

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.004

优化井渠轮灌下秸秆覆盖对夏玉米根系分布与产量影响

张万锋¹ 杨树青¹ 潘春洋² 鄂继芳¹ 娄帅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. 内蒙古绰勒水利水电有限责任公司, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究夏玉米根系分布及产量对优化井渠轮灌模式下秸秆覆盖的动态响应, 设置“渠井渠”灌溉模式下常规覆膜(FM)、秸秆表覆(BF)和秸秆深埋(SM), 全渠水灌溉的常规覆膜为对照(CK)4种处理, 于2018年和2019年在河套灌区开展了不同耕作模式田间试验。结果表明, CK处理夏玉米根系分布呈浅宽型, 根长密度随土层加深而降低, 根长密度集中点在表层0~20 cm; 优化井渠轮灌模式下, 常规覆膜(FM)根长密度集中点在10~30 cm, 提高深层根长密度不显著; 秸秆覆盖显著提高根长密度($P < 0.05$), BF处理根系呈宽浅型分布, 根长密度集中点在0~20 cm, 较CK处理的0~20 cm土层根长密度提高19.6% ($P < 0.05$); SM处理根系呈深扎型分布, 根长密度集中点下移至20~40 cm, 显著提高大于40 cm土层根长密度, 较CK提高91.7% ($P < 0.05$); 各处理水平方向根长密度近似呈以植株为中心的标准正态分布, 分布半径约15 cm; 优化井渠轮灌模式显著降低夏玉米生育期耗水和提高水分利用效率($P < 0.05$), 但FM和BF较CK平均减产10.1%和1.3%; SM综合效果更佳, 较CK平均增产8.9%, 水分利用效率平均提高41.4%。该研究可为河套灌区合理安全利用地下微咸水资源、丰富井渠轮灌理论体系及节水增产提供借鉴。

关键词: 夏玉米; 秸秆覆盖; 咸淡水; 轮灌; 根系; 产量

中图分类号: S513; S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0025-09

Effects of Straw Mulching under Optimized Alternate Irrigation of Well-canal on Root Distribution and Yield of Summer Maize

ZHANG Wanfang¹ YANG Shuqing¹ PAN Chunyang² E Jifang¹ LOU Shuai¹

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

2. Inner Mongolia Chaole Water Conservancy and Hydropower Co., Ltd., Huhhot 010018, China)

Abstract: To explore the dynamic response of root distribution and yield of summer maize to straw mulching under the optimized alternate irrigation of well-canal model, field experiments were conducted in Hetao Irrigated District in 2018 and 2019 under different tillage modes. The experiment consisted of four different treatments. It included conventional mulching (FM treatment), straw surface covering (BF treatment) and straw deep buried (SM treatment) under the irrigation mode of canal-well-canal, and the conventional mulching (CK treatment) under the irrigation of the whole canal. The results showed that the root distribution of summer maize under conventional tillage CK was shallow and wide, the root length density was decreased with the deepening of soil layer, and the root length concentration point was 0~20 cm in the soil layer. Under the optimized alternate irrigation of well-canal model, the concentration point of the conventional mulching FM treatment of root length density was 10~30 cm soil layer, which could not significantly improve the root length of the soil layer. Straw mulching significantly increased root length density, the root distribution of BF treatment was similar to CK, and the surface root length density was increased by 19.6% compared with that of CK. The root distribution of SM treatment was a deep and sticking type, and the root length concentration point was moved down to the 20~40 cm soil layer. With the deepening of soil layer, root length density of SM was firstly increased and then decreased, which significantly increased the root length density of soil layer greater than 40 cm, and it was increased by 91.7% compared with that of CK. The root length density in the horizontal direction of each treatments

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669019)和国家自然科学基金重点项目(51539005)

作者简介: 张万锋(1985—),男,博士生,高级工程师,主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究, E-mail: z.wf123@163.com

通信作者: 杨树青(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究, E-mail: nmndysq@126.com

presented a standard normal distribution approximately centered on the plant, with a distribution radius of about 15 cm. The optimized alternate irrigation of well-canal model significantly reduced water consumption and increased water use efficiency in the growth period of summer maize, but the yield of summer maize under FM and BF treatments was decreased by 10.1% and 1.3% on average compared with that of CK. The SM treatment had a better comprehensive effect, which increased summer maize yield by 8.9% and water use efficiency by 41.4% on average compared with CK. The research could provide some references for rational and safe utilization of brackish underground water resources, enriching the theoretical system of well-canal alternate irrigation, and saving water for agriculture and increasing crop yield in Hetao Irrigation District.

Key words: summer maize; straw mulching; fresh and brackish water; alternate irrigation; roots; yield

