东北农业科学 2025,50(5):15-25
Journal of Northeast Agricultural Sciences DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2025.05.003

灌水方法对河北平原夏玉米根系及产量的影响

彭伟国[1],刘玉春[1]*,侯 宇[1],康 猛[1],王 丽[2],宗 浩[2]
(1. 河北农业大学城乡建设学院,河北 保定 071001;2. 保定硕丰农产股份有限公司,河北 保定 071599)

摘 要:研究4种灌水方法:浅埋滴灌(SBDI)、地表滴灌(SDI)、水带沟灌(WBDI)和常规畦灌(TBI)对夏玉米根系分布和产量的影响,进而为河北平原地区夏玉米精准、高效的灌溉管理提供理论依据。于2021-2022年开展大田对比试验,测定了夏玉米根系形态结构参数、干物质积累与转运量、产量及组成等指标。结果表明,灌浆期根系形态结构参数以SBDI处理的夏玉米表现最佳,0~40 cm土层根长密度分别较TBI、WBDI和SDI提高13.8%、11.5%和4.8%;灌水方法对夏玉米干物质积累、转运和干物质转运量对籽粒的贡献率影响显著,均表现为SBDI>SDI>WBDI>TBI,其中,SBDI分别较SDI、WBDI和TBI干物质转运率提高16.9%、8.8%和4.3%,干物质转运量对籽粒的贡献率提高10.4%、4.9%和1.8%。4种灌水方法下,以SBDI处理具有最佳产量表现,两年平均籽粒产量为8 396.25 kg/hm²,分别较TBI、WBDI、SDI处理产量提高了13.51%、8.55%和2.99%;与TBI和WBDI处理相比,SBDI处理在节省灌溉水近40%的条件下,耗水量减少12.4%和11.6%,水分利用效率提高29.8%和23.1%,而与相同灌溉水平下的SDI处理相比,SBDI处理耗水量减少1.4%,水分利用效率提高4.2%。综上所述,浅埋滴灌能够减少无效水分消耗,促进夏玉米根系生长和提高干物质积累与转运能力,起到节水和增产的作用。因此推荐浅埋滴灌技术作为河北平原夏玉米高产高效栽培适宜的灌水方法进行推广。

关键词:夏玉米;灌水方法;根系;产量;水分利用效率
中图分类号:S513.047 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-5877(2025)05-0015-11

Effects of Irrigation Methods on Root System and Yield of Summer Maize in the Hebei Plain

PENG Weiguo[1], LIU Yuchun[1]*, HOU Yu[1], KANG Meng[1], WANG Li[2], ZONG Hao[2]
(1. *College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding* 071001; 2. *Baoding Shuofeng Agricultural Products Co., Ltd., Baoding* 071599, China)

Abstract: To investigate the effects of four irrigation methods(Shallow Buried Drip Irrigation SBDI, Surface Drip Irrigation SDI, Water Belt Ditch Irrigation WBDI, and Traditional Border Irrigation TBI) on the root distribution and yield of summer maize, and to provide theoretical basis for precise and efficient irrigation management of summer maize in the Hebei Plain. A field comparative experiment was conducted from 2021 to 2022 to determine the morphological structure parameters, dry matter accumulation and transport, yield, and composition of summer maize roots. The results showed that summer maize under the SBDI treatment exhibited the optimal root morphological structure parameters during the grain-filling stage: root length density in the 0-40 cm soil layer was 13.8%, 11.5%, and 4.8% higher than that of TBI, WBDI, and SDI treatments, respectively. Irrigation methods had significant effects on dry matter accumulation, dry matter translocation, and the contribution rate of dry matter translocation to grains, with the order of SBDI > SDI > WBDI > TBI for all indicators. Specifically, compared with SDI, WBDI, and TBI treatments, SBDI increased the dry matter translocation rate by 16.9%, 8.8%, and 4.3%, respectively, and increased the contribution rate of dry matter translocation to grains by 10.4%, 4.9%, and 1.8%, respectively. Among the four irrigation methods, SBDI achieved the best yield performance, with an average grain yield of 8 396.25 kg/ha over two years, which was 13.51%, 8.55%, and 2.99% higher than that of TBI, WBDI, and SDI treatments, respectively. Compared with TBI and WBDI treatments, SBDI saved nearly 40% of

收稿日期:2024-10-25
基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021324)
作者简介:彭伟国(1999-),男,硕士,主要从事农业水土工程理论与技术的研究。
通信作者:刘玉春,E-mail: liuyuchun5@163.com

irrigation water, reduced water consumption by 12.4% and 11.6%, and increased water use efficiency by 29.8% and 23.1%, respectively. In contrast, compared with the SDI treatment under the same irrigation level, SBDI reduced water consumption by 1.4% and increased water use efficiency by 4.2%. In conclusion, shallow-buried drip irrigation(SBDI) can reduce ineffective water consumption, promote root growth of summer maize, and enhance dry matter accumulation and translocation capacity, thereby achieving water conservation and yield increase. Therefore, SBDI is recommended as a suitable irrigation method for popularization in high-yield and efficient cultivation of summer maize in the Hebei Plain.

Key words: Summer maize; Irrigation method; Root; Yield; Water use efficiency

我国是农业大国，灌溉是实现作物增产的最主要因素之一[1]，对于保障粮食有效供给，确保国家粮食安全具有重要作用[2]。华北地区是我国重要的粮食生产基地，在我国粮食产业中地位较高，虽然耕地灌溉面积仅17.15万km^2，但粮食产量占我国粮食总产量的比例却达到25.74%。目前，河北平原地区农民在夏玉米季的习惯灌水方法仍以畦灌和沟灌为主，这种传统粗放的灌水方法与水肥一体化技术适应性较差，难以在玉米生育中后期进行追肥，导致玉米减产的同时，更催生了严重的水肥浪费问题[3]。浅埋滴灌技术在滴灌的基础上，通过将滴灌带埋设至地面以下3～5 cm处，将具有一定压力的水通过滴灌带以水滴的形式缓慢而均匀地滴入根部附近土壤，兼具水肥一体化优势，能根据作物的养分需求在不同生育时期进行追肥，保证了养分快速被根系吸收，改善了作物氮素供需吻合度，提高了氮肥利用率，使作物生育期中后期追肥成为可能[4-6]。

