

不同灌溉模式对西辽河平原玉米根系 形态特征和生理生化特性的影响

薛新伟^{1,2}, 杨恒山¹, 张瑞富¹

(1. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古自治区饲用作物工程中心, 内蒙古 通辽 028042; 2. 赤峰市农牧科学研究所, 内蒙古 赤峰 024031)

摘 要:研究了西辽河平原灌区 3 种主要灌溉方式(浅埋滴灌、膜下滴灌和传统畦灌)对玉米根系形态特征和生理生化特性的影响。采用大田对比试验,以农华 101 为供试品种,大小垄种植(小垄行距 40 cm,大垄行距 80 cm),种植密度 7.5 万株·hm⁻²,在设定的灌溉定额下(膜下滴灌和浅埋滴灌为 3 150 m³·hm⁻²、传统畦灌为 4 500 m³·hm⁻²),测定和分析了玉米根系形态和生理生化指标及籽粒产量。玉米籽粒产量浅埋滴灌和传统畦灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平,其中 2017 年分别提高了 5.75% 和 4.62%,2018 年分别提高了 13.82% 和 7.25%;根干质量 0~20 cm 土层吐丝期膜下滴灌和浅埋滴灌较传统畦灌高 15.72% 和 8.21%,二者与传统畦灌之间的差异均达显著水平,成熟期浅埋滴灌较膜下滴灌和传统畦灌分别高 10.96% 和 11.95%,且与二者之间的差异均达到了显著水平;吐丝期株间、行间根幅 10 cm 土层处以膜下滴灌最高,30 cm 土层处以浅埋滴灌最高、膜下滴灌最低,且二者间的差异达显著水平;根条数吐丝期 10 cm、20 cm 土层处以膜下滴灌最高,传统畦灌最低,二者间差异均达到了显著水平;30 cm 土层处浅埋滴灌和传统畦灌均显著高于膜下滴灌;根长在吐丝期 0~20 cm 土层以膜下滴灌最高、传统畦灌最低,成熟期以浅埋滴灌最高、膜下滴灌最低;根系 SOD、POD 活性在吐丝期 0~20 cm 土层处理间差异不显著,乳熟期以传统畦灌最高、膜下滴灌最低,二者之间差异达到显著水平;MDA 含量在 0~20 cm 土层处理间差异不显著,40~60 cm 土层膜下滴灌均显著高于浅埋滴灌和传统畦灌。浅埋滴灌处理下玉米根系生育后期 SOD、POD 活性降低较慢,MDA 含量升高较慢,使得根系在生育后期保持了较强的活力,是籽粒产量较高的主要原因。

关键词:玉米;灌溉方式;根系形态;根系生理;西辽河平原

中图分类号:S275;S513 **文献标志码:**A

Effects of different irrigation methods on root morphological and physiological biochemical characteristics of maize in the West Liaohe Plain

XUE Xinwei^{1,2}, YANG Hengshan¹, ZHANG Ruifu¹

(1. Inner Mongolia National University Agronomy, Inner Mongolia Autonomous Region Forage Crop
Engineering Technology Research Center, Tongliao, Inner Mongolia 028042, China;

2. Chifeng Institute of Agricultural and Animal Husbandry Science, Chifeng, Inner Mongolia 024031, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for regulating nitrogen and water utilization efficiency with fertigation in maize, the effects of three main irrigation methods of shallow buried drip irrigation (SBDI), traditional border irrigation (TBI) and mulched drip irrigation (MDI) on morphological, physiological and biochemical characteristics of maize roots in the irrigation area of the West Liaohe Plain were studied. In the field contrast experiment, Nonghua 101 was used as the testing maize variety, the planting mode was wide-narrow row (80 cm+40 cm), the planting density was 75 000 plants·hm⁻², and the irrigation quota was 3 150 m³·hm⁻² for SBDI and MDI, and 4 500 m³·hm⁻² for TBI. The root morphology, physiological and biochemical indexes and grain yield of maize were measured and analyzed under the condition of field contrast test. The grain yield of SBDI and TBI was all higher than that of MDI, and the difference with MDI reached a significant level, which was 5.75% and 4.62% higher in 2017 and

13.82% and 7.25% higher in 2018. During the silking stage, in the 0~20 cm soil layer, the total root weight of MDI and SBDI was 15.72% and 8.21% higher than that of TBI, respectively, and there were significant differences between SBDI, MDI and TBI. During the mature stage, SBDI was 10.96% and 11.95% higher than that of MDI and TBI, and there were significant differences between SBDI and MDI, TBI. At silking stage, the root range of MDI was the highest in 10 cm soil layer, and the root width was highest in SBDI and lowest in the MDI in 30 cm soil layer. There were significant differences between SBDI and MDI. During the silking stage, the number of roots of MDI was the highest at 10 cm and 20 cm soil layers, while TBI was the lowest, and the difference between them was significant. The number of roots for both SBDI and TBI in the soil layer of 30 cm were significantly higher than that of MDI. In the 0~20 cm soil layer, the root length of MDI was the largest, while that of TBI was the smallest at silking stage. But at mature stage the root length of SBDI was the largest, and that of MDI was the smallest. At silking stage, the SOD and POD activity of root were not significant between treatments in the 0~20 cm soil layer, and the highest was in TBI and the lowest was in the MDI at milking stage with significant differences between TBI and MDI. At silking stage the MDA content of root were not significant between treatments in 0~20 cm soil layer, but in 40~60 cm soil layer, the MDI was significantly higher than SBDI and TBI. At later growth stage, the root SOD and POD activity of SBDI decreased slowly, while the SBDA content increased slowly. The strong activity of maize roots in the late growth stage was an important physiological basis for its high yield and high efficiency.

