

膜下滴灌制度与生物炭用量对玉米生长及水氮利用效率的影响

杨 威¹, 屈忠义¹, 张如鑫¹, 杨旖璇¹, 贾咏霖², 高晓瑜¹, 高利华¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木工程学院, 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: 为探明干旱地区盐碱地膜下滴灌不同灌水下限施用生物炭对玉米产量和水肥利用效率的响应差异及相互影响关系, 提出较优的灌溉制度和生物炭用量。连续 2 年在河套灌区盐渍化农田玉米生长阶段进行小区控制试验, 设计 3 个灌水下限[土壤基质势为 $-15(W15)$, $-25(W25)$, $-35(W35)$ kPa, 灌水定额为 22.5 mm]和 3 个生物炭用量水平[0(B0), 15(B15), 30(B30) t/hm²], 2 因素完全随机试验设计, 共 9 个处理。测定并分析玉米全生育期 0—15 cm 土壤理化性状、作物生长特征和水氮利用效率。结果表明: 不同灌水下限施用生物炭整体提高玉米全生育期土壤含水率、有机质和碱解氮含量, 同一灌溉水平下生物炭用量越高, 各指标提升的幅度越大。施用生物炭提高玉米地上部干物质积累量和产量, 灌溉水利用效率和氮肥偏生产力显著提高, 且生物炭施用当年的效果普遍优于翌年。相较于不施用生物炭的对照, W15、W25、W35 条件下, B15 使玉米产量平均增加 12.8%, 10.3%, 14.2%, 灌溉水利用效率提高 14.2%, 10.4%, 12.9%, 氮肥偏生产力提升 12.8%, 10.4%, 14.0%, 其节水增产提效的作用普遍优于同一灌水处理的 B30。建议河套灌区盐渍化农田玉米生育期的膜下滴灌灌水下限为 -35 kPa, 生物炭施用量为 15 t/hm²。

关键词: 生物炭; 灌溉制度; 土壤水分; 水分生产力; 氮肥利用效率; 土壤肥力; 作物产量

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0313-010

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.040

Effects of Drip-irrigation Schedule Under Film-mulching and Biochar Amount on Corn Growth and Water-nitrogen Use Efficiency

YANG Wei¹, QU Zhongyi¹, ZHANG Ruxin¹, YANG Yixuan¹,

JIA Yonglin², GAO Xiaoyu¹, GAO Lihua¹

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

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

Abstract: To determine the influence of biochar addition on maize yield and water-fertilizer use efficiency under limits of soil suction to trigger irrigation for mulched drip irrigation in saline-alkali areas, proposing the optimal irrigation schedule and biochar application rate, a field experiment from 2015 to 2016 was carried out in the maize growth stage of the salinized farmland in the Hetao Irrigation District. Three limits of soil suction to trigger irrigation [$-15(W15)$, $-25(W25)$, $-35(W35)$ kPa, and the irrigation quota was 22.5 mm] and three application rates of biochar [0 (B0), 15 (B15) and 30 (B30) t/hm²] were designed. Biochar was just only applied in the first year. Soil physicochemical properties in top 15 cm layer, crop growth characteristics, water and nitrogen use efficiency and economic benefits of maize in the whole growth period were measured and analyzed. The results showed that the application of biochar at different irrigation water limits increased the soil water content, organic matter, and available nitrogen content in the whole growth period of maize. For same irrigation level, the higher the amount of biochar, the greater the improvements of these measurements. Application of biochar significantly increased the dry matter accumulation and grain yield of maize plants; the irrigation water use efficiency and the partial fertilizer productivity of nitrogen were also significantly improved. Compared with the control without biochar, under the conditions of W15, W25 and W35, B15 increased corn yield by 12.8%, 10.3% and 14.2%, irrigation water use efficiency increased by

收稿日期: 2022-05-13

资助项目: 内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2020-1); 国家自然科学基金项目(52109056, 51779117); 内蒙古自治区科技成果转化专项(2021CG0022); 中国博士后科学基金特别资助项目(2021T140347); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS05003)

第一作者: 杨威(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事作物水分生理与农业生态环境研究。E-mail: yangweijays@126.com

通信作者: 屈忠义(1969—), 男, 教授, 博导, 主要从事农业水土环境与节水灌溉理论和技术研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

14.2%, 10.4% and 12.9%, and nitrogen fertilizer partial productivity increased of 12.8%, 10.4% and 14.0%. For same irrigation treatment, the effect of B15 in saving water, enhancing yield was generally better than that of B30. It is suggested that the limit of soil suction to trigger irrigation is -35 kPa (22.5 mm for each irrigation) under mulched drip irrigation during the growth period of maize in salinized farmland, and the application rate of biochar is 15 t/hm^2 .

Keywords: biochar; irrigation schedule; soil moisture; water productivity; nitrogen use efficiency; soil fertility; crop yield

内蒙古河套灌区是我国重要的商品粮油生产基地,灌区盐碱地面积大、类型多、程度重,不合理的灌溉方式和灌溉量,导致该区农业水肥资源浪费严重、作物水氮利用效率较低,严重制约地区农业经济可持续发展和生态环境建设^[1]。特别是近几年来,随着国家对流域间黄河用水量的严格管控,未来灌区引黄水量将从现在的 $50\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 减少至 $40\text{ 亿 m}^3/\text{a}$,预计土壤盐渍化问题、作物缺水现象等问题将变得更加严峻^[1-2]。因此,采取适宜的盐碱地改良措施,制定合理的灌溉方式和灌溉制度,对于推动灌区农业水土肥资源高效利用、促进区域农业可持续发展具有重要的理论价值和实践意义。

膜下滴灌技术作为一种新型节水技术,因其节水、省肥、增产等诸多优势,在我国干旱半干旱地区农业生产中普遍应用。生物炭作为一种绿色安全的土壤改良资源,其来源广泛,具有很高的应用价值和环境效益,对于改善土壤水分特性、改良盐碱地、促进作物生长、提高水肥利用效率等方面具有重要的作用^[3-4]。王淑君等^[5]通过大棚盆栽试验发现,中度亏缺灌溉(60%~65%的田间持水率)施入生物炭基肥可提高表层 0—15 cm 土壤铵态氮和速效钾含量,植株地上部分氮钾养分吸收量增加,增产 37.7%~40.5%,提高水分利用效率 9.9%~53.8%;阚正荣等^[6]研究发现,生物炭的施入可以显著增加土壤含水量,减少玉米耗水量,使其全生育期水分利用效率显著提高 13.7%~24.4%;黄明逸等^[7]在遮雨条件下以滨海盐渍土为研究对象发现,生物炭促进咸淡交替灌溉下玉米生长,叶面积指数和干物质质量等指标均明显增加,产量提高 10.9%~32.3%,推荐 15 t/hm^2 为最适宜的生物炭添加量;朱成立等^[8]以盐碱土壤为研究对象发现,在咸淡轮灌条件下,生物炭能够促进玉米光合作用、减轻水分胁迫,最终提高产量和收获指数;李昌见等^[9]研究发现,在滴灌覆膜条件下施加生物炭明显提高作物水氮利用效率,与不施用生物炭的对照相比提高水分生产力 27.7%,增加氮肥利用率 87.5%。中度盐碱地进行适度亏缺灌溉和生物炭添加能显著增加土壤有机质含量,提高玉米叶绿素含量和产量^[10-11]。也有研究^[12-13]表明,覆膜滴灌条件下不同