浅埋滴灌技术作为2020年以来在河北平原冬小麦-夏玉米轮作生产中推广应用的节水灌溉技术，尚处于尝试性推广应用阶段，缺少定量的田间试验数据予以支撑。前人有关玉米灌水方法的研究大多数集中在沟灌[7-8]、滴灌[9-10]等地面灌水方法上，且以不同灌溉方式下灌溉定额[11]及施肥制度[12]等研究为主，而对浅埋滴灌条件下玉米根系分布及玉米产量形成机理缺乏系统深入的研究。因此，本研究选择浅埋滴灌、地表滴灌、水带沟灌和常规畦灌4种灌水方法，研究不同灌水方法对夏玉米根系生长及产量形成的影响，揭示浅埋滴灌技术在夏玉米干物质积累、转运规律及水分利用效率上与其他灌水方法之间的差异，以期为河北平原夏玉米节水高产灌水方法的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于河北省保定市高阳县硕丰农场(38°56′N，115°53′E)及河北省雄安新区安新县龙化乡南教台村灌溉试验田(39°14′N，115°51′E)进行，试

表1 试验地土壤的物理和水力特性参数

Table 1 Physical and hydraulic characteristics parameters of soil in the experimental site

试验地 Experimental field	土壤深度/cm Soil depth	粒径分布(国际制) Particle size distribution(SI Metric) 2.0~0.05 mm	<0.05~0.002 mm	<0.002 mm	土壤质地 Soil texture	容重/g·cm^{-3} Bulk density	田间持水量/g·g^{-1} Field capacity	饱和含水量/g·g^{-1} Saturated water content
高阳县	0～<20	57.85	38.62	3.53	砂壤土	1.41	0.243	0.282
	20～<40	60.34	36.64	3.02	砂壤土	1.45	0.207	0.251
	40～<60	58.73	39.01	2.26	砂壤土	1.39	0.231	0.271
	60～<80	53.50	43.70	2.80	砂壤土	1.48	0.210	0.244
	80～100	56.28	41.22	2.50	砂壤土	1.49	0.195	0.228
安新县	0～<20	62.00	33.95	4.05	砂壤土	1.43	0.191	0.240
	20～<40	63.12	34.20	2.68	砂壤土	1.42	0.185	0.233
	40～<60	60.01	36.21	3.78	砂壤土	1.40	0.186	0.234
	60～<80	55.16	40.37	4.47	砂壤土	1.46	0.191	0.243
	80～100	55.19	41.53	3.28	砂壤土	1.48	0.189	0.233

验地0~100 cm土壤物理特性见表1。高阳县0~40 cm耕层土壤分别含全氮0.86 g/kg、有机质14.55 g/kg、碱解氮79.01 mg/kg、速效钾129.21 mg/kg、速效磷16.35 mg/kg和硝态氮9.77 mg/kg。2021年和2022年安新县0~40 cm耕层土壤分别含全氮0.86、0.89 g/kg,有机质14.55、14.23 g/kg,碱解氮79.01、66.61 mg/kg,速效钾129.21、141.54 mg/kg,速效磷16.35、15.44 mg/kg,硝态氮9.77、9.67 mg/kg。

1.2　试验设计

试验设浅埋滴灌(SBDI)、地表滴灌(SDI)、水带沟灌(WBDI)和常规畦灌(TBI)4种灌水方法,采用大区对比试验,试验共4个处理(表2),各处理面积为60 m×20 m。每个处理平均划为3个取样小区作为重复。河北平原夏玉米季降水能基本满足夏玉米全生育期正常生长,因此,除2022年极端干旱情况对灌浆期夏玉米补充灌溉,其他时期均

表2　各处理实际灌溉及施肥方案

Table 2 Actual irrigation and fertilization schemes for each treatment

年份 Year	处理 Treatment	灌水时期及灌水量/$m^3\cdot hm^{-2}$ Irrigation period and amount 播种 V0	大口期 V12	吐丝期 R1	灌浆期 R3	总灌水量/$m^3\cdot hm^{-2}$ Total irrigation amount	施氮时期及施氮量/kg $N\cdot hm^{-2}$ Nitrogen period and amount 播种 V0	大口期 V12	吐丝期 R1	总施氮量/kg $N\cdot hm^{-2}$ Total nitrogen amount
2021	TBI	550	120	200	0	870	75	100	0	175
	WBDI	550	120	200	0	870	75	100	0	175
	SDI	300	75	150	0	525	75	75	25	175
	SBDI	300	75	150	0	525	75	75	25	175
2022	TBI	550	120	200	120	990	75	100	0	175
	WBDI	550	120	200	120	990	75	100	0	175
	SDI	300	75	150	75	600	75	75	25	175
	SBDI	300	75	150	75	600	75	75	25	175

以将肥料溶于水施入大田为目的进行灌水,试验实际灌溉与施肥量见表2。

SBDI参考《露地玉米浅埋滴灌技术规程(DB15/T1382—2018)》[13]要求,通过调整播种机的铺管开沟器和覆土装置的高度,使滴灌带浅埋地表下4 cm处。所使用滴灌带均为内镶贴片式滴灌带(直径16 mm)工作压力0.15 MPa,滴头流量2.7 L/h,滴头间距30 cm,铺设间距为60 cm,铺设与作物间隔30 cm。

TBI与WBDI均直接采用管道进行输水,不单独设置输水沟渠,在进行起垄与做沟等操作后,其余田间管理与一般大田一致。TBI由3个小畦组成,各小畦设置两个入畦毛管作为出水口,畦长60 m,畦宽根据农机规格设置为3 m;WBDI在相邻两行作物之间灌水沟中心铺设一根水带(直径16 mm),沟长60 m,沟深10 cm,顶宽15 cm,底宽30 cm;入畦、入沟流量均为12 L/s。灌水方法布置示意图见图1。

供试夏玉米品种为当地推广品种“郑黄糯2号”,采用玉米免耕施肥精播机(2BYFSF-4)完成播种和施肥,作物单行种植,行距60 cm、株距23 cm,理论植株密度7.25万株/hm^2。夏玉米试验期间,

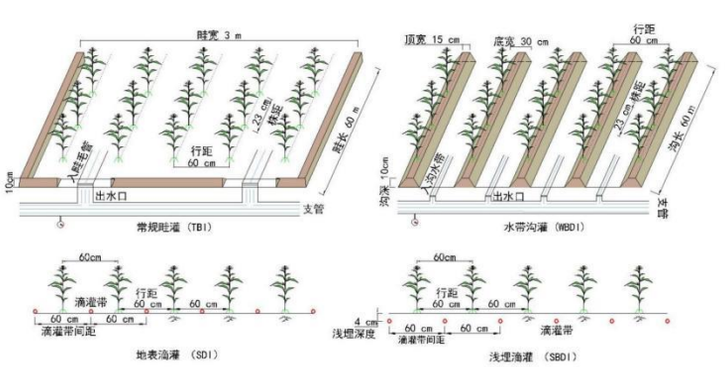

图1　夏玉米不同灌水方法种植示意图

Fig.1 Schematic diagram of planting summer maize using different irrigation methods