Keywords: maize; irrigation methods; root morphology; root physiology; West Liaohe Plain

西辽河平原是我国典型的半干旱灌溉农业区,地理范围跨 $42^{\circ}18' \sim 44^{\circ}30'N$, $119^{\circ}14' \sim 123^{\circ}42'E$,总面积 5.26 万 km^2 ,其中耕地面积 1.75 万 km^2 ,是内蒙古自治区重要的商品玉米生产基地^[1]。该地区具有较好的光热资源,生产潜力大,是我国为数不多的井灌区,玉米平均单产较全国高 30% 以上^[2]。由于地表水资源缺乏、年降水量少,农业生产对地下水的依赖性大。由于传统漫灌水资源利用效率低,不仅导致高产与高效的矛盾日渐突出,农业灌溉水需求与供给失衡的矛盾也进一步加剧^[3]。近年来,滴灌水肥一体化技术在西辽河平原灌区得以大面积推广应用,使灌溉水利用效率得到大幅提高,对于缓解水资源需求的压力起到了积极作用。在水肥一体化条件下,研究不同滴灌方式下玉米根系形态特征和生理生化特性的差异,可为该条件下氮肥在土壤中的运移和分布调控提供依据,有利于提高玉米氮素吸收利用效率并实现环境友好。

根系是作物吸收养分的重要器官,对于作物的生长发育和产量形成起着至关重要的作用^[4-6]。根系数量的多少、活力的高低以及在土壤中的时空分布直接影响玉米的生长、产量和水分养分利用效率。前人对膜下滴灌玉米根系的研究较为深入,邹海洋等^[7]研究表明,膜下滴灌玉米根系主要集中于表层土壤,地表至相对根系扎深 1/3 处根长占总根长比例平均达 73.6%,地表至相对根系扎深 1/2 处根长占总根长比例达 82.8%;LV 等^[8]研究表明,膜下滴灌条件下,滴头下方根系密度会明显增加,且

单次灌溉量越少,根系表聚越严重;马金平等^[9]研究不同灌溉定额对膜下滴灌玉米根系分布的影响时指出,膜下滴灌措施能够明显促进土壤表层根系的生长,增加表层根长和根干质量的分布比例;前人研究表明^[10],膜下滴灌条件下,玉米根系在土壤中的分布受土壤水、热效应的影响很大,节水灌溉条件下往往会使浅层根系比例增加,引起根系“表聚”。

浅埋滴灌是本研究团队在膜下滴灌的基础上研发的节水灌溉新技术,该技术不再使用地膜覆盖,而是将滴灌管浅埋于地表 3~4 cm 深度处,在发挥节水优势的同时,也减少了农业成本投入,同时还避免了残膜的环境污染,2018 年被列入内蒙古自治区玉米节水高产的主推技术,2019 年获全国农牧渔业丰收一等奖。由于地表无膜,土壤的水热状况会与膜下滴灌存在较大差异,进而会影响到根系形态特征和生理生化特性,这方面尚未有系统研究。本研究选择浅埋滴灌、膜下滴灌和传统畦灌 3 种灌溉方式,比较研究不同灌溉方式下玉米根系形态特征和生理生化特性的时空变化规律,以期西辽河平原灌区玉米高产高效栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017—2018 年在通辽市科尔沁区农牧业高新技术示范园区进行 ($122^{\circ}19'E$ 、 $43^{\circ}37'N$,海拔 182 m),为连续 2 a 定位试验;试验区近 5 a 年均降雨量 350~450 mm、年均气温 $6.5^{\circ}C \sim 7.1^{\circ}C$,其中

2017、2018 年降雨量分别为 399.7 mm 和 453.3 mm、平均气温分别为 6.7℃ 和 6.9℃; 试验地土壤为灰色草甸中壤土,是当地主要的土壤类型。2017、2018 年耕层土壤容重分别为 $1.28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.31\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,0~20 cm 土壤表层养分含量分别为有机质 $20.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $21.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $50.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $53.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $6.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $78.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $80.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验设浅埋滴灌(SBDI)、膜下滴灌(MDI)和传统畦灌(TBI)3 种灌溉方式,采用大区对比试验,小区面积为 864 m^2 ($7.2\text{ m}\times120\text{ m}$),3 次重复。供试品种为农华 101,各处理采用播种-施肥-铺带-覆膜一体机播种,大小垄(小垄行距 40 cm,大垄行距 80 cm)种植,种植密度为 $7.5\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$,浅埋滴灌和膜下滴灌处理均采用内镶片式滴灌管,滴头相距 30

