

# 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

张雨珊,杨恒山,葛选良,刘晶,孟繁昊,张明伟,郭子赫

(内蒙古民族大学农学院,内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心,内蒙古 通辽 028042)

**摘要:**为探究增密种植下浅埋滴灌水氮减量对玉米根冠特性及水氮利用效率的影响,以传统畦灌常规施氮量(300 kg·hm<sup>-2</sup>)和常规灌溉量(4 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)为对照(CK),采用大田裂区试验,以传统畦灌常规灌溉量40%(W1)、50%(W2)和60%(W3)为主处理,以常规施氮量50%(N1)、70%(N2)和100%(N3)为副处理,研究90 000株·hm<sup>-2</sup>密度下浅埋滴灌水氮减量玉米根系分布、干物质积累转运、产量及水氮利用效率的变化特征。结果表明,不同土层根干质量均随灌溉量、施氮量的增加而增加,W2N3和W3N3处理20~40 cm、40~60 cm土层根干质量与CK的差异均不显著。吐丝前W2N3、W3N3干物质积累量与CK的差异均不显著,吐丝后W3N3显著高于CK,2018、2019年分别较CK高出9.74%和7.62%;W2N3、W3N2茎鞘、叶片转运量与CK的差异均不显著,W3N3处理2018、2019年茎鞘、叶片对籽粒贡献率则分别较CK提高了0.37%、0.43%和0.27%、0.56%。完熟期2018年CK处理的根冠比除与W1N2、W2N3和W3N3的差异不显著外,显著高于其他处理,而2019年不同灌溉量N3处理根冠比与CK的差异均不显著;单位根干质量产量除2019年W3N3处理与CK差异不显著外,各处理均显著高于CK。W2N3、W3N3处理根、冠物质分配合理且与CK产量、氮肥偏生产力的差异均不显著,灌溉水利用效率则分别提高94.15%、65.80%。增密种植下浅埋滴灌W2N3处理根系分布合理、根冠比协调且高产高效兼顾,可为西辽河平原浅埋滴灌增密种植下玉米高产高效栽培提供参考。

**关键词:**玉米;增密种植;浅埋滴灌;水氮减量;水氮利用效率

**中图分类号:**S513;S31 **文献标志码:**A

## 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

ZHANG Yushan, YANG Hengshan, GE Xuanliang, LIU Jing,

MENG Fanhao, ZHANG Mingwei, GUO Zihe

(College of Agriculture, Inner Mongolia University for Nationalities, Inner Mongolia Autonomous Region Forage Crop Engineering Technology Research Center, Tongliao, Inner Mongolia 028042, China)

**Abstract:** To explore the effect of reduction of nitrogen and water of shallow drip irrigation on root and canopy characteristics and water and nitrogen utilization efficiency in spring maize under dense planting, the root distribution, dry matter accumulation and transportation, yield and water and nitrogen utilization efficiency of maize under the density of 90 000 plants·hm<sup>-2</sup> were studied. The study adopted a split plot design with the irrigation level as main treatment including 40% (W1), 50% (W2) and 60% (W3) of conventional irrigation and the nitrogen application as secondary treatment including 50% (N1), 70% (N2) and 100% (N3) of conventional nitrogen fertilization by using the traditional border irrigation cooperated with the conventional nitrogen application as the control. The results showed that the root dry weight of different soil layers increased with the increase of amounts of irrigation

收稿日期:2021-04-14

修回日期:2022-01-11

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFD0300401);内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY21444);内蒙古民族大学科研立项项目(NMDSS2160)