0 引言

河套灌区是中国重要的粮食生产基地,但灌区淡水资源贫乏,引黄水量锐减,严重制约着灌区现代农业的可持续发展。灌区分布着丰富的地下微咸水资源,合理开发利用地下水资源,可提高水资源利用率,并有效地缓解灌区淡水资源的缺乏^[1]。目前针对不同作物在灌区开展了咸淡水交替灌溉^[2]、单一地下水灌溉^[3]、井渠轮灌^[4]等试验,分析了微咸水对作物生长发育及产量、土壤水盐运移等方面的影响,结果表明,采用微咸水灌溉时,应配套相应的技术措施,制定合理的灌溉制度^[5],微咸水一定程度上刺激作物生长^[6],提高作物产量,节约淡水资源^[7]。根是作物吸收水分养分最活跃的器官,适宜根系分布是提高作物产量的关键^[8]。作物根系与植株是一个统一体,二者相互依赖又相互影响^[9],微咸水灌溉增加土壤含盐量,根系是首先被危害的营养器官^[10],同时不合理耕作模式导致土壤压实度增加,影响作物根系的正常生长,根冠发育失衡^[11-12],最终造成作物产量下降。因此研究井渠轮灌模式作物根系分布有助于改进作物种植模式及制定合理的微咸水灌溉制度。合理的耕作措施可改善土壤水盐分布^[13],为作物生长创造适宜的生长微环境,研究表明秸秆还田耕作措施改善土壤理化性质,提高有机质含量,优化农田生态环境^[14],减轻因耕作带来的土壤侵蚀^[15],提高旱地作物产量^[16]。同时,秸秆深埋可抑制耕作层返盐,淡化根系层,提高大于40 cm土层根长密度^[17],有效提高作物的水分利用效率^[18]。关于咸淡轮灌结合秸秆覆盖模式的研究也有相关报道,本团队研究结果表明该模式可显著提高夏玉米生长指标,具有较好的蓄水控盐效果^[19];同时能够减少棵间蒸发,降低作物根区积盐^[20];小麦初期灌溉淡水,中后期灌溉微咸水,可达到稳产提效的目的^[21]。

目前,前人研究大多集中在咸淡水轮灌或秸秆覆盖对作物生长及土壤水盐运移等方面的影响,而

关于井渠轮灌模式下不同秸秆覆盖方式对作物根系分布、水分利用效率及根系调控响应的研究鲜有报道。本试验基于井渠轮灌模式结合秸秆覆盖的根系对地上部植株调控作用的角度,于2018年和2019年在河套灌区开展田间试验,探究不同耕作模式下夏玉米根系分布、水分利用效率及产量的响应,以期丰富井渠轮灌研究的理论体系、合理有效地利用地下微咸水资源及提高秸秆资源化利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于河套灌区中游——临河区双河镇试验示范区(40°41'N,107°18'E,海拔1 040~1 043 m),隶属永济灌域,属半干旱大陆性气候,多年平均降水量138 mm,多集中在夏秋两季,年均蒸发量高达2 332 mm,春冬地表返盐较严重,该地区光、热、水同期,无霜期130 d左右。试验于2018年4月—2019年10月开展。据美国土壤质地三角图,试验区0~100 cm土体的砂粒、粉粒、粘粒质量比为8:15:2,为粉砂壤土,平均田间持水率为22.57%。2018年和2019年示范区夏玉米生育期的日降雨量及温度变化如图1所示。

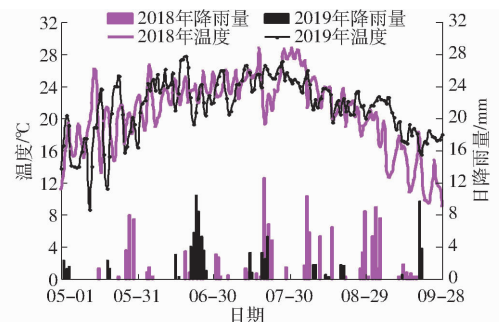


图1 2018年和2019年夏玉米生育期日降雨量和温度
Fig. 1 Daily rainfall and temperature during growing periods of summer maize in 2018 and 2019

1.2 试验设计

试验设优化井渠轮灌模式^[19]——“渠井渠”下

秸秆表覆(BF)、秸秆深埋(SM)和常规覆膜(FM),以生育期全渠水灌溉的常规覆膜为对照(CK)的4种处理,3个重复,共12个小区,试验小区面积72 m²,小区间有宽2 m的保护带,四周用埋深1.2 m的聚乙烯塑料膜隔开,顶部留30 cm,防止水肥互窜,田间管理与当地农户管理一致。播种前浅耙整平,各处理采用统一施肥水平(施氮量225 kg/hm²、施磷量150 kg/hm²),50%肥料在播种时作为基肥施入,其余分别在第1次灌水前和第2次灌水前平分施

入;各处理在夏玉米生育期灌3次水,其中CK全灌渠水,其他处理采用本团队已优化的灌溉制度“渠井渠”模式灌溉,井水矿化度为2.0~2.5 g/L,渠水矿化度为0.608 g/L,具体试验处理如表1所示。SM处理在2017年秋浇前深翻并人工埋设5 cm厚秸秆层后整平压实;BF处理在播种后随即将5 cm厚秸秆均匀铺设在垄间。供试夏玉米品种是钧凯918,机械播种,株距0.35 m,行距0.45 m,4月底播种,10月初收获。

表 1 试验处理

Tab.1 Treatments of experiment

处理	轮灌顺序			具体描述
	拔节期	抽雄期	灌浆期	
CK	Q	Q	Q	秋收后翻耕约25 cm,第2年浅耙压实、覆膜种植,灌溉3次渠水,单次135 mm
FM	Q	J	Q	秋收后翻耕约25 cm,第2年浅耙压实、覆膜种植,灌溉2次渠水,1次井水,单次90 mm
BF	Q	J	Q	秋收后翻耕约25 cm,第2年浅耙压实、覆膜种植后垄间表覆5 cm厚秸秆,灌溉2次渠水,1次井水,单次90 mm
SM	Q	J	Q	秋收后深翻约35 cm,人工铺设5 cm厚秸秆,第2年浅耙压实、覆膜种植,灌溉2次渠水,1次井水,单次90 mm

注:Q表示灌溉渠水,取自黄河水;J表示灌溉井水,取自地下微咸水。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 考种测产

夏玉米收获后,对玉米进行考种,每个小区随机取10株夏玉米,测量穗长、穗粗等指标,对收获的籽粒随机选取100粒进行称量,3个重复,取3次测量结果的平均值为百粒质量;夏玉米籽粒干燥后称总质量并计算单位面积产量。