cm,滴头流量为 $2.7\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,其中膜下滴灌处理采用幅宽为 1.2 m、厚度为 0.08 mm 的聚乙烯吹塑农用透明膜,滴灌管铺于小垄中间,调整铺管开沟器和覆土装置高度,使滴灌管置于小垄中间膜下地上,浅埋滴灌处理抬起覆膜装置,调整铺管开沟器和覆土装置至规定高度,使滴灌管浅埋于小垄中间地表 3~5 cm 处,传统畦灌处理抬起铺管装置和覆膜装置,只进行常规施肥、播种。各处理底施 $\text{N }35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ }90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O }45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,追施 $\text{N }240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别在拔节期、大喇叭口期、吐丝期按 3:6:1 比例结合灌溉进行,膜下滴灌和浅埋滴灌处理单独配 18 L 压差式施肥罐和水表,每次施肥前先滴清水约 60 min,然后打开施肥阀,施肥完毕后继续滴清水至相应灌水量,传统畦灌处理采用人工开沟撒施。具体灌溉方案如表 1。各处理 2017 年 5 月 2 日播种,9 月 28 日收获,2018 年 5 月 8 日播种,10 月 1 日收获。

表 1 灌溉方案/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)
Table 1 Irrigations cheme

灌溉方式 Irrigation methods	灌溉频次 Irrigation frequency	灌溉时期 Irrigation stage						总灌水量 Total irrigation quantity
		播种后 After sowing	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Flare opening stage	吐丝期 Silking stage	吐丝后 10 d 10 d after silking	吐丝后 20 d 20 d after silking	
SBDI	6	550	350	350	800	550	550	3150
MDI	6	550	350	350	800	550	550	3150
TBI	4	1125	0	1125	1125	0	1125	4500

注:各处理灌水量根据当地玉米生产灌溉定额确定,为充分灌水量。
Note:The irrigation amount of each treatment was determined according to the local maize production irrigation quota, which was sufficient irrigation amount.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及其构成因素 收获时每小区取 18 m^2 样方,3 次重复,调查样方内有效穗数,测定籽粒产量,并取样测定籽粒含水率,折算出 14% 含水率下的产量。同时,各小区均取样 10 穗,调查穗粒数、测定千粒重。

1.3.2 根系生物量、根幅及根条数 根系取样采用挖掘法,以第 1 株 1/2 株距处到第 3 株 1/2 株距处为长,以 1/2 行距为宽,挖长方形样方分层取根,每层 20 cm,取根深度为 60 cm,洗净并剔除杂质,检出死根后于 105℃ 杀青 30 min,在 80℃ 下烘干至恒重,测定其干质量。吐丝期将根挖出后,置于贴有坐标纸的平板上,观测植株根系,以齐地面处为起点,统计 10、20、30 cm 处单株根条数,并测定根幅^[11]。

1.3.3 根系酶活性及根系活力 各小区于吐丝期和乳熟期分别在同行内取连续 3 株具有代表性的植株样品,3 次重复,挑取足量新鲜根,洗净后放入冰盒内带回,-80℃ 冰箱内保存备用。根系活力采用氯化三

苯基四氮唑(TTC)还原法测定^[12],超氧化物歧化酶(SOD)活性采用四氮唑蓝(NBT)光化还原法测定^[13],过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[14],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[13]。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理和作图,DPSV10.0 软件进行处理间的差异显著性(LSD 法)分析。本试验 2017 年开始实施,与 2017 年相比,2018 年试验更为成熟,所得试验数据也更为精确,试验所得结果具有较好的重演性和代表性,本文重点以 2018 年试验数据进行分析说明。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式对玉米籽粒产量及其构成因素的影响

由表 2 可见,玉米籽粒产量 2018 年浅埋滴灌和传统畦灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间的差

异均达到了显著水平,浅埋滴灌和传统畦灌之间的差异不显著,2017 年处理之间差异均不显著;有效穗数 2017 年以浅埋滴灌最高,传统畦灌最低,二者之间的差异达到了显著水平,与膜下滴灌之间的差异均不显著;穗粒数处理间变化规律不明显,处理间的差异也不显著;从不同处理玉米千粒重来看,2 a 均表现为浅埋滴灌>传统畦灌>膜下滴灌,处理间差异均达到了显著水平。

2.2 不同灌溉方式对玉米根系特征的影响

2.2.1 对根干质量的影响 根系是玉米生长发育和产量形成的基础,根干质量在土层中的分布除能够反映栽培措施的影响外,也能反映根系对水肥吸收利用的优势所在。由表 3 可见,玉米总根干质量吐丝期不同处理间表现为膜下滴灌>浅埋滴灌>传统畦灌,其中膜下滴灌和浅埋滴灌之间差异不显著,但与传统畦灌间差异均达到了显著水平;乳熟期和完熟期不同处理间变化规律一致,均表现为浅埋滴灌高于传统畦灌和膜下滴灌,其中浅埋滴灌与膜下滴灌和传统畦灌之间的差异均达到了显著水平,但膜下滴灌和传统畦灌之间的差异不显著;0~20 cm 土层根干质量吐丝期为膜下滴灌和浅埋滴灌均显著高于传统畦灌;乳熟期后的变化规律与吐丝期不同,不同处理间均以浅埋滴灌最高、传统畦灌最低,其中浅埋滴灌与膜下滴灌和传统畦灌之间的差异均达到了显著水平,膜下滴灌与传统畦灌之间的差异不显著,20 cm 以下土层根干质量不同处理间均以传统畦灌最高;玉米不同土层根干质量分布比例处理间存在差异,计算结果表明,0~20 cm 土层根干质量占总根干质量的比例膜下滴灌和浅埋滴灌均高于传统畦灌,其中膜下滴灌表现尤为明显,这