灌溉水下限施用生物炭对土壤速效养分和土壤水分没有显著影响;充分灌溉条件下施用生物炭(30 t/hm^2)可有效提高作物产量,但在中度亏缺灌溉条件下,番茄生长明显受到抑制,导致产量下降^[14-15]。

现有的研究主要集中在传统灌溉条件下灌溉量和生物炭用量对土壤性质和作物生长生理的影响,膜下滴灌不同灌溉量与生物炭用量对于干旱地区盐碱地玉米生长和水肥利用效率的交互影响研究鲜有报道。本文以河套灌区盐碱地玉米为研究对象,通过 2 年的田间试验,探明不同灌溉水下限($-15, -25, -35\text{ kPa}$)玉米种植系统水氮利用效率和土壤肥力指标对生物炭用量的响应差异及其关系,提出较优的膜下滴灌灌溉制度和生物炭用量,为我国干旱大型灌区盐碱地治理、农业废弃资源炭化利用和农田水肥优化管理提供理论基础和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015—2016 年在内蒙古巴彦淖尔市临河区双河镇九庄试验站进行($107^{\circ}18'E, 40^{\circ}41'N$)。该地海拔 $1\,042\text{ m}$,多年(1960—2020 年)平均气温 $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温 $40.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7 月),最低气温 $-35.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 月),无霜期约 130 天,年平均日照时间 $3\,229\text{ h}$ 。年降水量 $137\sim 214\text{ mm}$,约 75%的降雨($103\sim 160\text{ mm}$)分布在 5—9 月。多年潜在蒸发量 $1\,993\sim 2\,373\text{ mm}$,属于典型的干旱气候类型。2015 年、2016 年作物生长阶段,月平均气温为 $16.5\sim 24.1, 16.6\sim 24.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,总降水量为 90, 119 mm,每日的降水量见图 1。试验土壤质地为砂壤土,2015 年玉米种植时 0—30 cm 土层的土壤主要理化性质见表 1。根据土壤情况分析,土壤有机质、速效氮和速效磷含量较为缺乏,速效钾含量较为丰富,土壤肥力整体较差。

1.2 试验设计与田间管理

田间试验设计灌水下限和生物炭用量 2 个试验因素,其中灌水下限设置 3 个水平(土壤基质势 -15 (W15), -25 (W25), -35 kPa (W35)),对应充分灌溉、轻度亏缺灌溉、中度亏缺灌溉 3 个灌溉水平;生物炭用量包括 0(B0), 15 (B15), 30 t/hm^2 (B30) 3 个水平。完全随机区组试验设计,共设置 9 个处理,每个

处理重复 3 次。设计试验小区面积 90 m²(长 15 m, 宽 6 m),每个小区种植 5 行,每行 10 株。

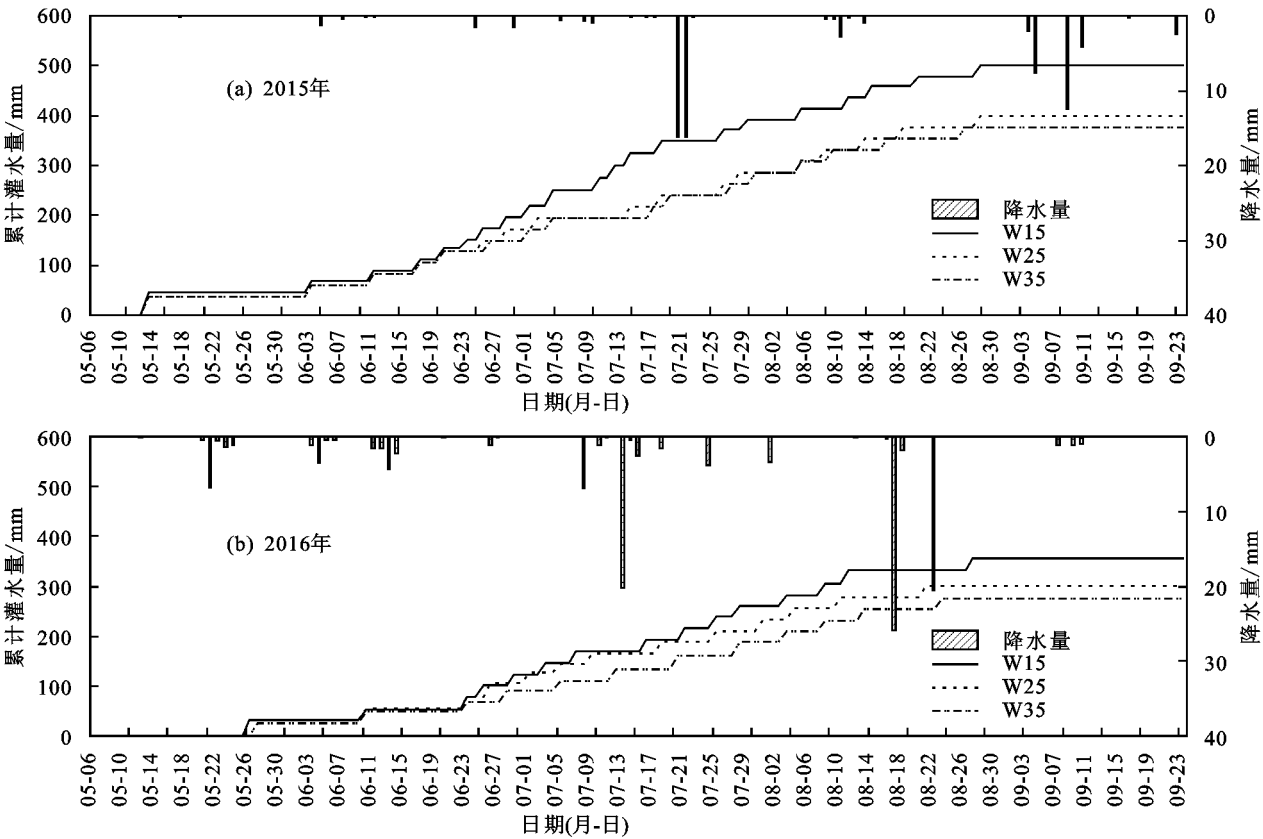


图 1 试验阶段的降水量和灌水量

表 1 供试土壤和生物炭基础理化性状

参数	砂壤土	生物炭
砂粒/%	57.3	—
黏粒/%	23.1	—
粉粒/%	19.6	—
田间持水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.25	—
电导率/(μS·cm ⁻¹)	318.5	—
pH	8.5	9.0
有机质/(g·kg ⁻¹)	14.5	925.7
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	65.9	159.2
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	5.3	394.2
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	184.0	783.9
碳质量分数/%	—	47.2
氮质量分数/%	—	0.7
氢质量分数/%	—	3.8
碳氮比	—	67.0