1.3.2 水分利用效率

在夏玉米各生育期分层取土样,为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm共5层,用干燥法测量各层土壤含水率。作物耗水量(Evaporation and transpiration, ET)的计算式为

$$ET = P + I + W_g - D - R - \Delta W \quad (1)$$

式中 ET ——作物耗水量,mm

P ——生育期降雨量,mm

I ——生育期夏玉米灌溉量,mm

W_g ——生育期地下水补给量,mm

D ——渗漏水量,mm,该农业示范区地下水位较高,地下水补给量远大于渗漏水量,因此渗漏水量可忽略不计

R ——地表径流量,mm,该农业示范区地面平坦,无地表径流, R 可忽略

ΔW ——试验初期到末期土壤储水量的变化量,mm

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)计算式为

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中 WUE ——灌溉水分利用效率,kg/(hm²·mm)

Y ——夏玉米产量,kg/hm²

1.3.3 夏玉米根系取样

夏玉米拔节期、吐丝期和成熟期,各处理分别随机选取3株代表性夏玉米植株,采用土壤剖面挖根法取根,收取夏玉米根系样品。以夏玉米植株为中心,垂向取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm和40~60 cm土层间根系;水平向宽行20 cm和窄行15 cm土层范围,每隔5 cm取根,分别将各分块土层中所有根系取出,清洗干净后用滤纸吸干水分并自然风干,装入自封袋干燥保存。采用Epson Perfection 4870型根系扫描仪对根样品扫描,并用根系专用分析软件Win RHIZO Program分析根长、根表面积等相关指标。将扫描后的根系置于80℃干燥至恒定质量后称量,使用1/1000电子天平称量根干质量。

1.4 数据统计分析

试验数据采用Excel 2010处理,应用SPSS 20.0进行方差分析,采用最小显著差异法(Least significant difference method, LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 各生育期夏玉米根系的垂直分布规律

根长密度(Root length density, RLD)是反映作

物根系空间分布的重要参数,也是作物吸收养分的重要指标。优化井渠轮灌下秸秆覆盖对夏玉米平均RLD在垂直方向分布的影响如图2所示。拔节期各

处理对夏玉米RLD影响差异不明显。随着土层加深,各处理RLD逐渐降低,主要集中在0~20 cm土层,BF处理在0~20 cm的RLD最大,较CK提高7.7%。

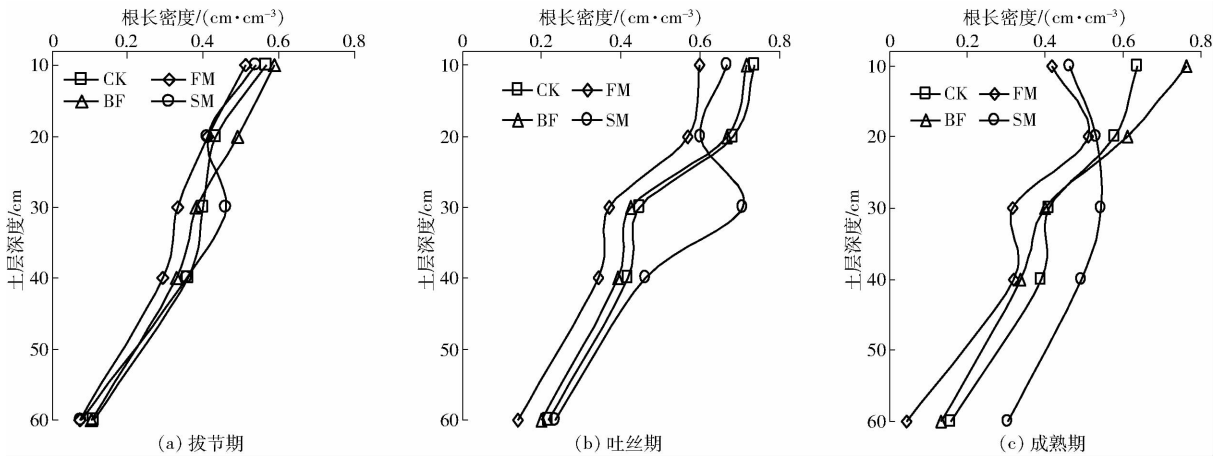


图2 各处理的夏玉米生育期根长密度垂直分布

Fig.2 Vertical distributions of RLD during summer maize period under different treatments

到了吐丝期,秸秆覆盖、灌水量及水质对夏玉米RLD的影响差异显著。CK第2次灌溉渠水,且灌水量较大,显著提高各土层RLD,垂向分布差异较大,RLD主要集中在0~10 cm土层,较拔节期提高;其他处理第2次灌溉井水,灌水量为90 mm,FM处理0~20 cm土层RLD提高幅度较小,在大于20 cm土层的RLD增幅较大,RLD集中点下移,主要集中在10~20 cm土层;BF处理各土层RLD变化趋势与CK类似,但0~20 cm土层的RLD较CK平均提高9.8%,说明秸秆覆盖下灌溉井水可提高表层RLD,趋向形成浅层根系;SM处理各土层RLD均提高,随土层加深呈先增后降的趋势,RLD集中点下移,主要集中在20~30 cm土层,较CK提高58.2%,同时显著提高大于40 cm土层RLD,平均值较CK提高7.1%,说明秸秆深埋下灌溉井水可提高大于40 cm土层的RLD,趋向形成深扎型根系。