**作者简介:**张雨珊(1997-),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,研究方向为玉米高产高效栽培。E-mail:1476512339@qq.com

**通信作者:**杨恒山(1967-),男,内蒙古乌兰察布人,教授,研究方向为作物高产栽培与资源高效利用。E-mail:yanghengshan2003@aliyun.com

and nitrogen application, and there was no significant difference in the root dry weight of CK, W2N3 and W3N3 in 20~40 cm and 40~60 cm soil layer. There was no significant difference in dry matter accumulation of W2N3, W3N3 and CK before spinning, but W3N3 was significantly higher than CK after spinning, 9.74% and 7.62% higher than CK in 2018 and 2019. The difference of transport capacity of stem sheath and leaf among W2N3, W3N2 and CK was not significant, and the contribution rate of stem sheath and leaf to grain increased by 0.37% and 0.43% in 2018, and 0.27% and 0.56% respectively in 2019. There was no significant difference in root-shoot ratio between W3N3 and CK at silking stage, and the root-shoot ratio of CK was significantly higher than the other treatments except W1N2, W2N3 and W3N3 in 2018, and the root-shoot ratio of N3 in different irrigation amount had no significant difference with CK in 2019 at maturity stage. The yield per unit root dry weight of CK was significantly lower than that of other treatments except W3N3 in 2019. The material distribution of root and canopy of W2N3 and W3N3 were reasonable, and there were no significant differences in yield and nitrogen partial productivity with CK, however, the irrigation water use efficiency increased by 94.15% and 65.80%, respectively. The treatment of W2N3 under shallow drip irrigation had reasonable root distribution with proper root shoot ratio and high yield and high efficiency under dense planting. The study provided a theoretical reference for high yield and high efficiency in shallow drip irrigation under dense planting of maize in Xiliaohe plain.

**Keywords:** maize; dense planting; shallow drip irrigation; water and nitrogen reduction; water and nitrogen utilization efficiency

玉米是集粮食、经济、饲用和加工为一体的多功能作物,其高产稳产对保障我国粮食安全具有重要意义。选用耐密型品种、适宜增密种植是提高玉米产量的重要途径之一<sup>[1]</sup>。增密种植可明显提高玉米群体冠层光截获率、LAI、干物质积累量和群体产量;密度过高则增加群体生长的空间压力,抑制单株生长,使根系生长发育受限,不利于产量进一步提高<sup>[2-4]</sup>。研究表明,玉米单株根重、根长、根条数均随种植密度的增加而明显降低;密度过高抑制玉米根系下扎,造成根系土层表聚,进而影响植株对耕层土壤水、氮的吸收利用<sup>[5-7]</sup>。适宜的灌溉方式对促进根冠协调生长,提高玉米产量和水、氮利用效率具有重要意义。与传统灌溉方式相比,喷灌<sup>[8]</sup>、隔沟交替灌溉<sup>[9]</sup>等灌溉方式可提高玉米对水分胁迫的适应性,促进地上部植株生物量积累,同时刺激根系生长发育,提高根系活力,利于植株对水分和养分的吸收与利用<sup>[10-11]</sup>。浅埋滴灌技术是在膜下滴灌技术基础上形成的一种新型滴灌技术,具有去膜、节水、减肥、增效的功效<sup>[12]</sup>。与传统畦灌相比,浅埋滴灌可显著提高玉米生育后期干物质积累量、转运率及干物质转运量对籽粒的贡献率,同时明显提高玉米水氮利用效率,易于实现玉米高产稳产<sup>[13-15]</sup>。本试验基于团队前期的研究基础,在 90 000株·hm<sup>-2</sup>密度下设置不同水氮减量梯度,研究增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米产量、根冠特性和水氮利用效率的影响,为西辽河平原玉米浅埋滴灌水氮减量高产高效提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018、2019 年在通辽市科尔沁区农业高新科技示范园区(122°22'E, 43°36'N)进行,海拔 180 m,年平均气温 6.8℃,≥10℃的活动积温 3 200℃,平均无霜期 154 d,年均降水量 390 mm。试验地土壤为灰色草甸土,试验实施前耕层(0~20 cm)土壤基础养分情况如下:有机质含量 18.52 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量 52.26 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量 11.35 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 110.83 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验以常规水氮管理(畦灌 4 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,氮肥小口期一次追施 300 kg·hm<sup>-2</sup>)为对照(CK),采用裂区设计,以滴灌定额为主处理,分别设置传统畦灌常规灌量 40%(W1:1 600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)、50%(W2:2 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)、60%(W3:2 400 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)3 个灌溉水平;以施氮水平为副处理,分别设置常规施氮量 50%(N1:150 kg·hm<sup>-2</sup>)、70%(N2:210 kg·hm<sup>-2</sup>)、100%(N3:300 kg·hm<sup>-2</sup>)3 个施氮水平,3 次重复,小区面积 72 m<sup>2</sup>(10 m×7.2 m)。氮素供体为尿素(含氮量为 46%),各处理均基施磷酸二铵(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=18:46:0)195 kg·hm<sup>-2</sup>,硫酸钾(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=0:0:50)90 kg·hm<sup>-2</sup>。供试品种为农华 101,种植密度 9.0 万株·hm<sup>-2</sup>,采用 40 cm+80 cm 宽窄行种植。浅埋滴灌采用内镶片式滴灌管,滴头相距 20 cm,滴头流量为 2.7 L·h<sup>-1</sup>,使用