注:—表示无数据。

供试玉米品种为“西蒙 6 号”,每年 5 月初播种,株距 30 cm,行距 50 cm,种植密度为 5.66 万株/hm²。玉米播种时施用基肥:磷酸二胺(N:P₂O₅=14%:39%) 450 kg/hm²,复合肥(N:P₂O₅:K₂O=30%:5%:5%)338 kg/hm²。在拔节前、中、后期,抽雄期,灌浆期,追施尿素,每次 75 kg/hm²,施肥方式为随水施肥。经折算,玉米整个生育期纯氮(N)、纯磷(P₂O₅)和纯钾(K₂O)的用量分别为 339,192,17 kg/hm²。2015 年 5 月上旬将玉米秸秆生物炭一次性撒施于土

壤表面,而后使用旋耕机将其与耕层 0—20 cm 的土壤均匀混合。2016 年不再施用生物炭,继续原位开展田间试验。秸秆生物炭购自辽宁金和福农业开发有限公司,其主要理化性质见表 1。

滴灌带铺在覆膜玉米 2 行的中间,其直径和滴头间距分别为 16,300 mm,单个喷头流量为 1.68 L/h。玉米播种前统一灌溉 30 mm,随后通过北京奥特思达科技有限公司生产的张力计控制灌溉。张力计布设在试验田膜内 20 cm 处^[16],每个小区为 1 个灌溉单元,当土壤基质势达到灌水下限(LSSTR)相应数值时进行灌溉,灌溉水源为黄河水,灌溉湿润深度为 40 cm,设计灌水定额为 22.5 mm。试验期间各灌水下限处理的累计灌水量见图 1。2015 年灌溉 17 次,W15、W25、W35 的累计灌水量分别为 500,399,376 mm;2016 年灌溉 13 次,W15、W25、W35 的累计灌水量分别为 355,300,277 mm。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤理化性状 在玉米三叶期、拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期,取 0—15 cm 的土层样品,混匀后,测定土壤含水率。取回的样品经自然风干、过筛后,测定碱解氮和有机质含量。土壤含水率采用烘干称重法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法^[10]测定,有机质含量采用重铬酸钾容量法^[10]测定。

1.3.2 玉米生长性状 从拔节期开始约每隔 10 天,

使用植物冠层分析仪 (Accu PAR LP-80, 美国) 测定叶面积指数; 成熟期在每个小区的第 2 膜和第 4 膜, 连续选取具有代表性植株 10 株, 测定地上部干物质重量、穗粒数、百粒重和产量。

1.3.3 水氮利用效率 根据玉米产量、累计施氮量和灌水量结果, 计算每年各处理的氮肥偏生产力 (partial fertilizer productivity of nitrogen, PFPN = 玉米产量 $\times 100$ / 施氮量, 施氮量为化肥氮用量和生物炭中碱解氮用量之和, 因生物炭中的速效氮含量极少, 故忽略不计, 因此本文中的施氮量仅为化肥氮用量^[11]) 和灌溉水利用效率 (kg/m^3) [irrigation water use efficiency, IWUE = 玉米产量 (kg/hm^2) $\times 100$ / 灌溉定额 (m^2/hm^2)]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和作图, 利用 SPSS 软件在玉米不同生育期对同一灌水量下 3 种生物炭处理的株高、叶面积、碱解氮和有机质进行单因素方差分析; 对不同生物炭处理和灌溉水量处理下的玉米产量性状、灌溉水利用效率、氮肥偏生产力进行 2 因素方差分析; 运用 LSD 法进行处理间的多重比较 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率变化规律

由图 2 可知, 不同灌水下限条件下施用生物炭整体上提高玉米全生育期 (三叶期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期) 耕层 0—15 cm 的土壤含水率, 2 年的变化趋势基本相同。2015 年, 灌水下限为 -15 kPa 时 (W15), 与同生育期的 B0 相比, B30 处理使三叶期、拔节期、抽雄期的土壤含水率分别增加 12.6%, 11.8%, 6.6% ($p < 0.05$), 而 B15 与 B0 的土壤含水率在各生育期差异不显著; 灌水下限为 -25 kPa 时 (W25), B30 使拔节期的土壤含水率增加 7.2% ($p < 0.05$), 而对其他生育期的土壤含水率无显著影响; 灌水下限降至 -35 kPa 时 (W35), B15、B30 均提高拔节期、抽雄期和灌浆期的土壤含水率, 与同期 B0 相比, B30 提高土壤含水率 8.8%, 10.4% 和 8.9% ($p < 0.05$)。2016 年, 灌水下限为 W15 时, 相较于同期 B0, B30 提高抽雄期土壤含水率 6.2% ($p < 0.05$); 灌水下限为 W25 时, B30 使抽雄期和灌浆期土壤含水率提高 10.4% 和 15.9% ($p < 0.05$); 灌水下限为 W35 时, B15 三叶期、拔节期、灌浆期的土壤含水率分别提高 5.2%, 11.4%, 8.4% ($p < 0.05$)。