各处理第3次均灌溉渠水,成熟期各处理夏玉米RLD分布差异显著。FM处理各土层RLD较吐丝期降低,主要集中在10~20 cm土层,大于40 cm土层的RLD大幅下降,且远小于CK;CK各土层RLD有所下降,RLD分布主要集中在0~10 cm,与BF处理趋势类似,但BF处理的0~10 cm土层RLD在成熟期有增大的趋势,较CK提高19.6%;SM处理在成熟期RLD随土层加深呈先增后降趋势,RLD分布集中点下移,主要集中在30~40 cm,特别是大于40 cm土层RLD增幅达29.7%,较CK提高91.7%。

为进一步确定夏玉米根系的主要分布深度,将各土层RLD进行逐层累积,并求得逐层累积RLD占0~60 cm土层的根长总密度比例,分析各土层

RLD逐层累积比例的垂向变化趋势,结果如图3所示。拔节期,各处理均灌溉渠水,在0~40 cm土层RLD比例均达到95.5%以上,无显著差异,BF处理逐层累积RLD比例最高,为98.5%。吐丝期CK第2次灌溉渠水,且灌水量较大,显著提高0~10 cm土层的逐层累积RLD比例,其他处理第2次灌溉井水,逐层累积RLD比例提高差异显著,BF处理显著提高0~10 cm土层累积RLD比例,FM显著提高10~20 cm土层累积RLD比例,而SM显著提高大于40 cm土层累积RLD比例,与拔节期相比,CK和FM在0~40 cm土层逐层累积RLD比例达到95.1%以上,而BF和SM逐层累积RLD比例达到95%以上的土层为大于40 cm土层,且SM较BF土层更深。灌浆期第3次均灌溉渠水,CK、FM和BF处理在0~40 cm土层逐层累积RLD比例有所增加,达到97.4%以上,而SM处理有所下降,但SM处理提高了大于40 cm土层的累积RLD比例,达到16.3%,远大于其他处理。

用各土层中根干质量比例来描述夏玉米根系垂直分布是研究根系常用的方法^[6,8],如图4所示。结果表明各生育期夏玉米各土层根干质量比例在0~10 cm土层最大,为45.6%~70.7%,随着生育期推移表层根干质量比例有所下降,BF处理下降幅度最小;0~20 cm土层内根干质量比例变化最明显,随土层加深,逐渐趋于稳定。说明较大灌水定额易于形成浅根系,秸秆表覆在优化灌溉定额下能够促进浅层根系生长,而秸秆深埋利于形成深层根系。

2.2 各生育期夏玉米根系的水平分布

各处理夏玉米RLD在水平方向分布如图5所示。夏玉米各生育期,水平向RLD在植株下方最

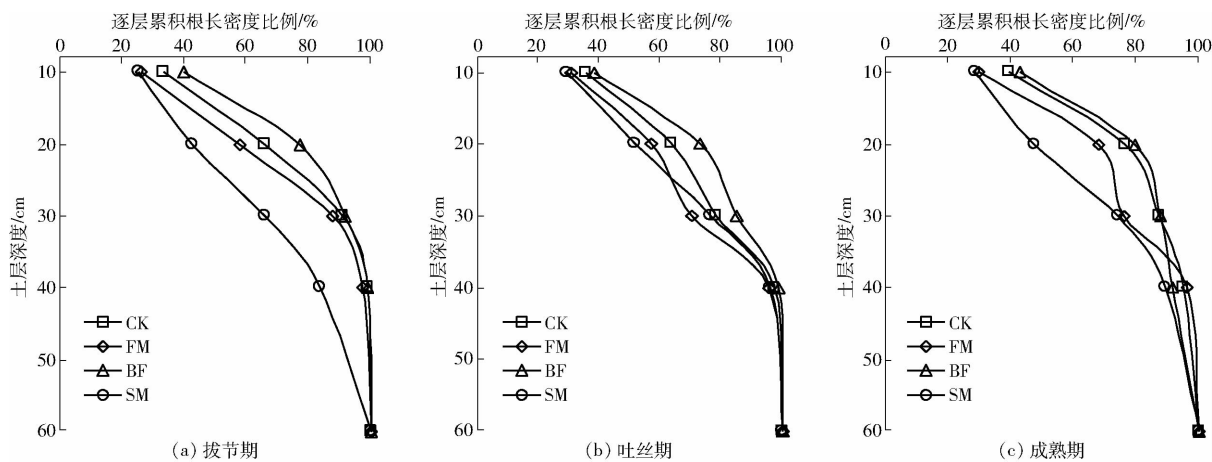


图 3 夏玉米生育期各处理逐层累积根长密度比例变化曲线

Fig. 3 Accumulated ratio of RLD during summer maize period under different treatments