结合当地的基肥施用经验，各处理基施复合肥300 kg/hm²(迈普丰，中化现代农业有限公司，25-7-10)，基肥折合纯氮75 kg/hm²，追肥采用尿素(含氮量46%)，各处理氮肥施用量及施用时期见表2。SBDI、SDI和WBDI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。各处理实际灌溉与施肥量见表2。

根据气象观测数据，高阳县试验基地2021年的年降水量分别为766.3 mm，安新县试验基地2021与2022年的年降水量分别为576、431.7 mm，根据两地水文统计结果显示[14]，2021年属丰水年份，2022年属平水年份。2021年，高阳县夏玉米全生育期日平均温度25.3 ℃、全生育期降水量445.3 mm；2021年，安新县夏玉米全生育期日平均温度26.0 ℃、降水量351.2 mm。2022年，安新县夏玉米全生育期日平均温度26.0 ℃、降水量279 mm

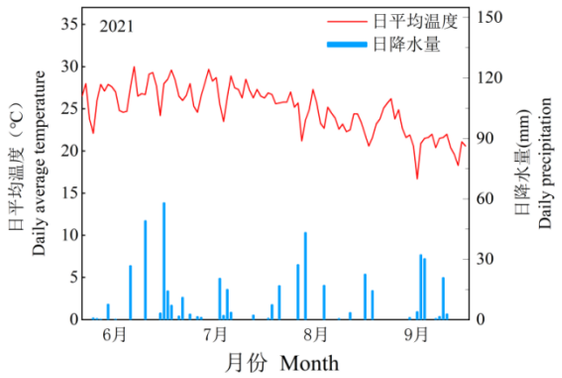

图2 2021年高阳县试验区日平均温度和日积累降水量

Fig.2 Daily average temperature and daily accumulated precipitation in the experimental area of Gaoyang County in 2021

(图2，图3)。2021年试验夏玉米6月22日播种，9月24日收获，大喇叭口期追氮时间为8月2日，吐丝期追氮时间为8月17日。2022年试验夏玉米6月25日播种，9月27日收获，大喇叭口期追氮时间为8月3日，吐丝期追氮时间为8月18日。

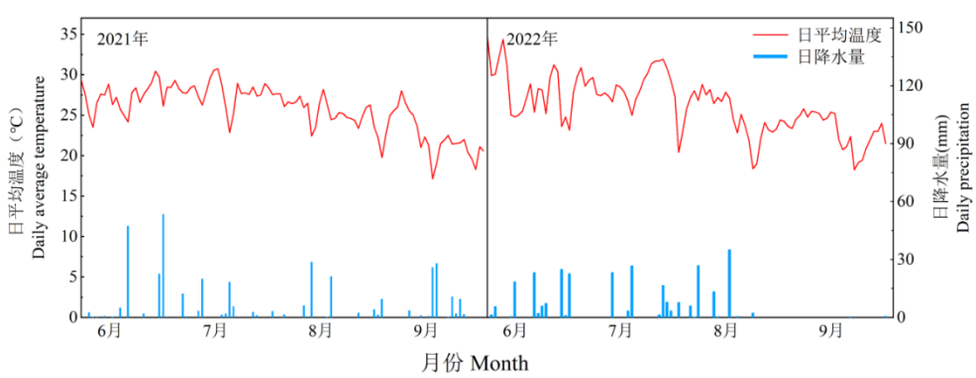

图3 2021-2022年安新县试验区日平均温度和日积累降水量

Fig. 3 Daily average temperature and daily accumulated precipitation in Anxin County experimental area from 2021 to 2022

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤硝态氮

于夏玉米播前及各关键生育期采集不同土层深度的土壤样品，将土样置于干燥环境风干，经碾碎后，过2 mm筛板筛取5 g土样，用50 mL KCl溶液(2 mol/L)浸提，经震荡30 min后过滤，配置为目标溶液，使用紫外可见分光光度计(UV-1300型，上海美析仪器有限公司)测定0~100 cm土层土壤硝态氮含量。

1.3.2 土壤含水率及水分平衡

分别在播前、全生育期和收获后采用土钻取样，烘干法测定0~100 cm土层的土壤含水率，各小区取样点位于种植行和种植行左、右侧各10 cm，取3点平均值。玉米生育期耗水总量(ET，m^3/hm^2)见公式(1)：

$$ET = P_0 + M + K - 10\gamma H(W_t - W_0) - R \quad \cdots (1)$$

式中，P_0为夏玉米全生育期有效降水量(m^3/hm^2)；M为夏玉米全生育期灌溉水量(m^3/hm^2)；K为夏玉米全生育期地下水补给量(m^3/hm^2)，由于高阳和安新试验地地下水埋藏较深，故K=0；γ为土壤容重(g/cm^3)；H为土壤水分的计算深度，本试验取100 cm；W_t为夏玉米成熟期土壤含水率(g/g)；W_0为夏玉米播前土壤含水率(g/g)；R为地表径流量(m^3/hm^2)。由于试验地布置地势平坦，故R=0；$10\gamma H(W_t - W_0)$为夏玉米播种至成熟期0~100 cm土层土壤剖面储水量的变化量(m^3/hm^2)。

1.3.3 根系生长特征指标

于夏玉米灌浆期(2021年8月28日，2022年8月31日)，采集不同土壤层次的根系样本，根钻内径为10 cm，各小区随机选取3株代表性植株，切

除植株地上部位,于植株基部正下方以20 cm为间隔,从土层表层依次取至100 cm土层(图4)。去除残根和草根,筛取植株活根,清洗干净后分层装袋。使用扫描仪(日本,Epson Expression 1680型)在1 200×1 200的分辨率下扫描形成黑白对照的Tif格式高清图像文件供分析使用。运用Win RHIZO Reg 2009c图像处理系统(Regent Instrument Inc.,Canada)进行根系分析,得出相应土层的根长、根表面积和根体积等参数计算根长密度(RLD,cm/cm³),计算式为公式(2):

$$RLD = \frac{L_i}{V} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中,L_i为单株玉米的土壤第i层根的长度(cm);V为土壤体积(cm³)。

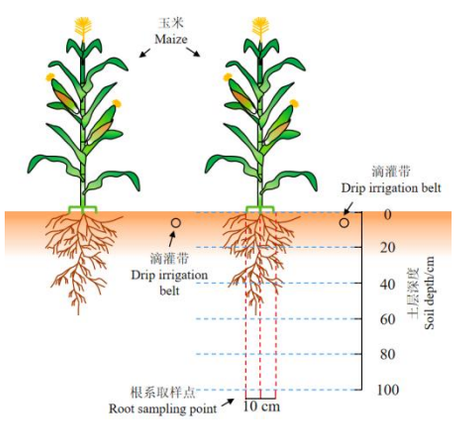

图4　玉米根系取样示意图

Fig.4 Schematic diagram of maize root sampling

1.3.4　干物质积累及转运量

各小区测定全生育期夏玉米干物质量,每次各小区取长势一致且具有代表性的植株3株,按照茎秆、叶片、穗和根系分样,分别装于牛皮纸袋中,清理各部分表面尘土,于105 ℃杀青30 min后,80 ℃烘干至恒重,称量其干物质量。干物质转运量为吐丝期与成熟期干质量的差值;干物质转运率为干物质转运量占吐丝期干物质量的百分比;干物质对籽粒的贡献率为干物质转运量占成熟期籽粒干质量的百分比。