也说明膜下滴灌和浅埋滴灌更容易提高表层土壤根系分布比例。

2.2.2 对根幅的影响 由图 1 可见,玉米 10 cm 土层处行间根幅不同处理间以膜下滴灌最高,传统畦灌最低,二者之间的差异达到了显著水平,浅埋滴灌与膜下滴灌和传统畦灌之间的差异均不显著,株间根幅膜下滴灌和浅埋滴灌均高于传统畦灌,且与传统畦灌之间的差异均达到了显著水平,膜下滴灌与浅埋滴灌之间的差异不显著;20 cm 土层处株间和行间根幅处理间差异均不显著;30 cm 土层处行间根幅传统畦灌和浅埋滴灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平,传统畦灌和浅埋滴灌之间的差异不显著,株间根幅以浅埋滴灌最高,膜下滴灌最低,二者之间的差异达到了显著水平,与传统畦灌之间的差异均不显著。

2.2.3 对根条数的影响 由图 2 可见,玉米 10 cm 土层处根条数吐丝期以膜下滴灌最高,传统畦灌最低,二者之间差异达到了显著水平,但与浅埋滴灌之间的差异均不显著,完熟期各处理间差异均不显著;20 cm 土层吐丝期亦以膜下滴灌最高,传统畦灌最低,二者之间差异达到了显著水平,与浅埋滴灌之间的差异均不显著,完熟期则以传统畦灌最高,膜下滴灌最低,二者之间差异达到了显著水平,与浅埋滴灌之间的差异均不显著;30 cm 土层处吐丝期处理间差异均不显著,完熟期浅埋滴灌与传统畦灌均高于膜下滴灌,二者之间差异不显著,但与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平。

2.2.4 对根长的影响 由图 3 可见,玉米 0~20 cm 土层根长吐丝期以膜下滴灌最高,浅埋滴灌最低,二者之间差异达到了显著水平,与浅埋滴灌之间差异均不显著,完熟期则以浅埋滴灌最高,膜下滴灌最

表 2 不同灌溉方式对玉米产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of different irrigation methods on maize yield and its components

年份 Year	灌溉方式 Irrigation methods	有效穗数 Effective spike /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Gain number per spike	千粒重 1000 grain weight/g	实测产量 Yield /(t·hm ⁻²)
2017	SBDI	7.28a	503.69a	405.62a	13.75a
	MDI	7.18ab	496.53a	376.22c	12.96a
	TBI	6.93b	507.52a	400.62b	13.56a
2018	SBDI	7.31a	509.49a	445.21a	15.62a
	MDI	7.21a	503.24a	397.33c	13.72b
	TBI	7.09a	500.47a	423.36b	14.71a

注:数据为均值+标准差;数据后不同小写字母表示同一年内处理间差异显著($P<0.05$);下同。

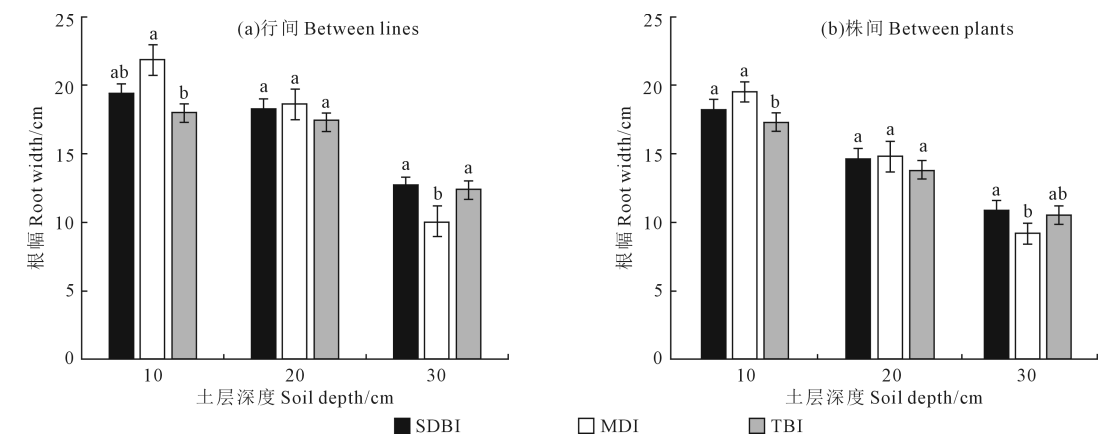
Note: Data is mean±SD. Different lowercase letters indicate significant differences in a year($P<0.05$). The same below.