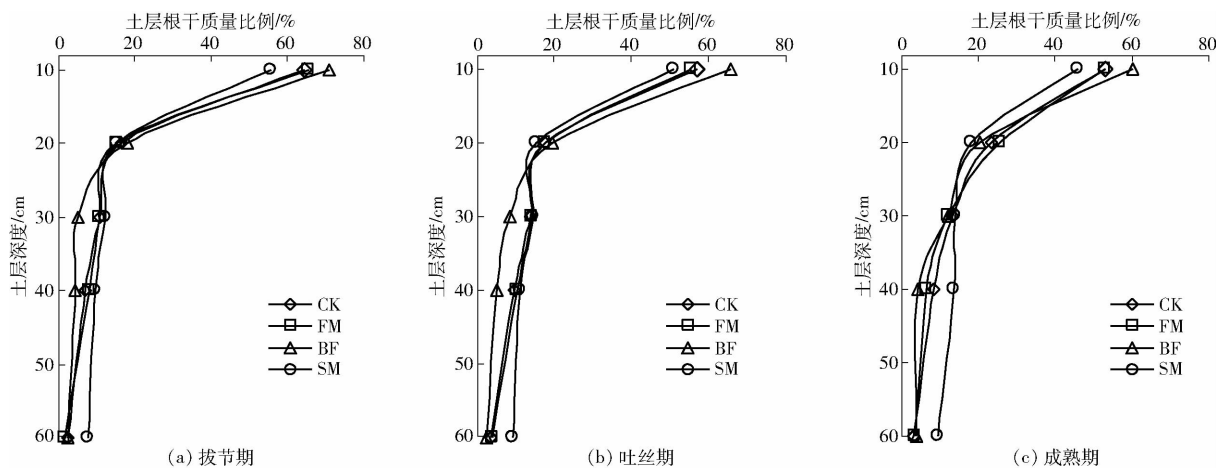


图 4 夏玉米生育期各处理土层根干质量比例垂直分布

Fig. 4 Vertical distributions of root dry weight ratio of each soil layer under different treatments during summer maize period

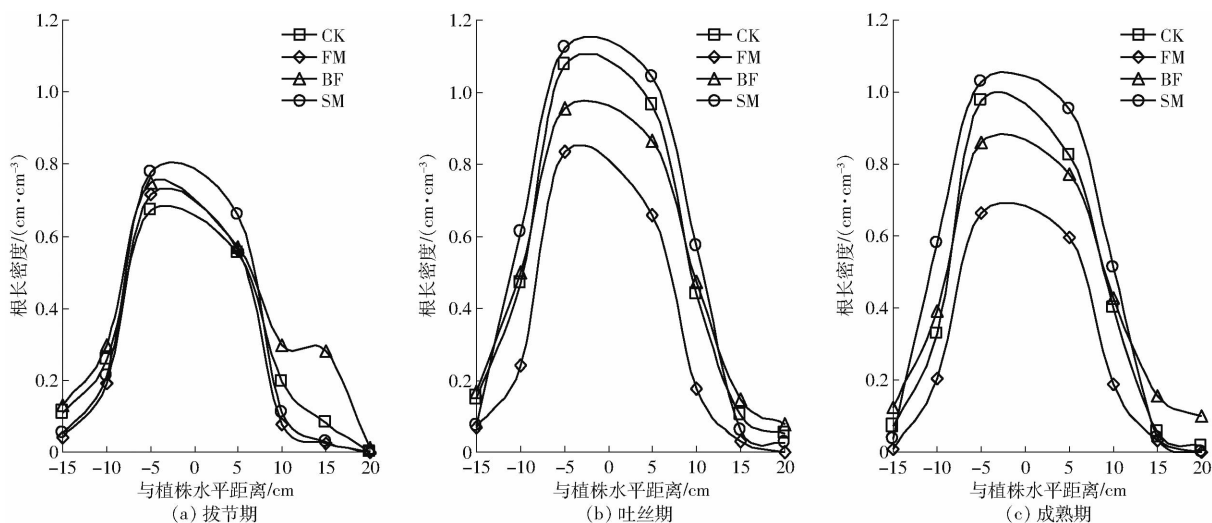


图 5 各处理夏玉米生育期根长密度水平分布

Fig. 5 Horizontal distributions of RLD during summer maize period under different treatments

大,随着与植株距离增大而递减。夏玉米 RLD 在窄行段 (-15 ~ 0 cm) 略大于宽行段 (0 ~ 20 cm), 随着生育期推移这种差异逐渐减小, 窄宽行的 RLD 比重趋于相等, 水平方向 RLD 分布宽度有所增大, 近似呈以植株为中心的标准正态分布, 分布半径约

15 cm。各处理在靠近植株下方的 RLD 有所降低, 说明随着生育期推移, 夏玉米根系由紧凑型向稀松型发展, 且 CK 处理靠近植株下方的 RLD 比例下降幅度最大, 为 14.9%, 成熟期 CK 根系呈浅宽型分布; SM 处理靠近植株下方的 RLD 比例下降幅度最小,

为 3.6%,成熟期 SM 根系呈深扎型分布,这与前面分析 SM 处理显著提高大于 40 cm 土层 RLD 一致。FM 和 BF 处理根系分布类型介于二者之间,BF 根系分布与 CK 更类似。

2.3 各处理对夏玉米产量及水分利用效率的影响

夏玉米产量及其相关指标、水分利用效率(WUE)等指标是对夏玉米生长性状影响的最终体现(表 2)。除 SM 处理,其余 3 个处理的穗长、穗粗差异不显著,SM 的穗长和穗粗较 CK 平均提高 7.5% 和 9.6% ($P < 0.05$);2018 年 CK、FM 和 BF 的百粒质量无差异,但较 SM 显著降低,2019 年各处理百粒质量差异显著,且较 2018 年降低 2.6% ~ 8.8%,SM 处理的百粒质量较 CK 平均提高 14.1%;2018 年 CK、FM 和 BF 的产量差异不显著,2019 年 CK 和 BF 产量无差异,与 FM 和 SM 差异显著,较

2018 年平均减产 2.8% ~ 8.1%,SM 减产最少;FM 和 BF 较 CK 平均减产 10.1% 和 1.3%,SM 较 CK 平均增产 8.9% ($P < 0.05$)。从夏玉米生育期耗水量(ET)和灌溉水利用效率(WUE)看,FM、BF 和 SM 的夏玉米生育期 ET 较 CK 平均降低 23.8%、26.8% 和 22.7% ($P < 0.05$),但 3 个处理间无差异;各处理 WUE 差异显著,FM、BF 和 SM 较 CK 平均提高 18.3%、35.0% 和 41.4%。分析表明优化井渠轮灌模式可有效降低 ET 和提高 WUE,但会造成减产,而结合秸秆覆盖耕作模式可实现稳产提效的目标。另外,2019 年各处理夏玉米 ET 较 2018 年降低 14.6% ~ 18.2%,且 WUE 显著提高 10.8% ~ 18.7%,以 SM 处理效果较佳。说明在夏玉米稳产的基础上,秸秆深埋耕作措施可显著提高 WUE,在少雨年份(2019 年)效果更好。