1.3.5　产量及氮肥偏生产力

在成熟期随机取各小区有代表性的12株玉米果穗放在对应的网兜中,在自然条件下晾晒风干,测量穗行数、行粒数、千粒重等指标。经手工脱粒后,随机取1 000粒籽粒称其重量,测定千粒重,折算成标准含水量(14%)产量,再经植株密度等要素换算为籽粒产量[17]。

1.4　数据分析方法

采用Microsoft Excel 2022进行数据处理,DPS 9.01软件进行差异显著性(LSD法)分析,Origin 2024进行绘图及Pearson相关性分析。本试验于2021年在高阳县及安新县同时进行,2022年受疫情影响仅在安新县进行,为保证试验结果的重演性和代表性,本研究重点以安新县两年试验数据进行分析说明。

2　结果与分析

2.1　不同灌水方法对夏玉米根系分布的影响

从表3、表4中可以看出,不同灌水方法灌浆期夏玉米根长的差异达显著水平,而夏玉米根表面积和根体积之间差异不显著,浅埋滴灌(SBDI)处理分别较常规畦灌(TBI)、水带沟灌(WBDI)和地表滴灌(SDI)处理0~100 cm土层夏玉米总根长平均提高18.20%、14.16%和6.53%,总根表面积平均提高16.19%、10.82%和7.94%,总根体积提高44.76%、28.80%和5.38%。其中,TBI、WBDI、SDI

表3　2021年不同灌水方法对夏玉米根系垂直分布特征的影响

Table 3 Effect of different irrigation methods on the vertical distribution characteristics of summer maize roots in 2021

测量指标 Indicator	处理 Treatment	土层深度/cm Soil depth				
		合计 Total	0~<20	20~<40	40~<60	60~100
根长/cm	TBI	5 973.83±84.41d	4 830.93±78.77b	1 085.83±25.77d	49.75±22.14b	0.30±0.52a
	WBDI	6 201.05±61.36c	4 834.62±25.65b	1 280.22±25.08c	62.68±41.81b	0.90±0.88a
	SDI	6 608.34±117.50b	5 011.17±120.41a	1 481.65±16.27b	70.05±6.60b	3.67±1.06a
	SBDI	6 995.07±72.54a	5 068.16±12.99a	1 669.10±29.51a	172.12±18.50a	11.73±12.97a
根表面/cm²	TBI	1 329.22±182.38a	1 075.00±148.79a	241.50±32.24c	11.21±5.21b	0.06±0.10a
	WBDI	1 394.00±169.02a	1 086.51±127.90a	287.85±36.20bc	14.35±10.25b	0.21±0.22a
	SDI	1 425.77±150.01a	1 080.67±108.14a	319.87±36.00ab	15.24±3.10b	0.78±0.17a

续表3
Table 3 Continued

测量指标 Indicator	处理 Treatment	土层深度/cm Soil depth				
		合计 Total	0～<20	20～<40	40～<60	60～100
根体积/cm³	SBDI	1 544.67±82.95a	1 119.02±55.01a	368.61±21.34a	37.89±2.75a	2.63±2.95a
	TBI	44.38±2.12a	35.89±1.69a	8.07±0.43b	0.37±0.17b	0.00±0.01b
	WBDI	50.17±10.26a	39.09±7.80a	10.35±2.00ab	0.54±0.44b	0.01±0.01b
	SDI	60.92±13.65a	46.17±10.24a	13.66±3.07a	0.65±0.19b	0.03±0.01ab
	SBDI	63.85±17.14a	46.30±12.66a	15.22±4.04a	1.60±0.61a	0.10±0.10a

注：表中同列不同小写字母表示同一时期不同处理在0.05水平上差异显著，下同。

Note: Different lowercase letters in the same column in the table indicate significant differences at the 0.05 level among different treatments during the same period, the same below.

和SBDI处理40~100 cm土层的根长平均占比，分别为1.05%、1.82%、2.38%和3.23%，可见，浅埋滴灌更有利于夏玉米根系的生长以及深层土壤根系的分布。由图5可知，TBI、WBDI、SDI和SBDI处理灌浆期夏玉米RLD分布均随土层深度的增加而减小，以各灌水方法处理灌浆期夏玉米0~40 cm土层RLD为例，相较于TBI、WBDI和SDI处理，SBDI处理的RLD分别提高13.8%、11.5%和4.8%，可见，浅埋滴灌能够促进夏玉米根系发育。

表4 2022年不同灌水方法对夏玉米根系垂直分布特征的影响
Table 4 Effect of different irrigation methods on the vertical distribution characteristics of summer maize roots in 2022

测量指标 Indicator	处理 Treatment	土层深度/cm Soil depth				
		合计 Total	0～<20	20～<40	40~<60	60~100
根长/cm	TBI	5 984.96±80.10d	4 451.48±70.06b	1 443.28±53.95c	72.37±5.64b	3.36±0.42b
	WBDI	6 180.37±46.77c	4 521.76±72.80b	1 424.65±159.15c	154.8±29.25ab	6.71±5.38b
	SDI	6 660.27±96.98b	4 675.97±51.83a	1 662.72±52.43b	224.39±70.04a	18.65±16.72b
	SBDI	7 139.81±52.08a	4 756.82±55.52a	1 951.39±28.45a	220.98±54.01a	53.26±16.44a
根表面积/cm²	TBI	1 329.56±183.14a	987.87±123.88a	321.51±54.84b	16.16±3.28b	0.73±0.02b
	WBDI	1 393.53±166.36a	1 019.62±123.32a	320.19±44.22b	35.39±10.21ab	1.56±1.35b
	SDI	1 436.04±143.65a	1 007.73±93.57a	358.54±38.07ab	48.40±16.66a	4.14±3.87b
	SBDI	1 544.47±82.40a	1 029.43±66.61a	422.32±28.02a	47.41±9.06a	11.65±4.09a
根体积/cm³	TBI	44.54±2.86a	33.14±2.49a	10.73±0.42b	0.54±0.02b	0.03±0.01b
	WBDI	49.77±11.56a	36.46±8.85a	11.35±2.15b	1.28±0.46ab	0.05±0.05b
	SDI	61.23±15.34a	42.92±10.38a	15.22±3.32ab	2.13±1.13a	0.19±0.21b
	SBDI	64.87±16.95a	43.13±10.71a	17.69±4.36a	2.09±1.05a	0.46±0.08a