表 3 不同灌溉方式对玉米根干质量垂直分布的影响(2018)/(g·株⁻¹)
Table 3 Effects of different irrigation methods on vertical distribution of maize root dry mass (2018)/(g·plant⁻¹)

时期 Stage	灌溉方式 Irrigation methods	土层深度 Soil depth/cm			总和 Total
		0~20	20~40	40~60	
吐丝期 Silking stage	SBDI	18.45a	1.11a	0.36a	19.92a
	MDI	19.73a	0.89b	0.21b	20.83a
	TBI	17.05b	1.26a	0.38a	18.69b
乳熟期 Milking stage	SBDI	14.76a	0.63b	0.33b	15.72a
	MDI	13.02b	0.43c	0.12c	13.57b
	TBI	12.83b	0.88a	0.41a	14.12b
完熟期 Mature stage	SBDI	12.55a	0.34b	0.28b	13.17a
	MDI	11.31b	0.31c	0.10c	11.42b
	TBI	11.21b	0.46a	0.38a	12.05b

低,二者之间的差异亦达到显著水平,与传统畦灌之间的差异均不显著;20~40 cm 土层吐丝期和完熟期处理间差异均不显著;40~60 cm 土层吐丝期以传统畦灌最高,膜下滴灌最低,二者之间的差异达到

了显著水平,与浅埋滴灌之间的差异均不显著,完熟期亦以传统畦灌最高,膜下滴灌最低,其中传统畦灌与膜下滴灌的差异均达到了显著水平,但二者与浅埋滴灌间的差异不显著。



注:数据为均值±标准差;数据后不同小写字母表示同一年内处理间差异显著($P<0.05$);下同。
Note: Data is mean±SD. Different lowercase letters indicate significant differences in a year ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同灌溉方式对玉米根幅的影响(2018,吐丝期)

Fig.1 Effects of different irrigation methods on root range of maize (2018,silking stage)

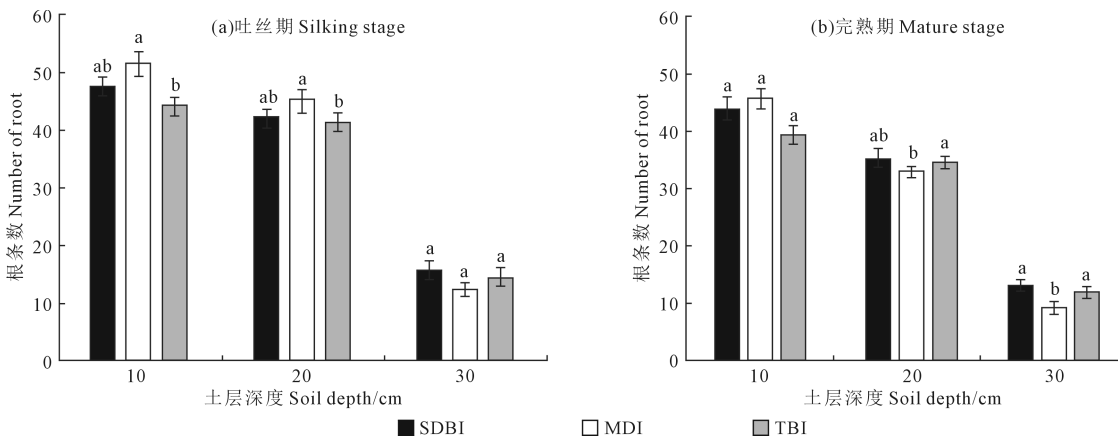


图 2 不同灌溉方式对玉米根条数的影响(2018)

Fig.2 Effects of different irrigation methods on root number per plant of maize (2018)

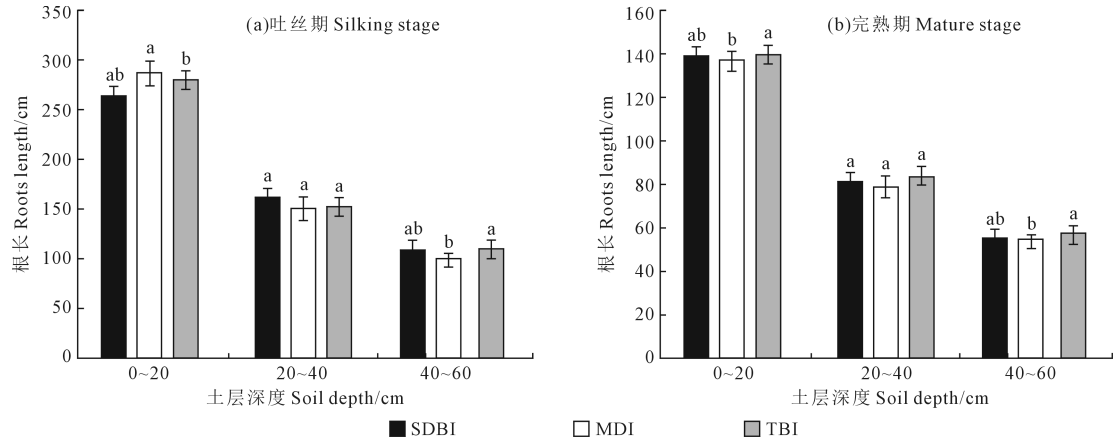


图 3 不同灌溉方式对玉米根系长度的影响(2018)

Fig.3 Effects of different irrigation methods on root length per plant of maize (2018)