表 2 不同处理对夏玉米产量、耗水量及水分利用效率的影响

Tab. 2 Effects of different treatments on yield, ET and WUE of summer maize

年份	处理	穗长/cm	穗粗/cm	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	耗水量/mm	WUE/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2018	CK	(22.8 ± 1.1) ^b	(5.3 ± 0.03) ^a	(38.9 ± 1.9) ^b	(13 097.6 ± 654.9) ^{ab}	(621.8 ± 31.1) ^a	(21.1 ± 1.05) ^c
	FM	(21.0 ± 1.1) ^{ab}	(5.2 ± 0.03) ^a	(36.1 ± 1.8) ^b	(11 951.0 ± 597.6) ^b	(482.6 ± 24.1) ^b	(24.8 ± 1.25) ^b
	BF	(22.9 ± 1.1) ^{ab}	(5.4 ± 0.03) ^a	(38.5 ± 1.9) ^b	(12 965.0 ± 648.3) ^{ab}	(458.2 ± 22.9) ^b	(28.3 ± 1.40) ^a
	SM	(24.0 ± 1.2) ^a	(5.8 ± 0.03) ^a	(45.2 ± 2.3) ^a	(14 074.5 ± 703.7) ^a	(490.2 ± 24.5) ^b	(28.7 ± 1.40) ^a
2019	CK	(21.4 ± 1.1) ^b	(5.1 ± 0.03) ^{ab}	(36.9 ± 1.8) ^{bc}	(12 395.2 ± 619.8) ^b	(531.3 ± 26.6) ^a	(23.3 ± 1.15) ^d
	FM	(19.7 ± 1.0) ^b	(4.9 ± 0.02) ^b	(33.7 ± 1.7) ^c	(10 997.3 ± 549.9) ^c	(396.0 ± 19.8) ^b	(27.8 ± 1.40) ^c
	BF	(20.8 ± 1.0) ^b	(5.2 ± 0.03) ^{ab}	(37.5 ± 1.9) ^b	(12 193.6 ± 609.7) ^b	(385.4 ± 19.3) ^b	(31.6 ± 1.55) ^b
	SM	(23.5 ± 1.2) ^a	(5.6 ± 0.03) ^a	(41.2 ± 2.1) ^a	(13 674.5 ± 683.7) ^a	(401.1 ± 20.1) ^b	(34.1 ± 1.70) ^a

注:同列右上角的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

微咸水灌溉促进土壤颗粒紊凝,增大土壤渗透性,降低土壤持水能力^[22-23],导致土壤积盐,产生盐分胁迫抑制作物根系吸收水分养分,严重的会产生“生理干旱”,导致作物枯死减产^[24-25]。研究表明,微咸水结合秸秆覆盖有效抑制微咸水灌溉后土壤盐分表聚,减轻根层盐分胁迫,保证微咸水灌溉安全^[26]。本试验采用的优化井渠灌溉模式与朱成立等^[2]结论有差异,可能因为试验区地理位置、井水水质及灌溉时间等因素差异造成的。土壤盐分胁迫对作物的影响,首先反映在根系生长发育状态^[27]。结果表明,常规全渠水灌溉 CK 处理根系分布趋向宽浅型,整个生育期根系集中在 0 ~ 20 cm 土层,成熟期在大于 40 cm 土层分布较少,根干质量比例仅为 4.5%;优化井渠轮灌模式下,夏玉米抽雄期灌溉井水,FM 处理各土层 RLD 提高效果不显著;BF 处理 0 ~ 20 cm 土层的 RLD 较 CK 提高 9.8% ($P < 0.05$),而 SM 处理显著提高大于 40 cm 土层根长密

度,较 CK 提高 7.1% ($P < 0.05$),第 2 次灌溉井水对根系生长产生有利的影响,在一定程度促进根系生长。因为本试验井水矿化度为 2.0 ~ 2.5 g/L,矿化度较低,第 2 次灌溉井水是在夏玉米抽雄期,此时夏玉米已从营养体生长逐渐转为生殖生长,夏玉米抗盐分胁迫能力增强,且秸秆覆盖能够保墒蓄水,使得井水带入的盐分对 BF 和 SM 处理的夏玉米造成影响有限,且在轻微盐分胁迫下,井水中含有的微量元素在一定程度上能够刺激夏玉米根系生长发育^[6,28],BF 与 CK 根系分布类似,显著提高表层 RLD,而 SM 显著提高大于 40 cm 土层 RLD。

各处理夏玉米第 3 次灌溉渠水,是在灌浆期灌溉,此时缓解了因第 2 次灌溉井水带来盐分胁迫的不利影响。结果表明,成熟期 FM 处理的 RLD 集中点有下移趋势,集中在 10 ~ 30 cm 土层;BF 处理的 RLD 分布与 CK 类似,主要集中在 0 ~ 20 cm 土层,该土层的 RLD 较 CK 处理提高 19.6% ($P < 0.05$);成熟期 SM 处理 RLD 集中点下移,集中在 20 ~ 40 cm,较 CK 显著提高大于 40 cm 土层 RLD,提高约