2.2 不同灌水方法对夏玉米干物质的影响

由图6可知，各灌水处理夏玉米茎、叶干物质量均在灌浆期达到最大值，且浅埋滴灌(SBDI)处理的茎、叶的干物质量最大，分别较常规畦灌(TBI)、水带沟灌(WBDI)和地表滴灌(SDI)处理平均提高了3.5%、2.3%和1.3%；随生育期推进，各处理夏玉米穗的干物质量呈上升趋势，在完熟期达到全生育期最大值，且在蜡熟期和完熟期各处理间差异达显著水平，其中，SBDI处理完熟期夏玉米穗的干物质量分别较TBI、WBDI和SDI处理平均提高14.4%、10.7%和4.3%；夏玉米干物质总量在完熟期各处理间差异达显著水平，与TBI、

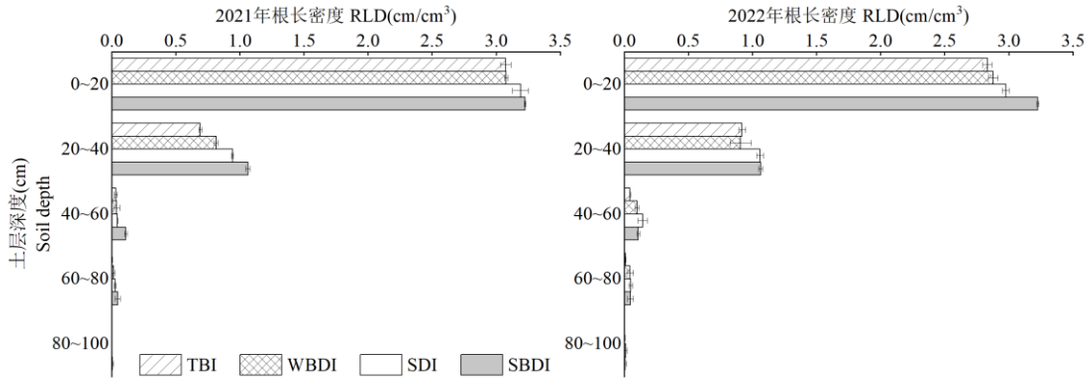

图5　不同灌水方法下夏玉米成熟期各土层深度根长密度(RLD)

Fig.5 Root length density(RLD) at different soil depths during the maturity period of summer maize under different irrigation methods

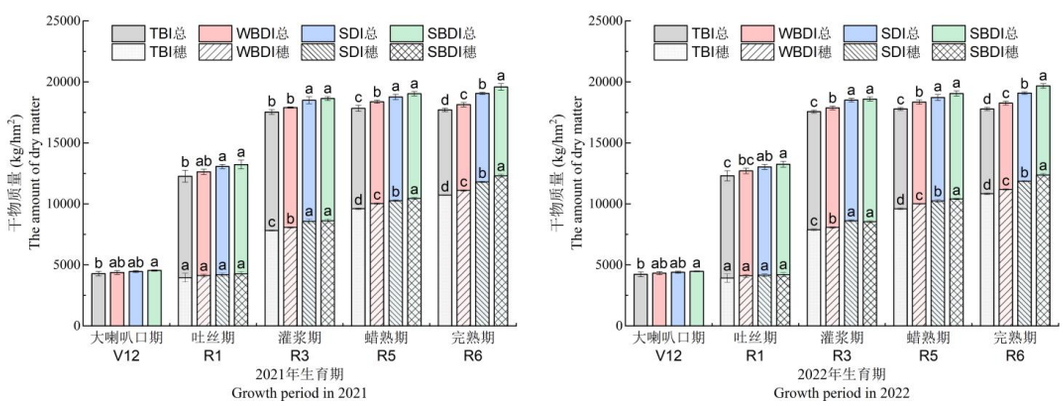

图6　不同灌水方法对夏玉米干物质量的影响

Fig.6 The influence of different irrigation methods on the dry matter weight of summer maize

WBDI和SDI处理相比,SBDI处理夏玉米干物质总量平均提高10.6%、7.9%和2.9%。由表5可知,SBDI处理的夏玉米干物质转运量最高,SBDI处理分别较TBI、WBDI和SDI处理干物质转运率平均提高了16.9%、8.8%和4.3%,干物质转运量对籽粒的贡献率提高10.4%、4.9%和1.8%。说明浅埋滴灌方式的夏玉米干物质转运能力更强,转运效率更高,对于提高玉米籽粒产量更为有利。

表5　不同灌水方法对夏玉米干物质转运的影响

Table 5 Effects of different irrigation methods on dry matter transport of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	转运量/kg·hm⁻² Amount of translocation			转运率/% Translocation rate			贡献率/% Contribution rate		
		茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total	茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total
2021	TBI	917.16±11.24c	417.16±15.78c	1 334.32±22.87d	17.15±0.34c	14.07±0.40c	16.05±0.33d	10.09±0.23b	4.59±0.16c	14.68±0.33c
	WBDI	988.67±42.27b	477.06±15.36b	1 465.73±47.12c	18.09±0.55b	15.73±0.63b	17.25±0.45c	10.41±0.29ab	5.03±0.17b	15.44±0.29b
	SDI	1 077.56±23.89a	515.47±14.06b	1 593.02±10.16b	19.26±0.31a	15.79±0.45b	17.98±0.09b	10.77±0.19a	5.15±0.17b	15.92±0.08ab
	SBDI	1 103.16±13.15a	578.03±34.79a	1 681.19±37.68a	19.51±0.36a	17.47±0.44a	18.76±0.15a	10.64±0.17a	5.57±0.31a	16.20±0.32a
2022	TBI	975.14±18.12c	457.74±6.16d	1 432.87±21.91d	18.09±0.21c	15.29±0.11c	17.09±0.15d	10.64±0.27a	4.99±0.04c	15.64±0.31b
	WBDI	1 024.65±21.83b	503.87±14.93c	1 528.53±26.53c	18.59±0.25b	16.27±0.37b	17.76±0.06c	10.85±0.19a	5.34±0.13b	16.19±0.16a
	SDI	1 109.20±19.58a	544.94±29.74b	1 654.14±43.98b	19.74±0.19a	16.72±0.80b	18.63±0.28b	10.95±0.16a	5.38±0.22b	16.33±0.21a
	SBDI	1 123.69±11.51a	615.95±7.97a	1 739.64±18.91a	19.91±0.11a	18.09±0.33a	19.23±0.16a	10.69±0.05a	5.86±0.06a	16.56±0.10a