2.2.5 对根系酶活性的影响 SOD 和 POD 是植物细胞的保护酶,其含量的高低在一定程度上反映植物抗衰老能力的强弱。由表 4 可见,玉米 0~20 cm 土层根系吐丝期 SOD、POD 活性处理间变化规律不明显,处理间差异也不显著,乳熟期以传统畦灌最高,膜下滴灌最低,二者之间的差异达到了显著水平,但与浅埋滴灌之间的差异均不显著;20~40 cm 土层根系 SOD 酶活性吐丝期以传统畦灌最高,膜下滴灌最低,二者之间差异达到了显著水平,与浅埋滴灌间的差异均不显著,POD 活性浅埋滴灌和传统畦灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平,乳熟期 SOD 和 POD 活性浅埋滴灌和传统畦灌均高于膜下滴灌,二者之间的差异不显著,但与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平;40~60 cm 土层根系 SOD 活性吐丝期传统畦灌和浅埋滴灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间的差异均达到了显著水平,POD 活性处理间差异不显著,乳熟期 SOD 和 POD 活性浅埋滴灌和传统畦灌均高于膜下滴灌,且与膜下滴灌之间差异均达到了显著水平。从 MDA 含量来看,0~20 cm 土层处理间差异均不显著,20~40 cm 土层吐丝期处理间差异不显著,乳熟期以膜下滴灌最高,浅埋滴灌最低,二者之间差异达到了显著水平,与传统畦灌之间的差异均不显著,40~60 cm 土层吐丝期和乳熟期均以膜下滴灌最高,且与浅埋滴灌和传统畦灌之间的差异均达到了显著水平。综合以上分析来看,浅埋滴灌和传统畦灌生育后期根系抗衰老能力较强,衰老较慢。

2.2.6 对根系活力的影响 由图 4 可知,不同灌溉方式对玉米根系活力的影响不同,吐丝期和乳熟期玉米根系活力均随土层的加深而逐渐增加;其中吐丝期不同土层各处理间的差异均不显著;乳熟期 0~20 cm 土层中浅埋滴灌和传统畦灌处理的根系活力

均显著高于膜下滴灌,20~40 cm 土层和 40~60 cm 土层均以浅埋滴灌最高,膜下滴灌最低,二者之间的差异达到了显著水平,但与传统畦灌之间的差异均不显著。

3 讨论

作物对营养元素的吸收主要靠根系的直接接触而获得,所以根系在土壤中的分布及其活性会对作物营养元素的吸收产生重要影响。根系在土壤中的合理分布有利于增加根系与氮素的接触机会,而具有较强活性的根系可以保证其所接触的营养元素能够被充分吸收利用^[15-18]。

表 4 不同灌溉方式对玉米根系酶活性和 MDA 的影响(2018)
Table 4 Effects of different irrigation methods on root enzyme activity and MDA content of maize (2018)

生育时期 Growing stage	土层深度 Soil depth/cm	灌溉方式 Irrigation methods	SOD /(U·g ⁻¹)	POD /(U·g ⁻¹)	MDA /(nmol·g ⁻¹)
吐丝期 Silking stage	0~20	SBDI	171.84a	69.35a	6.74a
		MDI	166.13a	71.50a	6.70a
		TBI	160.77a	65.58a	7.16a
	20~40	SBDI	109.70ab	58.06a	8.08a
		MDI	98.55b	48.29b	8.71a
		TBI	126.20a	56.48a	8.49a
	40~60	SBDI	101.44a	47.24a	9.15b
		MDI	75.97b	43.67a	11.35a
		TBI	105.83a	46.43a	10.02b
乳熟期 Milking stage	0~20	SBDI	189.57ab	84.33ab	8.12a
		MDI	171.26b	75.71b	8.59a
		TBI	196.47a	91.40a	7.81a
	20~40	SBDI	151.58a	65.97a	9.62b
		MDI	141.69b	63.62b	11.59a
		TBI	148.06a	68.81a	10.68ab
	40~60	SBDI	9.62b	57.21a	11.13b
		MDI	11.59a	50.78b	12.89a
		TBI	10.68ab	54.35a	11.26b

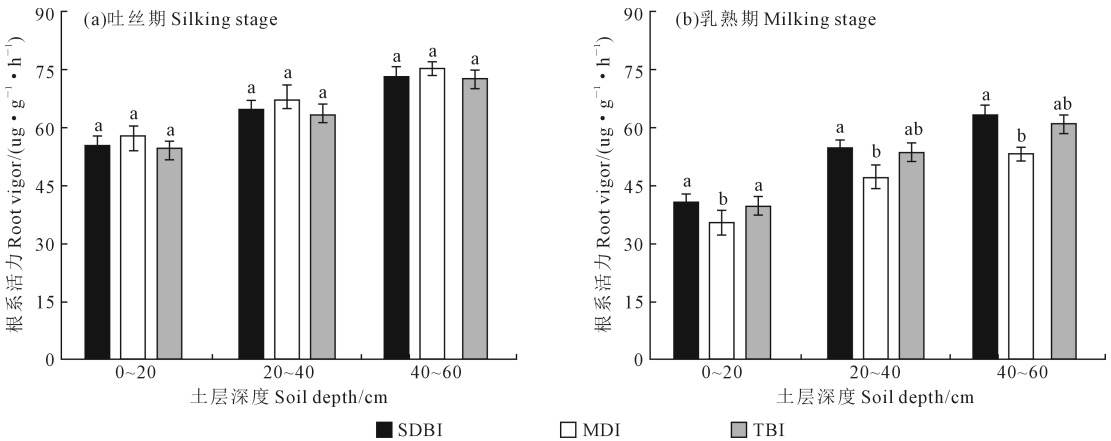


图 4 不同灌溉方式对玉米根系活力的影响(2018 年)
Fig.4 Effects of different irrigation methods on root activity of maize(2018)