91.7% ($P < 0.05$)。因为第 2、3 次灌溉间隔较短,在第 3 次灌溉渠水下,大量盐分渗入到深层土壤,增加深层土壤含盐量^[29],而此时夏玉米又处于大量需水阶段,植株蒸腾量大,深层土壤盐分随土壤水蒸发上移,在根层逐渐累积,产生盐分胁迫,抑制根系生长和吸收水分养分,进而影响夏玉米中后期的生殖生长,而秸秆表覆(BF)可减少土壤蒸发并缓解盐分表聚,促进表层根系生长;秸秆深埋(SM)形成的秸秆隔层抑制深层盐分上移,淡化根层,提高秸秆隔层含水率,促进深层根系生长。水平方向上,夏玉米 RLD 在窄行段(-15~0 cm)较宽行段大(0~20 cm),这种差异是根向水性造成的^[30]。随生育期推移这种差异逐渐变小,近似呈以植株为中心的对称分布,分布半径约 15 cm。

相关研究表明,夏玉米理想根构模型特点是深分布、多侧根、高根长密度^[31]。深层根的增多对缓解土壤干旱具有重要的意义,在干旱条件下,根系下扎深度是植株生长的重要指标^[32-33],且深层根系与作物产量和水分利用效率密切相关。本试验在优化井渠轮灌模式下,常规覆膜(FM)提高大于 40 cm 土层的 RLD 不显著,较 CK 减产 10.1%;秸秆表覆(BF)显著提高表层 RLD,对提高大于 40 cm 土层的 RLD 效果不显著,形成宽浅型根系分布,较 CK 减产 1.3%,水分利用效率提高 35.0% ($P < 0.05$);秸秆深埋(SM)形成的隔层抑制深层盐分上移,淡化根层,提高隔层持水量,诱导夏玉米根系下扎^[34],减少

表层根系冗余,较 CK 处理提高大于 40 cm 土层根长密度 91.7% ($P < 0.05$),形成深扎型根系,较 CK 平均增产 8.9%,水分利用效率平均提高 41.4%,效果较佳。另外,夏玉米生育后期,CK 和 FM 处理的施肥肥效已基本耗尽,土壤中养分不足,影响夏玉米后期生殖生长,而粉碎玉米秸秆作为一种缓释有机肥^[35],BF 和 SM 处理在夏玉米中后期逐渐释放,供给夏玉米生长,实现夏玉米高产与根层养分供应平衡。因此,优化井渠轮灌模式结合秸秆深埋的根系分布近似理想根构模型,形成深扎型根系,增强深层根提水作用,充分利用深层土壤水分,提高水分利用效率,这对河套灌区灌溉节水、提高夏玉米产量及抗旱性具有积极的现实意义。

4 结论

(1)与常规耕作相比,优化井渠轮灌结合秸秆深埋耕作模式的根系分布近似理想根构模型,形成深扎型根系,在夏玉米成熟期,显著提高深层根长密度 91.7%,平均增产 8.9%,水分利用效率平均提高 41.4%。

(2)优化井渠轮灌结合秸秆深埋耕作模式可有效保障夏玉米灌溉地下微咸水的生长发育安全,改善根系空间分布,实现夏玉米高产与根层水分养分的供应平衡,提高水分利用效率。河套灌区夏玉米种植耕作可考虑优化井渠轮灌“渠井渠”下秸秆深埋的模式。

参 考 文 献

- [1] 郑九华. 咸水灌溉[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010:17-18.
- [2] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):220-228,201. ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 220-228, 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.027. (in Chinese)
- [3] 刘敏,杨树青,符鲜,等. 微咸水滴灌条件下水氮互作对枸杞生长及产量的影响[J]. 节水灌溉,2018(1):33-37. LIU Min, YANG Shuqing, FU Xian, et al. Effects of water nitrogen interaction on growth and yield of *Lycium barbarum* under brackish[J]. Water Saving Irrigation, 2018(1): 33-37. (in Chinese)
- [4] 田德龙,郭克贞,鹿海员,等. 河套灌区井渠双灌条件下主要作物灌溉制度优化[J]. 灌溉排水学报,2015,34(1):48-52. TIAN Delong, GUO Kezhen, LU Haiyuan, et al. Optimizal irrigation systems of the main crops under well-canal irrigation mode in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,34(1): 48-52. (in Chinese)
- [5] 许建新,孙文彦,李燕青,等. 秸秆还田对微咸水补灌的土壤盐分抑制及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2012(6):29-33. XU Jianxin, SUN Wenyan, LI Yanqing, et al. The effect of supplementary irrigation with slight salt water and straw returned to field on soil salt content dynamic and grain yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012(6): 29-33. (in Chinese)
- [6] 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):117-126. WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151217&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017.(in Chinese)

