): 1 621-1 631.
- [27] HALL A J, GINZO H D, LEMCOFF J H, et al. Influence of drought during pollen-shedding on flowering, growth and yield of maize[J]. Zeitschrift fur Acker- und Pflanzenbau, 1980, 149(4): 287-298.
- [28] DE HERRALDE F, BIEL C, SAVE R, et al. Effect of water and salt stresses on the growth, gas exchange and water relations in *Argyranthemum coronopifolium* plants[J]. Plant Science, 1998, 139(1): 9-17.
- [29] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1 141-1 147.
- LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. The research of BioChar's effect on soil humidity, fertility and temperature[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1 141-1 147.
- [30] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1-7.
- [31] 何子建, 史文娟, 杨军强. 膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 129-138.
- HE Zijian, SHI Wenjuan, YANG Junqiang. Water and salt transport and desalination effect of halophytes intercropped cotton field with drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 129-138.
- [32] CHENG C, LEHMANN J, THIES J E, et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1 477-1 488.

The Effects of Soil Amendment with Straw Biochar on Water and Salt Dynamics as Well as Water Use Efficiency of Corn under Different Irrigations

JIA Yonglin¹, QU Zhongyi^{1*}, DING Yanhong², YANG Wei¹, MA Guiren¹, LI Zhengzheng¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: **【Background】** Hetao Irrigation District is characterized by high soil salinization and low water use efficiency. Improving water use efficiency and alleviating soil salinity is essential to its sustainable development. **【Objective】** The objective of this paper is to investigate the efficacy of amending soil with corn-straw biochar on water and salt movement under different irrigations, as well as its consequence for crop growth and water use efficiency. **【Method】** The experiment was conducted in a corn field. The irrigations and biochar application were designed in the two-factor random block plots. There were three irrigations: drip irrigation with groundwater and furrow irrigation with groundwater and Yellow River water respectively, and two biochar application: 0 and 30 t/hm². The biochar was applied to the soil surface in 2016 prior to planting followed by a mixture with the plough layer using a tiller. During the 2018 growth season, we measured soil moisture, soil salt content, corn yield, evapotranspiration and water use efficiency in all treatments. **【Result】** Drip irrigation with biochar amendment increased desalination by 13.3%, evapotranspiration by 10.5%, water use efficiency by 6.0%, and yield by 3.5%, compared with the same irrigation but without biochar. Furrow irrigation with the biochar amendment increased soil desalination by 5.0%, the evapotranspiration by 1.3%, corn yield by 4.8%, and water use efficiency by 3.1%, compared with those without amended by the biochar. **【Conclusion】** Three years after its amendment with soil, the biochar was still effective in alleviating salt accumulation in the 0-100 cm soil and improving water use efficiency and yield of the corn, irrespective of the irrigation method. Comparison showed that amending soil with 30 t/hm² of biochar coupled with film mulched drip irrigation was most effective in saving water, alleviating soil salinity and ultimately increasing yield.

Key words: irrigation methods; biochar; medium and long-term effects; desalination; soil moisture; corn yield

责任编辑: 赵宇龙