前人研究^[19-21]认为,根系下扎能力强,生长后期分布较深,保持正常的侧根生长,总根长密度高,能够提高整体土壤剖面的氮素有效性,有利于提高玉米氮素吸收效率;KING^[22]等通过模型分析表明,增加土壤深层根系分布,减少表层土壤的根系分枝,可以显著提高养分及水分的空间有效性,从而增加产量。可见传统漫灌条件下,深层土壤中根系分布比例大、范围广,有利于增加根系与营养元素的接触机会,从而会提高玉米的养分吸收利用效率。而在节水滴灌条件下,水的分布也会影响到根系的分布,本研究结果表明,玉米根干质量0~20 cm土层吐丝期膜下滴灌和浅埋滴灌较传统畦灌高15.72%和8.21%,二者与传统畦灌之间的差异均达显著水平,另外,土壤表层的根幅、根条数以及根干质量分布比例也明显增加,根系发生“表聚”,但与传统漫灌不同的是,水肥一体化条件下,水的运移也决定了营养元素的分布,所有的营养元素和较大比例的根系均分布在同一湿润土体内,因此根系与营养元素接触的机会更大,对于提高玉米的养分吸收利用效率更为有利。

根系生理特性是影响根系对营养元素吸收的重要因素^[23-26]。连艳鲜等^[27]研究指出,高产玉米除有发达的根系外,根系活性也比较强,尤其是在生育后期要有较强的活力,才能为地上部分的生长提供充足的养料;任昊等^[28]研究指出,延缓根系衰老有利于提高夏玉米花后氮素积累量和籽粒产量;MURTAZA等^[29]研究表明,玉米抽雄后吸收的氮素要达到总需氮量的40%~50%;曹国军等^[30]也指出,抽雄至灌浆期,植株需氮量剧增,吸收速率达到最大,进而形成吸氮的第二个高峰期,此阶段吸氮量占总氮量的79.71%,磷素吸收速率也迅速回升,出现第2个吸磷高峰期,阶段吸磷量占总磷量的41.82%,钾素积累量达玉米整个生育期最大值,是超高产春玉米吸钾的第1个高峰期,阶段吸钾量占总钾量的47.16%;可见,玉米生育后期仍需较多的养分供应,生育后期保持较高的根系活力对于满足玉米对养分的需求和提高玉米养分吸收利用效率都非常关键。从本研究结果来看,3种灌溉方式下玉米根系生理特性存在一定差异,吐丝期0~20 cm土层根系的SOD、POD活性膜下滴灌略高于浅埋滴灌和传统畦灌,但处理间差异不显著,而乳熟期则以传统畦灌最高,浅埋滴灌次之,膜下滴灌最低,其中传统畦灌与浅埋滴灌之间的差异不显著,但与膜下滴灌之间的差异达到了显著水平,膜下滴灌虽然在吐丝期具有较高的根系活性,但生育后期根系酶活性明显下降,根系衰老加剧,这在一定程度上也

会影响到根系对养分的吸收。

4 结 论

本文通过大田定位试验,研究了西辽河平原灌区3种主要灌溉方式下玉米根系形态特征和生理生化特性的影响,得到如下结论:

(1)玉米吐丝期0~20 cm土层根干质量膜下滴灌和浅埋滴灌分别较传统畦灌高15.72%和8.21%,根长高12.73%和6.37%,10 cm土层处根条数和株、行间根幅膜下滴灌和浅埋滴灌均高于传统畦灌,吐丝期膜下滴灌和浅埋滴灌玉米根系在浅层土壤分布比例增加。

(2)膜下滴灌生育后期根系SOD、POD活性低于浅埋滴灌和传统畦灌,MDA含量高于浅埋滴灌和传统畦灌,根系衰老更快,这也会影响到根系对氮素的吸收能力。浅埋滴灌水肥一体化条件下玉米根系时空分布合理,生育后期根系保持了较高活性,是其高产高效重要的生理基础。

参 考 文 献:

- [1] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 等. 超高产春玉米冠层结构及其生理特性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4367-4376.
ZHANG Y Q, YANG H S, GAO J L, et al. Study on canopy structure and physiological characteristics of super-high yield spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(21): 4367-4376.
- [2] 杨恒山, 刘江, 梁怀宇. 西辽河平原气候及水资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 84-90.
YANG H S, LIU J, LIANG H Y. Change characteristics of climate and water resources in west Liaoh River Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 84-90.
- [3] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 69-77.
YANG H S, XUE X W, ZHANG R F, et al. Effects of irrigation methods on yield and water use efficiency of maize in the West Liaoh River Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 69-77.
- [4] 徐晨, 闫伟平, 孙宁, 等. 不同灌水处理对春玉米生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 7-14.
XU C, YAN W P, SUN N, et al. The impacts of irrigation amount on physiological characteristics and yield of spring maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 7-14.
- [5] 马兆惠, 车仁君, 王海英, 等. 种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1084-1094.
MA Z H, CHE R J, WANG H Y, et al. Effect of different seeding rates and planting patterns on root morphological traits and root vigor of super-high-yield soybean cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(6): 1084-1094.
- [6] 郑开凯, 马志远, 孙波, 等. 不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 394-402.
ZHENG K K, MA Z Y, SUN B, et al. Effects of fertilization strategies on the cadmium resistance of paddy soil microorganisms[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 394-402.
- [7] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 145-155.
ZOU H Y, ZHANG F C, ZHANG Y X, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in