- [7] AISULAIMI J, VISWANATHAN M N, NAJI M, et al. Impact of irrigation on brackish groundwater lenses in North Kuwait[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 31: 75 – 90.
- [8] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 26 – 32.
LIANG Zongsuo, KANG Shaozhong, SHI Peize, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water saving benefit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 26 – 32. (in Chinese)
- [9] MARKUS L. WALTER R. Relation between maize (*Zea mays* L) leaf area and root density observed with minirhizotrons[J]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15: 131 – 141.
- [10] BATES T R, LYNCH J P. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability[J]. *Plant Cell and Environment*, 1996, 19(5): 529 – 538.
- [11] 张兴义, 隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(10): 161 – 164.
ZHANG Xingyi, SUI Yueyu. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(10): 161 – 164. (in Chinese)
- [12] TAN X, CHANG S X. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 77 – 86.
- [13] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1101 – 1107.
LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in North Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1101 – 1107. (in Chinese)
- [14] 汪可欣, 付强, 张中昊, 等. 秸秆覆盖与表土耕作对东北黑土根区土壤环境的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 131 – 137.
WANG Kexin, FU Qiang, ZHANG Zhonghao, et al. Effects of straw mulching mode and tillage methods on soil environment of root zone in northeast black soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 131 – 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160319&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.019. (in Chinese)
- [15] BEZBORODOV G A, SHADMANOV D K, MIRHASHIMOV R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 138(1 – 2): 95 – 102.
- [26] ZHAO H B, LIU J F, CHEN X W, et al. Straw mulch as an alternative to plastic film mulch; positive evidence from dry-land wheat production on the Loess Plateau[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 676: 782 – 791.
- [17] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 117 – 124.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(7): 117 – 124. (in Chinese)
- [18] 安俊朋, 李从锋, 齐华, 等. 秸秆条带还田对东北春玉米产量、土壤水氮及根系分布的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(5): 774 – 782.
AN Junpeng, LI Congfeng, QI Hua, et al. Effects of straw strip returning on spring maize yield, soil moisture, nitrogen contents and root distribution in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(5): 774 – 782. (in Chinese)
- [19] 靳亚红, 杨树青, 张万锋, 等. 秸秆与地膜覆盖方式对咸淡交替灌溉模式下水盐调控及玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 198 – 205.
JIN Yahong, YANG Shuqing, ZHANG Wanfeng, et al. Effects of straw and plastic film mulching on water-salt regulation and maize yield in alternate brackish irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2): 198 – 205. (in Chinese)
- [20] 毕远杰, 王全九, 雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油葵产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 83 – 89.
BI Yuanjie, WANG Quanjiu, XUE Jing. Effects of ground coverage measure and water quality on soil water salinity distribution and helianthus yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Supp.1): 83 – 89. (in Chinese)
- [21] 曹彩云, 郑春莲, 李伟, 等. 咸灌条件下秸秆覆盖对冬小麦生长发育的影响[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(9): 52 – 55.
CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, LI Wei, et al. Effects of straw mulching on the growth and development of winter wheat with saline water irrigation[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(9): 52 – 55. (in Chinese)
- [22] 陆培榕, 张展羽, 冯根祥, 等. 秸秆排水体埋深对盐渍土水盐分布的影响及排水抑盐效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 115 – 121.
LU Peirong, ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, et al. Effect of straw draining piece depth in soil on water-salt distribution in saline soil and its drainage-salt inhibiting performance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(5): 115 – 121. (in Chinese)
- [23] 毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 70 – 75.
BI Yuanjie, WANG Quanjiu, XUE Jing. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 70 – 75. (in Chinese)
- [24] 乔冬梅, 韩洋, 齐学斌, 等. 考虑盐分累积及冬小麦产量品质的井渠结合灌溉模式优选[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 78 – 85.
QIAO Dongmei, HAN Yang, QI Xuebin, et al. Optimization of well-canal irrigation mode considering salt accumulation and

- winter wheat yield and quality[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 78–85. (in Chinese)
- [25] WEST D W, HOFFMAN G J, FISHER M J. Photosynthesis, leaf conductance, and water relations of cowpea under saline conditions[J]. Irrigation Science, 1986, 7(3): 183–193.
- [26] PANG H C, LI Y Y, YANG J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1971–1977.
- [27] QU L Y, QURORESHI A M, KOIKE T. Root growth characteristics, biomass and nutrient dynamics of seedlings of two larch species raised under different fertilization regimes[J]. Plant and Soil, 2003(255): 293–302.
- [28] ASHRAF M. Salt tolerance of cotton: some new advances[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(1): 1–30.
- [29] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 108–114. TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 108–114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015. (in Chinese)
- [30] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 98–105. LIU Meixian, YANG Jinsong, LI Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.1): 98–105. (in Chinese)
- [31] MI G H, CHEN F J, WU Q P, et al. Ideotype root architecture for efficient nitrogen acquisition by maize in intensive cropping systems[J]. Scientia China Life Science, 2010, 53: 1369–1373.
- [32] 卫新东, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88–97. WEI Xindong, WANG Xing, WANG Youke, et al. Root distribution and water dynamics of jujube plantations in loess hilly regions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 88–97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150414&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.014. (in Chinese)
- [33] NARAYAN D. Root growth and productivity of wheat cultivars under different soil moisture condition[J]. International Journal of Ecology and Environmental Sciences, 1991, 17(1): 19–26.
- [34] BOWEN G D. Tree roots and the use of soil nutrients[M]//BOWEN G D, NAMBIAR E K S. Nutrition of plantation forests. London: Academic Press, 1984: 147–177.
- [35] 杨志谦, 王维敏. 秸秆还田后碳、氮在土壤中的积累与释放[J]. 土壤肥料, 1991(5): 43–46. YANG Zhiqian, WANG Weimin. Accumulation and release of carbon and nitrogen in soil after straw returning[J]. Soil and Fertilizer Sciences, 1991(5): 43–46. (in Chinese)

(上接第 8 页)

- [22] BORII A, CHENG Mingming, QIBIN H, et al. Salient object detection: a survey[J]. arXiv preprint arXiv, 2019: 1411.5878v6.
- [23] ZENG Weihui, LI Miao. Crop leaf disease recognition based on self-attention convolutional neural network[J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2020, 172: 105341.
- [24] XU Lele, LI Ye, XU Jinzhong, et al. Two-level attention and score consistency network for plant segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105281.
- [25] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132–7141.
- [26] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module [C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 2018: 3–19.
- [27] REZATOFIGHI R, TSOI N, SAVARESE S, et al. Generalized intersection over union: a metric and a loss for bounding box regression[J]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 658–666.
- [28] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1026–1034.
- [29] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263–7271.
- [30] ZHANG P, SU W. Statistical inference on recall, precision and average precision under random selection [C] // 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2012: 1348–1352.