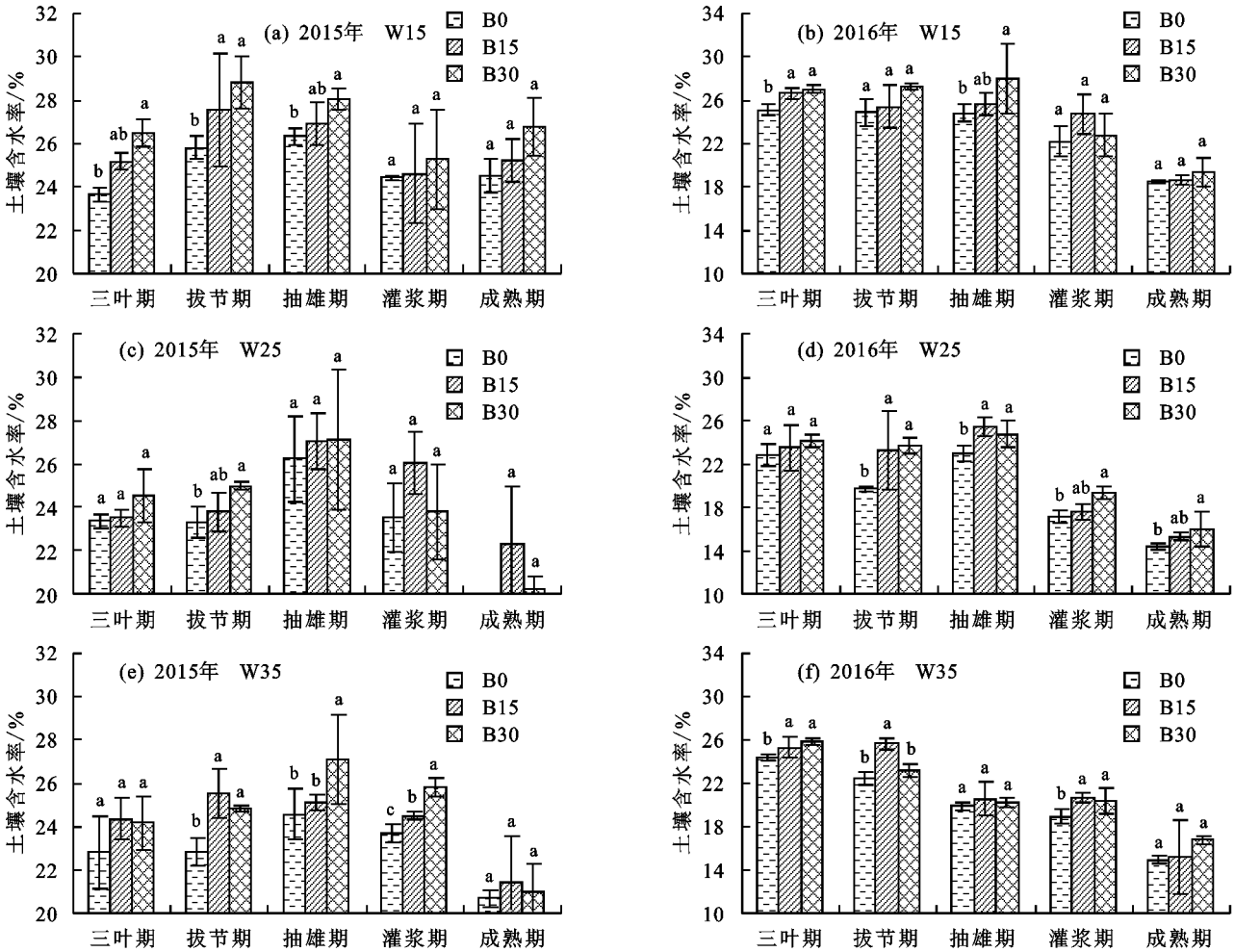


图 2 玉米全生育期不同处理 0—15 cm 土层的土壤含水率

2.2 土壤肥力指标响应特征

由图 3 可知,不同灌水下限条件下施用生物炭整体上提高耕层 0—15 cm 土壤碱解氮和有机质含量,2 年的变化趋势基本一致。除 2016 年 W35 条件下的生物炭处理之外,无论在玉米哪个生育期,同一灌溉水平下,生物炭用量越高,土壤碱解氮和有机质含量越高。在施用生物炭的当年(2015 年),W15 条件下的 B15 和 B30 均能显著提高土壤碱解含量($p < 0.05$),而两者无显著差异;相较于同生育期不施用生物炭的 B0, B30 处理使拔节期、抽雄期和灌浆期土壤

碱解氮含量分别增加 13.8%,13.6%和 17.2%($p < 0.05$),而在 W25 和 W35 条件下,生物炭处理对土壤碱解氮含量无明显促进作用,各处理与 B0 无显著差异(除 W25 的灌浆期外)。施用生物炭的第 2 年, W15 和 W25 条件下的 B30 处理仍能显著促进拔节期、灌浆期和成熟期碱解氮含量,但其普遍与 B15 无显著差异;在 W35 条件下,与同期 B0 相比, B15 分别使三叶期、拔节期和关键期的土壤碱解氮含量增加 22.4%,15.3%,14.6%($p < 0.05$),且均显著高于同期 B30 的碱解氮含量。