2.3 不同灌水方法对夏玉米产量和水分利用效率的影响

由表6可知，各灌水处理穗粒数、千粒重及籽粒产量差异显著。与常规畦灌(TBI)、水带沟灌(WBDI)和地表滴灌(SDI)处理相比，浅埋滴灌(SBDI)处理的穗粒数分别提高6.19%、3.35%和1.84%，千粒重提高6.9%、5.03%和1.12%，籽粒产量提高13.51%、8.55%和2.99%。由表7可知，两年试验均以常规畦灌处理的夏玉米耗水量最高，各灌水处理之间水分利用效率差异显著。与TBI、WBDI和SDI处理相比，SBDI处理耗水量平均分别减少12.4%、11.6%和1.4%，可见，浅埋滴灌技术能够有效降低作物的耗水量；与TBI、WBDI和SDI处理相比，SBDI处理的水分利用效率分别提高29.8%、23.1%和4.2%，说明浅埋滴灌技术能够通过减少土壤水分损失，提高夏玉米的水分利用效率。

表6 灌水方法对夏玉米产量及其构成因素的影响

Table 6 Effect of irrigation methods on summer maize yield and component factors

年份 Year	处理 Treatment	穗粒数 Grain number	千粒重/g 1 000-grain weight	籽粒产量/kg·hm^{-2} Grain yield
2021	TBI	431.90c	236.25d	7 394.51±154.35d
	WBDI	441.29bc	241.47c	7 721.71±119.83c
	SDI	449.94ab	249.70b	8 141.55±121.13b
	SBDI	457.33a	252.77a	8 377.04±51.13a
2022	TBI	431.90c	238.23c	7 456.26±139.42c
	WBDI	441.29bc	240.16b	7 679.88±113.96b
	SDI	450.98ab	252.14a	8 240.27±123.74a
	SBDI	457.33a	253.93a	8 415.46±73.26a

表7 灌水方法对夏玉米耗水量及水分利用效率的影响

Table 7 Effect of irrigation methods on water consumption and water use efficiency of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	0～100 cm土层储水变化量/m^3·hm^{-2} $10\gamma H(W_t-W_0)$	有效降水量/m^3·hm^{-2} P_0	灌水量/m^3·hm^{-2} M	耗水量/m^3·hm^{-2} ET	水分利用效率/kg·m^{-3} WUE
2021	TBI	-104.80	3 512	870	4 486.80	1.65±0.04d
	WBDI	-59.64	3 512	870	4 441.64	1.74±0.03c
	SDI	37.77	3 512	525	3 999.23	2.04±0.03b
	SBDI	125.76	3 512	525	3 911.24	2.14±0.02a
2022	TBI	-43.26	2 790	990	3 823.26	1.95±0.04d
	WBDI	3.84	2 790	990	3 776.16	2.03±0.03c
	SDI	40.67	2 790	600	3 349.33	2.46±0.04b
	SBDI	71.08	2 790	600	3 318.92	2.54±0.02a

2.4 夏玉米各指标的相关性

为进一步分析夏玉米根系生长、产量和水分利用效率间的关系，选取各灌水方法处理下，夏玉米灌浆期根系形态结构参数和水分利用效率等10个指标进行Pearson相关性分析，根据显著性绘制热图。由图7可知，夏玉米根系形态结构参数与干物质转运量和产量呈极显著正相关(P<0.01)，夏玉米干物质转运量、水分利用效率、产量及其构成因素与耗水量呈现极显著负相关(P<0.01)。综合此前单一指标分析结果，说明浅埋滴灌的灌水特性能够减少无效水分消耗，促进夏玉米根系生长，提高夏玉米的干物质转运能力和水肥利用效率，进而提高产量。

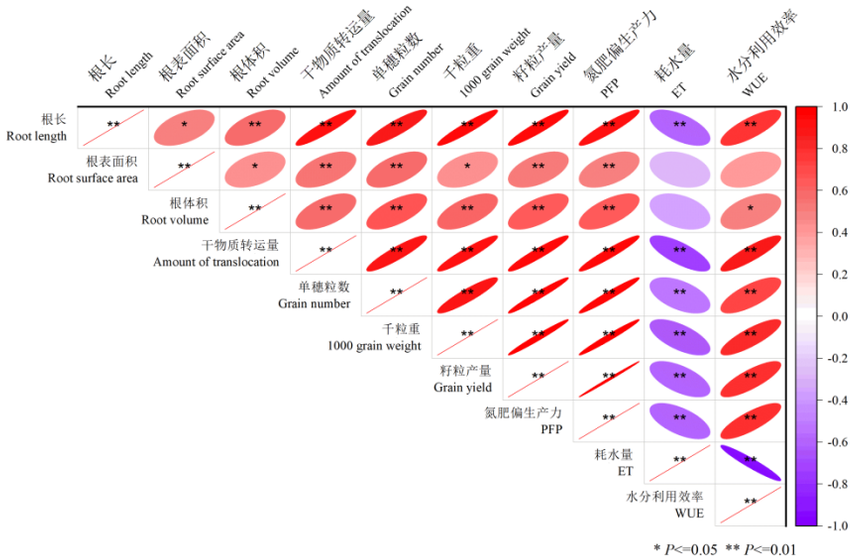

图7　各指标间相关性分析热图

Fig.7 Heat map of correlation analysis among indicators

3　讨论与结论

3.1　灌水方法对夏玉米根系生长的影响

适宜的灌水方法能够促进夏玉米根系生长，提高作物的水氮利用效率[15]。本研究结果看出，在相同施氮水平且灌溉量减少近40%的情况下，相较于常规畦灌和水带沟灌处理，地表滴灌处理的RLD提高了8.6%和6.4%，浅埋滴灌处理的RLD提高了13.8%和11.5%，说明两种滴灌处理在起到节水作用的同时，均能促进夏玉米根系生长发育。而浅埋滴灌较地表滴灌处理增加了夏玉米根系与氮素的接触机会，进而促进了夏玉米浅层根系的发育，在本研究结果中，表现为浅埋滴灌较地表滴灌处理的RLD提高了4.8%，且在0~20 cm土层之间表现最为明显。张雨珊[16]等研究认为，浅埋滴灌浅层土壤中根系比例增加会伴随深层根系分布减少。本研究中，浅埋滴灌40~100 cm土层的根长平均占比仍达到3.23%，同时0~100 cm土层夏玉米总根长分别较常规畦灌、水带沟灌和地表滴灌处理平均提高18.20%、14.16%和6.53%，分析产生差异的原因可能是本试验条件下的夏玉米种植密度更低，植株个体不会因养分竞争而抑制根系的发育[17-18]，进而促进了本试验条件下夏玉米根系的生长以及深层土壤中根系的分布。