- Hexi region of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 145-155.
- [8] LV G H, KANG Y H, LAN L, et al. Effect of irrigation methods on root development and profile soil water uptake in winter wheat[J]. Irrigation Science, 28(5):387-398.
- [9] 马金平, 王卫锋, 朱宝才, 等. 灌水定额对覆膜滴灌玉米根系分布和籽粒产量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 64-70.
- MA J P, WANG W F, ZHU B C, et al. The effects of drip irrigation quota on the root distribution characteristics and grain yield of spring corn[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 64-70.
- [10] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- LIU Y, SU Y F, LI J S, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 93-104, 135.
- [11] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 等. 超高产春玉米的根系特征[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 735-743.
- ZHANG Y Q, YANG H S, GAO J L, et al. Root characteristics of super High-Yield spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 735-743.
- [12] HODGES D M, DELONG J M, FORNEY C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for stimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. Planta, 1999, 207(4): 604-611.
- [13] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995, 32-33.
- ZHOU Q. Guidance for plant physiology and biochemistry experiments [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995, 32-33.
- [14] MATSUBA T, KUBOZONO H, SAEGUSA A, et al. *Short communication*: Effects of feeding purple corn (*Zea mays* L.) silage on productivity and blood superoxide dismutase concentration in lactating cows[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(8): 7179-7182.
- [15] 屈佳伟, 高聚林, 王志刚, 等. 不同氮效率玉米根系时空分布与氮素吸收对氮肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1212-1221.
- QU J W, GAO J L, WANG Z G, et al. Effect of nitrogen rate on temporal and spatial distribution of roots and nitrogen uptake of maize with genotypes of high or low nitrogen efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5): 1212-1221.
- [16] 廖敦平, 雍太文, 刘小明, 等. 玉米-大豆和玉米-甘薯套作对玉米生长及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1395-1402.
- LIAO D P, YONG T W, LIU X M, et al. Growth and nitrogen uptake of maize relay intercropped with soybean or sweet potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1395-1402.
- [17] 董玉新, 韦炳奇, 吴强, 等. 内蒙古平原灌区“春麦冬播”种植效应及品种适应性[J]. 作物学报, 2021, 47(3): 481-493.
- DONG Y X, WEI B Q, WU Q, et al. Cropping effect and variety adaptability of winter-seeded spring wheat in Inner Mongolia Plain irrigation area[J]. Acta Agronomica Sinica 2021, 47(3): 481-493.
- [18] 张旭东, 王智威, 韩清芳, 等. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2969-2977.
- ZHANG X D, WANG Z W, HAN Q F, et al. Effects of water stress on the root structure and physiological characteristics of early-stage maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 2969-2977.
- [19] 米国华, 陈范骏, 吴秋平, 等. 玉米高效吸收氮素的理想根构型[J]. 中国科学(生命科学), 2010, 40(12): 1112-1116.
- 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 Sinica (Vitae), 2010, 40(12): 1112-1116.
- [20] 尹飞, 王俊忠, 孙笑梅, 等. 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2166-2178.
- YIN F, WANG J Z, SUN X M, et al. Response of spatial concordance index between maize root and soil nitrate distribution to water and nitrogen treatments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2166-2178.
- [21] 路笃旭, 徐振和, 刘梅, 等. 侧向垂直断根对不同根型夏玉米品种叶片光合性能及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3482-3493.
- LU D X, XU Z H, LIU M, et al. Effect of vertically cutting roots at different horizontal distances from plant on leaf photosynthetic characteristics and yield of summer maize with different root types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(18): 3482-3493.
- [22] KING J, GAY A, Sylvester-Bradley R, et al. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum[J]. Annals of Botany, 2003, 91(3): 383-390.
- [23] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 78-84.
- ZHANG R F, YANG H S, GAO J L, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 78-84.
- [24] 蒋健, 王宏伟, 刘国玲, 等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 62-66.
- JIANG J, WANG H W, LIU G L, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(4): 62-66.
- [25] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, (8): 899-904.
- SONG H X, LI S X. Effects of root growing space of on maize its absorbing characteristics [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, (8): 899-904.
- [26] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 132-141.
- XU G W, WANG H Z, ZHAI Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 132-141.
- [27] 连艳鲜, 李潮海. 高产玉米杂交种根系形态生理特性研究[J]. 玉米科学, 2008, (4): 196-198.
- LIAN Y X, LI C H. Study on the physiological and morphological character of high-yield maize root[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, (4): 196-198.
- [28] 任昊, 程乙, 刘鹏, 等. 不同栽培模式对夏玉米根系性能及产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2270-2281.
- REN H, CHENG Y, LIU P, et al. Effects of different cultivation patterns on root characteristics, yield formation and nitrogen utilization of summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2270-2281.
- [29] MURTAZA G, AHMED Z, USMAN M, et al. Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production [J]. Journal of Plant Nutrition, 2020, 44(11): 1677-1691.
- [30] 曹国军, 刘宁, 李刚, 等. 超高产春玉米氮磷钾的吸收与分配[J]. 水土保持学报, 2008, (2): 198-201.
- CAO G J, LIU N, LI G, et al. Study on absorption and distribution of nitrogen phosphorus and potassium in super-high yield spring maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, (2): 198-201.