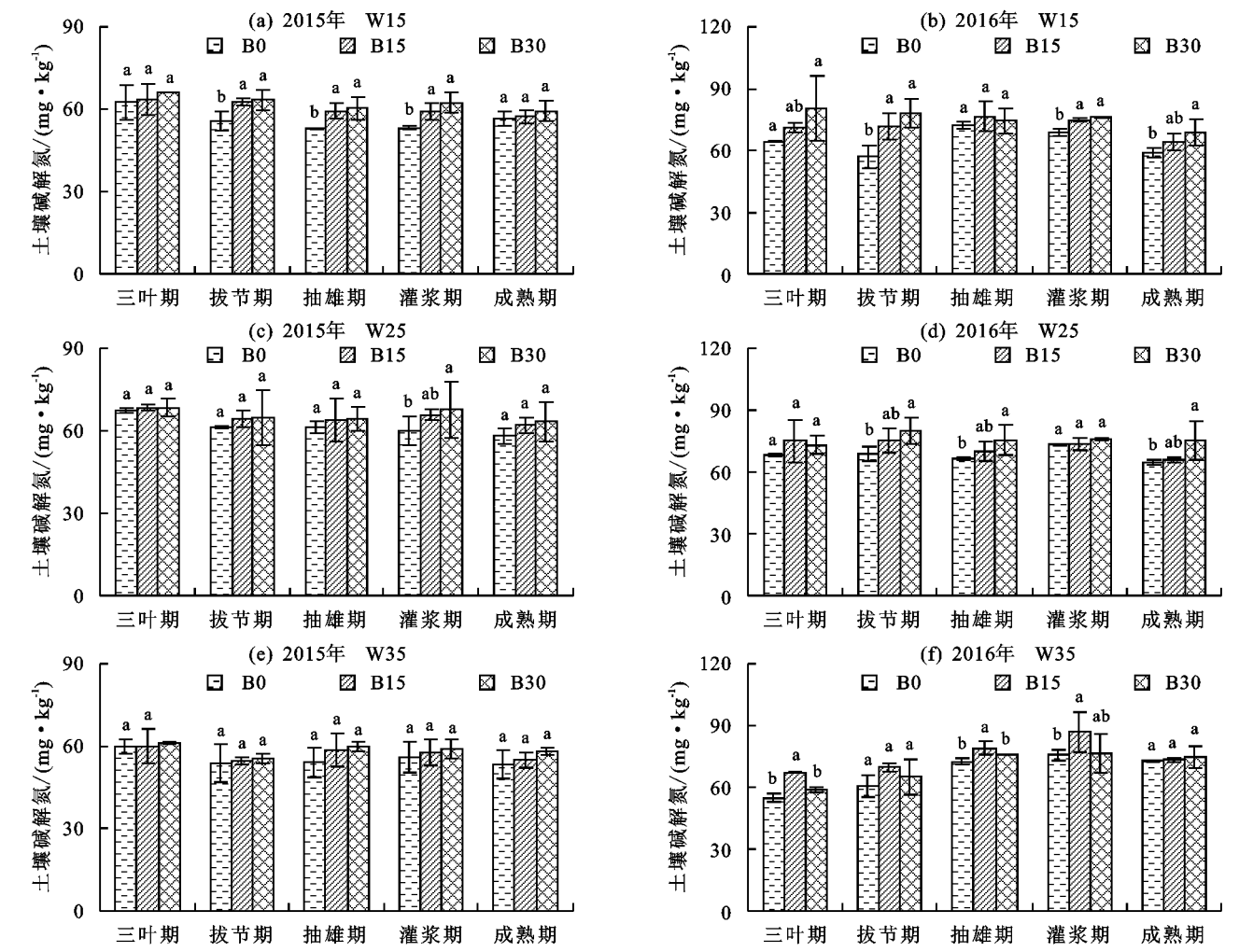


图 3 玉米全生育期不同处理 0—15 cm 土层的土壤碱解氮含量

同一灌水下限施用生物炭对玉米全生育期耕层土壤有机质含量的影响规律基本一致,有机质含量均随生物炭的用量的增加而增加(图 4)。2015 年,在 W15 条件下,较同生育期的 B0 相比较, B15 使三叶期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期土壤有机质含量分别提高 20.5%,23.1%,16.8%,30.1%和 26.1%($p < 0.05$),但与同生育期的 B30 无显著差异; W25 条件下, B30 分别提高抽雄期、灌浆期和成熟期土壤有机质含量 35.0%,36.7%和 15.8%,而与 B15 各时期的土壤有机质含量无显著差异; W35 条件下, B30 分别提高三叶期、灌浆期和成熟

期土壤有机质含量 35.0%,36.7%和 15.8%。2016 年, W15 和 W35 条件下的 B30 生物炭处理仍能提高成熟期有机质含量,但与 B15 处理无显著差异。一次性施用生物炭 2 年后,第 2 年的 W15 和 W35 的有机质含量明显高于第 1 年生物炭施用前的土壤有机质含量,较试验前的有机质含量相比, W15 的 B15、B30 的有机质含量提高 14.3%,21.6%, W35 的 B15、B30 的有机质含量提高 26.1%,24.7%。由此可见,试验当年一次性施用生物炭仍能在翌年继续发挥固碳作用,在保持较高的速效氮含量基础上,促进有机质的形成,增加土壤肥力。

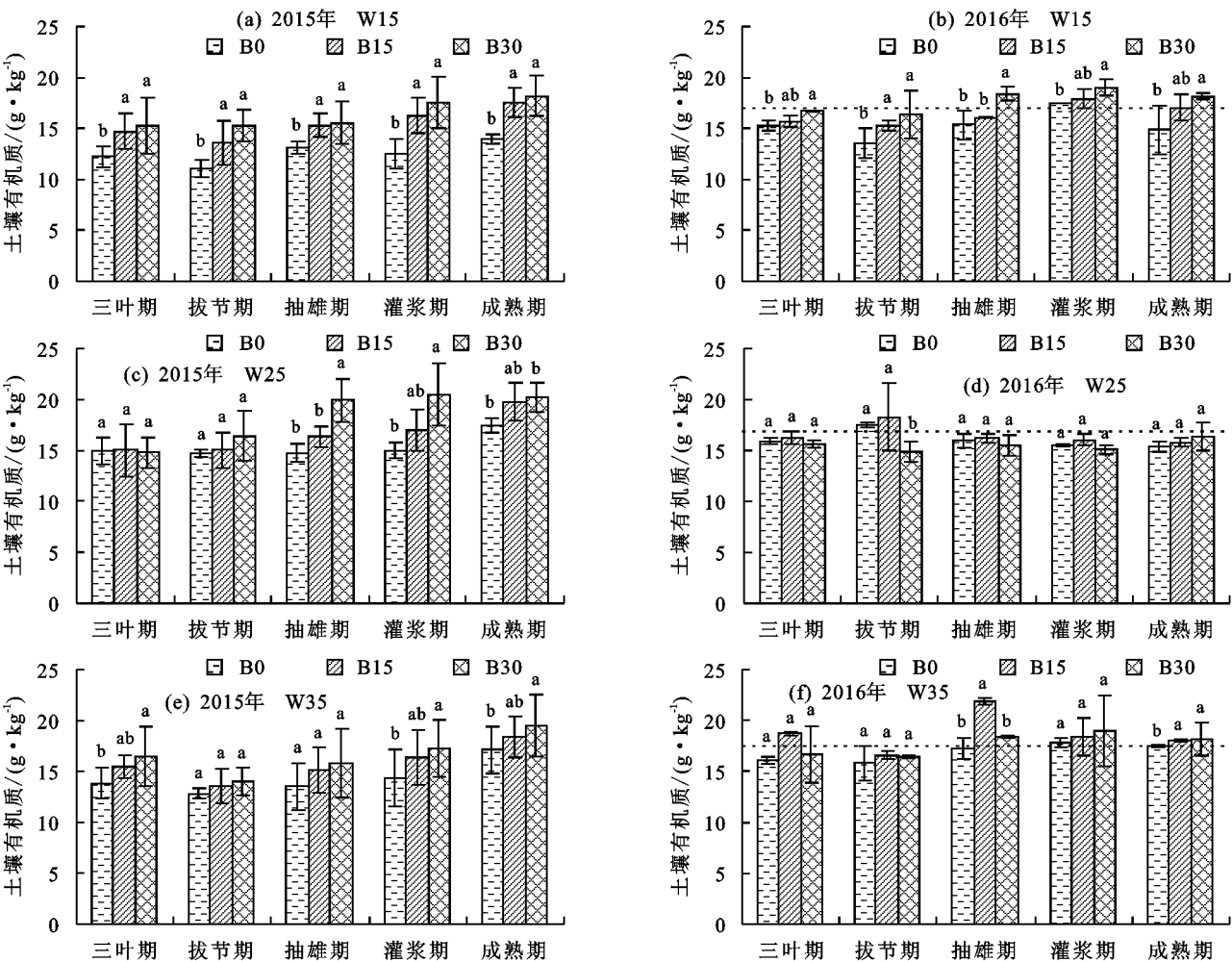


图 4 玉米全生育期不同处理 0—15 cm 土层的土壤有机质含量

2.3 玉米生长性状和水氮利用效率变化

由图 5 可知,不同灌水下限条件下施用生物炭整体上促进玉米叶面积,2 年的变化趋势基本相同。同一灌溉水平下,玉米整个生育期的叶面积均随生物炭用量的增加而增加。平均 5 次观测值,在 W15、W25 和 W35 条件下,与同生育期的 B0 相比较,2015 年 B15 使叶面积分别提高 8.8%,8.9%和 9.4%,B30 使叶面积分别提高 15.1%,15.6%和 15.2%;2016 年 B15 使叶面积分别增加 13.5%,13.1%和 3.8%,B30 使株高分别增加 25.7%,25.4%和 11.7%。说明在较低的灌水下限条件下,试验当年一次性施用物炭仍能较大程度促进翌年玉米地上部叶片生长,增加作物干物质积累量。