播种铺带一体机使滴灌管浅埋于小垄中间地表3~5 cm处,各处理单独配置18L压差式施肥罐和水表,水肥一体化施肥法将氮肥溶于施肥罐内结合灌溉分别在拔节期、大喇叭口期、吐丝期按3:6:1比例追施,以水表控制灌水量。畦灌氮肥追施于小口期一次性人工撒施,在每个畦首安装球阀并安装水表以控制灌水量。2018年5月1日播种,10月1日测产收获;2019年5月2日播种,10月3日测产收获。浅埋滴灌每年灌溉7次,传统畦灌每年灌溉4次。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系生物量 于吐丝期、乳熟期和完熟期,在各小区同行内选取3株代表性连续的植株,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,共3层。将各土层内的所有根系标记分别装入自封袋内带回实验室,用水浸泡冲洗,洗净后挑出杂质和死根,在烘箱内105℃杀青30 min,80℃烘至恒重后,测定根干质量,计算各土层根系分布比例。

1.3.2 地上部生物量 于吐丝期和完熟期,在各小区同行内连续选取3株有代表性的植株,按茎鞘、叶片、穗轴、苞叶和籽粒分开,在烘箱内105℃杀青30 min,80℃烘至恒重后,测定干物质质量。

吐丝前干物质积累量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 吐丝期干物质积累量

吐丝后干物质积累量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 完熟期干物质积累量 - 吐丝期干物质积累量

籽粒干物质转运量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 吐丝后籽粒干物质积累量 - 成熟期籽粒干物质积累量

1.3.3 产量及其产量构成因素 于完熟期,在各小区选取24 m<sup>2</sup>测产面积,3次重复,分别计算各测产区有效穗数,人工脱粒后测鲜粒质量和含水率,并折算成含水量为14%产量;之后分别取10穗有代表性果穗,风干后考种,测定穗行数、行粒数和千粒重。

### 1.3.4 水氮利用效率

灌溉水利用效率(*IWUE*) ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) = 产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )/灌水量( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )

氮肥偏生产力(*NPEP*) ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = 产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )/施氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

### 1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据整理,采用SPSS19.0软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米根系分布的影响

由表1可知,不同水氮减量处理根干质量均随

土层的加深而减少,各土层根干质量随灌溉量和施氮水平的增加而增加。吐丝期,0~20 cm土层除W3N3外,其他各处理根干质量均显著低于CK,20~40、40~60 cm土层W2N3和W3N3处理根干质量均与CK无显著差异。同一灌溉量下,0~20、20~40 cm土层各处理根干质量除2019、2018年20~40 cm土层W2灌溉量下N3处理显著高于N2处理外,其他灌溉量下N3处理与N2处理的差异均不显著,但均显著高于N1处理;同一施氮水平下,N1处理不同土层各灌溉量处理根干质量间的差异不显著,除40~60 cm外N2、N3施氮水平下W3与W2处理根干质量的差异均不显著,但均显著高于W1处理。完熟期,不同土层W2N3、W3N2、W3N3处理根干质量均与CK的差异不显著,同一灌溉量下,除2018年20~40 cm外,N3与N2处理根干质量间差异不显著,但显著高于N1处理;同一施氮水平下,N2、N3处理下W3与W2处理根干质量间的差异不显著,N2施氮水平下W3处理显著高于W1处理,N3施氮水平下W2、W3处理均显著高于W1处理。