3.2　灌水方法对夏玉米干物质和产量的影响

干物质生产与分配是作物产量形成的基础，不同的灌水方法通过改变土壤的水分及养分状况，进而影响作物的干物质积累与转运能力。前人研究[19-21]指出，花后干物质量占玉米全生育期总量的绝大部分，是籽粒产量形成的主要物质来源。本研究显示，浅埋滴灌处理的玉米干物质量、转运率及干物质转运量对籽粒的贡献率均显著高于常规畦灌、水带沟灌和地表滴灌处理，分析原因可能是浅埋滴灌处理较高且稳定的土壤水分环境，延缓了夏玉米根冠衰老速率，维持了夏玉米生育中后期根系对营养物质的运输。

产量构成因素之间的协调是提高夏玉米产量的关键因素[22]。本试验条件下，灌水方法对夏玉米产量影响的差异体现在穗粒数和千粒重上。浅埋滴灌更高的干物质对籽粒贡献率促进了夏玉米开花授粉和籽粒灌浆，浅埋滴灌处理的夏玉米穗粒数和千粒重要显著高于常规畦灌和水带沟灌处理，产量较二者分别提高了13.51%和8.55%。前人研究认为，浅埋滴灌技术具有根据玉米不同时期的养分需求[23-26]进行水肥一体化追肥的优势，提高作物氮肥利用率[27]。而在本研究中，浅埋滴灌处理较相同灌水施氮条件下的地表滴灌处理夏玉米产量提高了2.99%，这与王建东[28]等研究结果类似，原因可能是浅埋滴灌处理减少了氮肥因接触氧气以氨等形式逸散的比例[29]，从而提高了夏玉米的产量的提高。

3.3　灌水方法对夏玉米水分利用效率的影响

水分利用效率是衡量灌水方法效果的重要指标[30]。在本试验中，4种灌水方法的耗水量差异主要体现在土壤贮水变化量以及灌水量上，常规畦灌和水带沟灌的土壤贮水消耗远高于地表滴灌及浅埋滴灌处理。王怀苹[31]等研究表明，与沟灌处理相比，地表滴灌和地下滴灌能够降低夏玉米的土面蒸发、土壤贮水消耗量和蒸散量。本研究

中，浅埋滴灌与地表滴灌的滴头流量为2.7 L/h，而常规畦灌和水带沟灌的入畦(沟)流量为12 L/s，在相同灌溉量下，滴灌处理需要更长的灌溉时间。常规畦灌和水带沟灌在单次灌水结束后，表层土壤含水率在短期内迅速升高，增加了株间蒸发耗水[32]，而滴灌处理定量、定时供给水分并输送到作物根系附近土壤，根系持续不断地吸收水分，减少了径流和株间蒸发等无效水分消耗。在滴灌条件下，所有营养元素及较大比例的根系均分布在同一湿润土体内[33]，与浅埋滴灌相比，地表滴灌的土壤湿润体更接近地面，当空气温度较高时，仍会产生部分蒸发耗水。在本研究中表现为，浅埋滴灌较地表滴灌处理的夏玉米耗水量减少了1.4%，水分利用效率提高了4.2%，这与王怀苹等研究结论一致。

本文探究了河北平原地区不同灌水方法对夏玉米根系、干物质、产量及水分利用效率的影响。在本试验条件下，浅埋滴灌处理夏玉米具有最佳根系生长及产量表现，能够实现干物质较高水平的积累与转运，提高水分利用效率。推荐作为河北平原地区夏玉米高产高效栽培的适宜灌水方法进行推广。

参考文献：

[1] 雷波，刘钰，许迪.灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J].农业工程学报，2011，27(1)：10-14.
LEI B, LIU Y, XU D. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 10-14. (in Chinese)

[2] 时荣超，郭文忠.农业灌溉水资源优化配置研究进展[J].农业工程学报，2024，40(4)：1-13.
SHI R C, GUO W Z. Research progress on the optimal allocation of agricultural irrigation water resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 1-13. (in Chinese)

[3] 巨晓棠，谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报，2014，20(4)：783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo,problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese)

[4] 王佳慧，高震，曲令华，等.氮肥后移对滴灌夏玉米源库特性及产量形成的影响[J].中国农业大学学报，2017，22(8)：1-8.
WANG J H, GAO Z, QU L H, et al. Effects of postponing N-fertilizer application by drip fertigation on the characteristics of source-sink and yield formation in summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(8): 1-8. (in Chinese)

[5] KOKSAL A, CENGIZ E. Influence of different drip irrigation methods and irrigation levels on sweet sorghum[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2021, 30(2): 1465-1475.

[6] WANG J D, GONG S H, XU D, et al. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2012, 31(5): 1025-1037.

[7] 汪顺生，王康三，刘东鑫，等.基于加权灰色关联模型优选夏玉米沟灌方式[J].农业工程学报，2016，32(18)：133-139.
WANG S S, WANG K S, LIU D X, et al. Optimization of furrow irrigation mode for summer maize based on weighted grey correlation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 133-139. (in Chinese)

[8] 刘小飞，费良军，孙景生，等.垄植沟灌夏玉米棵间蒸发试验研究[J].排灌机械工程学报，2016，34(4)：332-338.
LIU X F, FEI L J, SUN J S, et al. Experiment on soil evaporation of summer maize in furrow irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4): 332-338. (in Chinese)

[9] 张守都，栗岩峰，李久生.基于DNDC模型的东北半湿润区膜下滴灌玉米施肥制度优化[J].中国水利水电科学研究院学报，2018，16(2)：113-121.
ZHANG S D, LI Y F, LI J S, et al. Optimization of fertilizing schedule for maize with mulched drip irrigation in sub-humid region of Northeast China DNDC model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(2): 113-121. (in Chinese)

[10] 龚珂宁，黄炳川，张楠，等.灌溉和种植模式对无膜滴灌棉花幼苗生长及光合特性的影响[J].节水灌溉，2022(4)：21-26.
GONG K N, HUANG B C, ZHANG N, et al. Effects of irrigation quota and seeding density on growth and photosynthetic characteristics of cotton seedlings under non-film drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(4): 21-26. (in Chinese)

[11] 霍轶珍，王文达，韩翠莲，等.河套灌区灌溉定额对膜下滴灌玉米生产性状及水分利用效率的影响[J].水土保持研究，2020，27(5)：182-187.
HUO Y Z, WANG W D, HAN C L, et al. Effects of irrigation quota on maize yield traits and water use efficiency under mulched drip irrigation in hetao irrigation distract[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 182-187. (in Chinese)

[12] 甄玉月，徐立荣，高海威.水氮耦合对地下滴灌冬小麦和夏玉米水氮利用效率影响研究[J].灌溉排水学报，2024，43(4)：41-49.
ZHEN Y Y, XU L R, GAO H W. Effect of water-nitrogen coupling on water and nitrogen use efficiency of rotated winter wheat and summer maize under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 41-49. (in Chinese)