不同灌水下限条件下,施用生物炭普遍提高试验当年翌次年玉米穗粒数、百粒重、地上部干物质重和灌溉水利用效率,2 年的表现相同,但灌水下限处理对这些性状的影响效果因生物炭用量的不同而不尽一致(表 2)。2015 年,同一灌水量下,B15 和 B30 显著增加玉米穗粒数、产量和灌溉水利用效率,但对百粒重和收获指数无显著影响。在 W15、W25、W35 条

件下,相对于不施用生物炭的对照 B0,施用 B15 增加穗粒数 10.8%,17.9%和 15.3%($p<0.05$),增加产量 14.9%,19.8%和 21.6%($p<0.05$),提高灌溉水利用效率 16.4%,20.0%和 21.7%($p<0.05$)。

2016 年在 W15、W25 和 W35 条件下,B15 和 B30 处理对百粒重、收获指数和地上部干物质重(除 W25 的 B15 外)均没有显著的促进作用,但能普遍提高穗粒数、产量和灌溉水利用效率。在 W25 和 W35 条件下,相较于同期 B0,B15、B30 提高穗粒数 6.8%和 8.6%($p<0.05$)。在 W15 和 W35 条件下,相较于同期 B0,B15 提高产量 6.7%和 9.2%($p<0.05$)。W35 条件下各生物炭处理的灌溉水利用效率均高于 W15 和 W25 条件下的生物炭处理。对于 W15,与同期 B0 相比较,B15 提高灌溉水利用效率 9.3%;对于 W25,B30 提高灌溉水利用效率 9.9%,而 W35 条件下 B15 和 B30 对灌溉水利用效率无显著影响。W15、W25、W35 条件下,B15 处理提升氮肥偏生产力 12.8%,10.4%和 14.0%,其提升幅度优于第 2 年。综合 2 年的试验结果,适当亏缺灌溉条件下施用生物炭对玉米产量性状和水氮利用效率的整体促进作用优于充分灌溉条件,且生物炭当年施用的效果整体优于翌年。

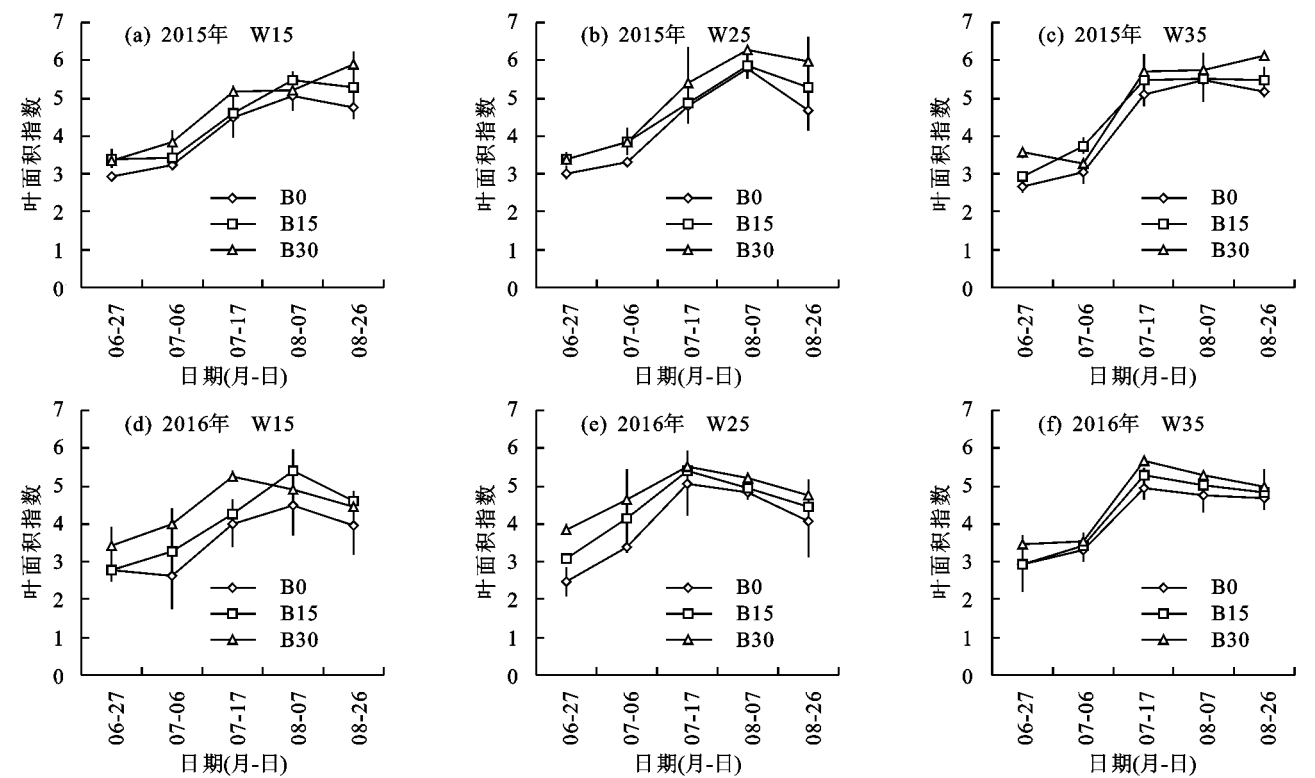


图 5 不同处理玉米叶面积指数差异

表 2 不同生物炭处理的玉米产量性状、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力

年份	灌水 下限	生物炭 处理	百粒重/g	单穗 粒数	地上部干物质重/ (t·hm ⁻²)	玉米产量/ (t·hm ⁻²)	收获 指数	灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
2015	W15	B0	40.97ab	656b	36.7b	12.8bc	0.35b	2.39e	37.73b
		B15	42.87a	727a	39.1a	14.9a	0.38ab	2.91d	44.01a
		B30	41.12ab	744a	36.7b	14.5ab	0.40a	2.85d	42.84a
	W25	B0	40.92ab	651b	35.5bc	12.6bc	0.36ab	3.15cd	37.21b
		B15	41.32ab	768a	40.2a	15.1a	0.37ab	3.78b	44.38a
		B30	42.33a	760a	37.4b	15.2a	0.41a	3.81ab	44.82a
	W35	B0	38.98b	647b	32.3c	12.0c	0.37ab	3.40c	35.41b
		B15	41.11ab	746a	36.8b	14.6ab	0.40a	3.96a	42.94a
		B30	40.48ab	43a	35.6bc	14.3ab	0.40a	3.86ab	42.09a
	W×B	W	*	ns	* *	*	ns	* *	ns
		B	ns	*	ns	*	ns	*	*
		W×B	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2016	W15	B0	34.77a	720b	31.2ab	11.9b	0.38ab	3.35d	35.08ab
		B15	34.73a	782a	33.4a	13.0a	0.39a	3.57d	38.22a
		B30	35.83a	749ab	31.1ab	12.7a	0.41a	3.49d	37.45a
	W25	B0	33.43a	741b	29.9b	11.8b	0.39a	3.93c	34.65b
		B15	33.14a	758ab	32.4a	11.9b	0.37b	3.96c	35.17b
		B30	34.87a	792a	31.8ab	13.0a	0.41a	4.32b	38.41ab
	W35	B0	33.92a	736ab	30.1ab	11.9b	0.40a	4.30b	35.02b
		B15	35.89a	746ab	31.2ab	12.7a	0.41a	4.70a	37.35ab
		B30	33.89a	767ab	30.2ab	12.4ab	0.41a	4.59ab	36.45ab
	W×B	W	* *	*	*	* *	ns	*	ns
		B	ns	*	ns	* *	ns	*	*
		W×B	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:ns 表示无显著差异;* 表示 $p<0.05$; * * 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

3.1 灌水量和生物炭用量对土壤含水率的影响

本试验研究表明,不同灌水下限条件施入生物炭均能普遍提高表层土壤含水率(图 2),这与前人^[18-20]的研究结果相吻合。一方面,生物炭本身拥有巨大的比表面积,施入土壤后降低土壤容重,增大土壤孔隙度,有利于土壤含水率的增加;另一方面,生物炭为多孔结构的亲水材料,对水分吸收能力较强,将其施入土壤提高土壤的保水和蓄水能力;第 3 方面,生物炭本身含有较高的盐分,施入土壤后增加土壤盐分,而土壤盐分的增加可加大土壤的吸湿能力,有利于减缓土壤水分蒸发,进而提高土壤含水率。土壤含水率随施炭量的增加而逐渐降低,可能是较大生物炭施用量使土壤变得更加疏松多孔,土壤大孔隙数量增加,不利于土壤保水。在三叶期,各处理的土壤含水率无显著差异,主要原因是播前各处理含水率水平一致,三叶期降雨量少、作物需水量少、蒸发小,土壤较长时间达不到灌水下限,农田灌水量少,导致不同处理间土壤含水率差异较小。

本研究发现,2015 年 W35 中成熟期各生物炭处理差异不显著,但随着施炭量的增加,各处理耕层土壤含水率逐渐下降,主要原因是 W35 为灌水量最小的处理,玉米成熟后未进行灌溉,且取土时间距最后 1 次灌水时间为 25 天,长时间没有灌水补给和降雨补给,土壤极度缺水,而施入生物炭增加土壤的孔隙度,在一定范围内,生物炭用量越多,土壤孔隙度越大,当土壤孔隙极度出现缺水时,导致土壤气相所占的体积相对增大,从而增强土壤的蒸发强度,最终导致土壤含水率逐渐减小^[21-22]。2016 年, W15 中成熟期各处理差异不显著,主要原因是 2016 年降雨多且 W15 为灌水量最多的处理,各处理土壤含水率均比较大,且大于 W25 和 W35 处理(图 2),但没有表现出显著差异,由此说明生物炭的适宜用量、保水能力与灌水、降雨、土壤本身的含水率有很大的关系^[23-24]。

3.2 灌水量和生物炭用量对土壤肥力指标的影响

土壤有机质和速效氮含量是表征土壤肥力水平的 2 个关键化学指标。已有研究^[25-27]表明,施用生物炭可有效提高土壤中的有机质和土壤速效养分含量^[9-10, 28]。本试验研究发现,不同灌水量条件下施用生物炭后,连续 2 年玉米全生育期耕层土壤有机质和速效氮含量均得到不同程度提高(图 3 和图 4),一方面是因为生物炭本身碳氮含量非常高(表 1),可以增加土壤中有机质和碱解氮含量;另一方面生物炭中的碳主要由作物秸秆通过热解生成,并以惰性的芳香环

状结构存在,因此生物炭很难分解,据报告^[12]生物炭可以封存上千年;第 3 方面,生物炭表面丰富的含氧官能团所带的负电荷和复杂的孔隙结构,赋予生物炭较大的阳离子交换量和强大的吸附能力^[18],将生物炭施入土壤可以缓慢释放土壤养分,减少土壤养分的淋洗损失和固定损失等,进而提高土壤速效养分含量^[16];第 4 方面生物炭增加土壤微生物群落的数量和活性^[18],促进作物根系的生长^[29-30],根系数量增加,试验第 1 年玉米收获后的玉米根系留在土壤中,间接增加土壤有机质含量。相比而言,W25 和 W35 施用低量生物炭(15 t/hm²)对促进土壤有机质含量和速效氮含量的效果更优。同一灌溉水平下,施用生物炭当年土壤肥力指标 B30 优于 B15,但第 2 年 B15 优于 B30(图 3 和图 4)。这与魏永霞等^[31]的研究结果基本一致;连续施加生物炭后发现,第 1 年施加高量生物炭(50 t/hm²)对土壤肥力综合性能提高效果较好,而第 2 年施加低量生物炭(25 t/hm²)生物炭量的效果较好。可能原因是,当年施加生物炭使土壤养分含量有所提升,土壤肥力综合水平提高,但是其肥力整体提升水平与施炭年限可能负相关^[32-33]。生物炭自身拥有的较多的矿物质,施加到土壤中可以增加土壤养分,但施炭量过高可能导致对土壤氮的固定,减少无机氮的含量,降低土壤速效养分的有效性^[34],由此推测施炭量对土壤养分的影响并不是随着施用年限的增加而增加,它们之间可能存在明显的交互作用^[31]。下一步有必要针对河套灌区盐碱地,揭示亏缺灌溉条件下生物炭施用年限对土壤速效养分有效性的影响机制,为盐渍化灌区秸秆生物炭的田间优化管理和土壤养分资源的高效利用提供科学依据。

3.3 灌水量和生物炭用量对玉米产量和水氮利用效率的影响

在不同灌水下限条件下,试验当年一次性施用生物炭均不同程度地促进当年和翌年的玉米地上部营养生长(图 5),提高玉米干物质重和产量(表 2),这与已有研究^[2,5-6,8]结果基本一致。主要原因可能是试验田为中度盐碱化土壤,耕层土壤有机质、速效氮含量较缺乏(表 1),施用生物炭改善土壤理化条件,提高土壤有机质和土壤速效氮含量(图 3 和图 4),而土壤有机质和土壤速效氮含量与作物地上部生长、产量及肥料利用效率密切相关^[10,30],因此添加生物炭可以作为促进中度盐碱地玉米生长和肥料利用效率的农艺技术措施(表 2)。