[13] DB15/T1382—2018，露地玉米浅埋滴灌技术规程[S].呼和浩特：内蒙古自治区质量技术监督局，2018.
DB15/T1382-2018, Technical regulations for shallow buried drip irrigation of open field corn[S]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Quality and Technical Supervision Bureau, 2018. (in Chinese)

[14] 河北省水利厅.河北省水资源公报[R].石家庄：河北省水利厅，2021-2022.
Hebei Provincial Department of Water Resources. Water resources bulletin of Hebei Province[R]. Shijiazhuang: Hebei Provincial, 2021-2022. (in Chinese)

[15] 李旭峰，孙西欢，马娟娟，等.膜下滴灌不同水分处理对温室番茄根系活力和水分利用率的影响[J].节水灌溉，2019(12)：53-57.
LI X F, SUN X H, MA J J, et al. Effects of different water treatments under film drip irrigation on root activity and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 53-57. (in Chinese)

[16] 张雨珊，杨恒山，葛选良，等.增密种植下浅埋滴灌水氮减量对玉米根、冠物质分配与水氮利用效率的影响[J].干旱地区农业研究，2022，40(2)：129-136，196.

ZHANG Y S, YANG H S, GE X L, et al. Effects of reduction of nitrogen and water of shallow drip irrigation on material distribution of root and canopy and utilization efficiency of water and nitrogen of maize under dense planting[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 129-136, 196. (in Chinese)

[17] 苏义臣,苏桂华,孟令聪,等.不同密度下去留分蘖处理对玉米产量的影响[J].东北农业科学,2023,48(6):10-14.
SU Y C, SU G H, MENG L C, et al. Influence of tillers treatment under different planting densities on yield of maize[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 10-14. (in Chinese)

[18] 李梁,于洋,宫秀杰,等.不同区域气候条件下寒地玉米生长发育及产量的密度响应[J].东北农业科学,2021,46(4):1-5.
LI L, YU Y, GONG X J, et al. Plant densities response on growth and yield of maize in cold region under different climate conditions[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(4): 1-5. (in Chinese)

[19] 钱春荣,王荣焕,赵久然,等.不同熟期玉米干物质积累、分配与转运特征[J].生态学杂志,2017,36(8):2177-2183.
QIAN C R, WANG R H, ZHAO J R, et al. Characteristics of accumulation, distribution and translocation of dry matter in maize hybrids differing in maturity duration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2177-2183. (in Chinese)

[20] 黄智鸿,王思远,包岩,等.超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J].玉米科学,2007(3):95-98.
HUANG Z H, WANG S Y, BAO Y, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007(3): 95-98. (in Chinese)

[21] 马赟花,薛吉全,张仁和,等.不同高产玉米品种干物质积累转运与产量形成的研究[J].广东农业科学,2010,37(3):36-40.
MA Y H, XUE J Q, ZHANG R H, et al. Relationship between dry matter accumulation and distribution to yield of different maize Cultivars[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(3): 36-40. (in Chinese)

[22] 裴文东,王国兴,王转丽,等.氮肥后移对春玉米子粒灌浆特性及内源激素的影响[J].玉米科学,2022,30(4):114-120.
PEI W D, WANG G X, WANG Z L, et al. Effect of nitrogen fertilizer postponing application on grain filling and endogenous hormones of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(4): 114-120. (in Chinese)

[23] 刘玉春,李久生.毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J].水利学报,2009,40(7):782-790.
LIU Y C,LI J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 782-790. (in Chinese)

[24] 刘见,宁东峰,秦安振,等.氮肥减量后移对喷灌玉米产量和水氮利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(3):42-49.
LIU J, NING D F, QIN A Z, et al. Impacts of reducing and delaying nitrogen application on yield and water and nitrogen use efficiency of summer maize under sprinkler fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 42-49. (in Chinese)

[25] 魏廷邦,胡发龙,赵财,等.氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J].中国农业科学,2017,50(15):2916-2927.
WEI T B, HU F L, ZHAO C, et al. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under n-fertilizer postponing application in oasis irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(15): 2916-2927. (in Chinese)

[26] 王宜伦,张许,李文菊,等.氮肥后移对晚收夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J].玉米科学,2011,19(1):117-120.
WANG Y L, ZHANG X, LI W J, et al. Effects of postponing n application on yield and n absorption and utilization of summer maize in later harvest time[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1): 117-120. (in Chinese)

[27] 张雨珊,杨恒山,葛选良,等.西辽河平原浅埋滴灌下水氮运筹对玉米产量和效益的影响[J].东北农业科学,2023,48(5):32-36,80.
ZHANG Y S, YANG H S, GE X L, et al. Effects of water and nitrogen management on yield and benefit of maize under the shallow buried drip irrigation in Xiliaohe Plain[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(5): 32-36, 80. (in Chinese)

[28] 王建东,张彦群,龚时宏,等.覆膜浅埋滴灌技术模式田间应用试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(11):1-5.
WANG J D, ZHANG Y Q, GONG S H, et al. Study on the application effects of shallow subsurface drip irrigation mode under mulch[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(11): 1-5. (in Chinese)

[29] 尹娟,费良军,田军仓,等.水稻田中氮肥损失研究进展[J].农业工程学报,2005(6):189-191.
YIN J, FEI L J, TIAN J C, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(6):189-191. (in Chinese)

[30] 蒋傲男,闫静琦,陈宗政,等.不同覆膜方式对旱作区春玉米农田土壤水分及产量的影响[J].东北农业科学,2022,47(3):26-30,36.
JIANG A N, YAN J Q, CHEN Z Z, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(3): 26-30, 36. (in Chinese)

[31] 王怀苹,杨明达,张素瑜,等.不同节水灌溉方式对夏玉米生长、产量及水分利用的影响[J].作物杂志,2024(2):206-212.
WANG H P, YANG M D, ZHANG S Y, et al. Effects of different water-saving irrigation modes on growth, yield, and water utilization of summer maize[J]. Crops, 2024(2): 206-212. (in Chinese)

[32] 汪顺生,费良军,高传昌,等.不同沟灌方式下夏玉米棵间蒸发试验[J].农业机械学报,2012,43(9):66-71.
WANG S S, FEI L J, GAO C C, et al. Soil Evaporation of summer maize under different furrow irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 66-71. (in Chinese)

[33] 张玉芹,杨恒山,张瑞富,等.浅埋滴灌下水氮运筹对春玉米根系衰减特性及产量的影响[J].作物学报,2023,49(11):3074-3089.
ZHANG Y Q, YANG H S, ZHANG R F, et al. Effects of water and nitrogen application on root attenuation characteristics and yield of spring maize under shallow buried drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 3074-3089. (in Chinese)

(责任编辑:朴红梅)