生物炭用量和不同灌水下限对玉米产量构成要素普遍无显著的交互作用(表 2),说明当前试验条件

下 2 个试验因素均能对玉米产量形成产生不同程度的促进作用。连续 2 年的灌水下限处理(W25、W35),生物炭施用后玉米粒重变化不明显,玉米产量不同程度增加,且增加的原因主要归功于穗粒数的增加,可能原因是生物炭应用后增加玉米花粉活力,促进玉米结实率,在保持较高玉米粒重的基础上增加穗粒数。由于同一灌水水平下生物炭处理后的玉米产量明显增加,因此灌溉水分利用效率也相应增加(9.3%~9.9%),Li 等^[15]研究发现,滴灌覆膜亏缺灌溉下,连续 2 年施用生物炭使番茄水分利用效率提高 15%左右。相比而言,W25 和 W35 条件下生物炭处理的灌溉水利用效率较高,可能原因是亏缺灌溉条件下施用生物炭不同程度地提高土壤的蓄水保水能力,改善土壤水分条件(图 2),灌溉量减少,同时也提高土壤碱解氮和有机质含量(图 3 和图 4),促进了作物根系的生长^[9],作物对养分的吸收能力(图 5)和光合能力增强,作物干物质重和产量增加(表 2)。尽管同一灌溉水平下 B30 处理的水氮利用效率高于 B15 处理,但普遍无显著差异。这与其他研究^[7,9]结果相似。从较高的产量、较少的灌水量和较少的生物炭投入量进行综合分析,W35B15(土壤基质势达到灌水下限—35 kPa、生物炭用量 15 t/hm²)的综合效果更优,为建议的灌溉定额和生物炭用量。

4 结 论

在河套灌区通过连续 2 年的田间小区原位控制试验研究发现,膜下滴灌不同灌水下限(—15,—25,—35 kPa)一次性施用玉米秸秆生物炭(15,30 t/hm²)均普遍提高玉米全生育期表层土壤含水率、有机质和碱解氮含量,促进玉米地上部形态指标生长,增加作物产量、灌溉水利用效率和氮肥偏生产力。相比而言,同一灌水下限低量生物炭处理的节水增产提效效果普遍优于高量生物炭处理。不同灌水下限施用生物炭后玉米产量的增加的原因主要是由穗粒数的增加引起的。河套灌区盐碱地膜下滴灌玉米生育期建议采用灌水下限—35 kPa(灌水定额为 22.5 mm)和施用生物炭 15 t/hm²的制度,以提高土壤肥力,促进作物生长,增加水氮利用效率。

参考文献:

[1] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(8):1-7.

[2] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.

[3] 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.

[4] Cha J S, Park S H, Jung, S C, et al. Production and utilization of biochar: A review[J].Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2016,40:1-15.

[5] 王淑君,夏桂敏,李永发,等.生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):285-290.

[6] 阚正荣,刘鹏,李超,等.施用生物炭对华北平原土壤水分和夏玉米生长发育的影响[J].玉米科学,2019,27(1):142-150.

[7] 黄明逸,张展羽,翟亚明,等.咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(21):88-96.

[8] 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.

[9] 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):2187-2193.

[10] Yang W, Feng G, Miles D, et al. Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching[J]. Science of Total Environment,2020,729:e138752.

[11] 王悦满,高倩,薛利红,等.生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(1):58-65.

[12] Zahra M B, Aftab Zill-E-Huma, Haider M S. Water productivity, yield and agronomic attributes of maize crop in response to varied irrigation levels and biochar-compost application[J].Journal of the Science and Food Agriculture,2021,101(11):4591-4604.

[13] Yadav V, Jain S, Mishra P, et al. Amelioration in nutrient mineralization and microbial activities of sandy loam soil by short term field aged biochar[J].Applied Soil Ecology,2019,138:144-155.

[14] Wang C, Liu J Y, Shen J L, et al. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: A 4-year field experiment[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2018,262:83-96.

[15] Li C J, Xiong Y W, Qu Z Y, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China[J].Geoderma,2018,331:100-108.

[16] Zhang C, Li X Y, Yan H F, et al. Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse

- tomato[J].Agricultural Water Management,2020,241:e106263.
- [17] Kang H Y, Chen M, Wan S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var.ceratina Kulesh) in North China Plain[J].Agricultural Water Management,2010,97(9):1303-1309.
- [18] 高利华,屈忠义.膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J].土壤,2017,49(3):614-620.
- [19] Haider G, Steffens D, Moser G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2017,237:80-94.
- [20] Kannan P, Paramasivan M, Marimuthu S, et al. Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo* L. growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2021,308:e107258.
- [21] Yu L Q, Tang J, Zhang R D, et al. Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture levels[J].Biology and Fertility of Soils,2013,49(2):119-128.
- [22] 王宣茗,王丽学,苏旭,等.生物炭陈化对玉米产量及土壤水肥的影响[J].生态学杂志,2022,41(8):1570-1579.
- [23] Hardie M, Clothier B, Bound S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J].Plant and Soil,2014,376(1):347-361.
- [24] Gholami L, Karimi N, Kavian A. Soil and water conservation using biochar and various soil moisture in laboratory conditions[J].Catena,2019,182:e104151.
- [25] Whitman T, Singh B P, Zimmerman A R, et al. Priming effects in biochar-amended soils; Implications of biochar-soil organic matter interactions for carbon storage[J].Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation,2015,2:455-488.
- [26] Fatima S, Riaz M, Al-Wabel M I, et al. Higher biochar rate strongly reduced decomposition of soil organic matter to enhance C and N sequestration in nutrient-poor alkaline calcareous soil[J].Journal of Soils and Sediments,2021,21(1):148-162.
- [27] Cooper J, Greenberg I, Ludwig B, et al. Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2020,295:e106882.
- [28] 郑健,李欣怡,马静,等.秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(5):1111-1121.
- [29] Sorrenti G, Muzzi E, Toselli M. Root growth dynamic and plant performance of nectarine trees amended with biochar and compost[J].Scientia Horticulturae,2019,257:e108710.
- [30] Liu T B, Li H L, Li H B, et al. Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching [J].GCB Bioenergy,2021,13(1):257-268.
- [31] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):285-294.
- [32] Yang W, Jia Y L, Feng G, et al. Residual effect of single biochar application on soil nutrients availability and fertilizer productivity in a mulched drip-irrigated corn field[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2022,3:431-439.
- [33] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对坡耕地土壤肥力和大豆产量的影响与预测[J].农业机械学报,2019,50(7):302-312.
- [34] Nguyen T T N, Xu C Y, Tahmasbian I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J].Geoderma,2017,288:79-96.