### 2.2 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米干物质积累与转运的影响

由表2可知,随灌溉量和施氮水平的增加,不同水氮减量处理吐丝期前和吐丝期后的干物质积累量、各器官转运量及其对籽粒贡献率均呈增加的趋势。吐丝前,除W3N2、W2N3处理外,W3N3干物质积累量均显著高于其他处理;随着生育进程的推进,吐丝后W3N3处理干物质积累量显著高于CK,N1施氮水平下各处理随灌溉量增加的变化趋势不明显。各器官干物质转运量总体表现为茎鞘>叶片,同一灌溉量下均以N1施氮水平转运量最低且随灌溉量增加的变化不明显。除W3N2、W2N3处理外,W3N3处理茎鞘干物质转运量均显著高于CK及其他处理;W2N2、W2N3、W3N2、W3N3处理和CK叶片干物质转运量的差异不显著但均显著高于其他处理。各器官籽粒转运贡献率总体表现为茎鞘>叶片且二者均随灌溉量与施氮水平的增加而增大,其中茎鞘、叶片均以W3N3对籽粒贡献率最大,与CK相比,W3N3处理茎鞘对籽粒贡献率分别提高0.37%(2018年)和0.43%(2019年),叶片对籽粒贡献率分别提高0.27%(2018年)和0.56%(2019年)。

### 2.3 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米根冠比和单位根干质量产量的影响

由图1可知,不同水氮减量处理根冠比整体随灌溉量和施氮水平的增加而呈上升的趋势,且吐丝

表 1 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米根干质量的影响/(g·株<sup>-1</sup>)

Table 1 Effects of reduction of nitrogen and irrigation of shallow drip irrigation on root dry weight of spring maize under the condition of densification

年份 Year	灌溉定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	吐丝期 Silking			成熟期 Maturity		
			0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
2018	W1	N1	14.06e	0.67e	0.29c	9.52e	0.40d	0.15e
		N2	16.69de	0.82de	0.35abc	12.19cd	0.52cd	0.23de
		N3	18.81cd	0.94cd	0.40abc	12.62c	0.56cd	0.26cd
	W2	N1	14.84e	0.79de	0.31bc	10.80de	0.45d	0.23de
		N2	18.93cd	1.03bc	0.47abc	14.42b	0.63bc	0.35b
		N3	20.52bc	1.27a	0.55a	15.72ab	0.79ab	0.41ab
	W3	N1	16.25de	0.83cde	0.30c	11.23cd	0.43d	0.18de
		N2	19.81bc	1.15ab	0.44abc	14.87ab	0.76ab	0.32bc
		N3	22.38ab	1.27a	0.52a	16.34a	0.87a	0.42a
	CK		24.01a	1.21ab	0.51ab	16.91a	0.81a	0.38ab
2019	W1	N1	15.29g	0.86d	0.26d	10.44e	0.47e	0.23f
		N2	17.52efg	1.10c	0.30cd	12.93cd	0.59de	0.32d
		N3	19.51cde	1.23b	0.35bcd	13.34bc	0.64cd	0.36cd
	W2	N1	16.18g	0.98d	0.29cd	11.72cde	0.54de	0.29de
		N2	18.74def	1.23b	0.38bcd	15.12ab	0.75bc	0.37bc
		N3	21.65be	1.34a	0.46ab	16.26a	0.86ab	0.42ab
	W3	N1	16.45fg	0.98d	0.31cd	10.69de	0.48e	0.19f
		N2	20.57bcd	1.23b	0.39bc	15.23ab	0.72c	0.38bc
		N3	22.58ab	1.38a	0.55a	17.37a	0.94a	0.48a
	CK		24.18a	1.42a	0.57a	17.22a	0.91a	0.41ab

注: 同列数据后不同小写字母表示在不同水氮处理之间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: Different lowercase letters after the same column data showed significant differences between different water and nitrogen treatments ( $P < 0.05$ ), the same below.

表 2 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对玉米干物质积累与转运的影响

Table 2 Effects of reduction of nitrogen and irrigation of shallow drip irrigation on dry matter accumulation and transportation of spring maize under the condition of densification

年份 Year	灌溉定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	干物质积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Dry matter accumulation		干物质转运量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Dry matter translocation		籽粒贡献率/% Grain contribution rate	
			吐丝前 Before silking	吐丝后 After silking	茎鞘 Stem	叶片 Leaf	茎鞘 Stem	叶片 Leaf
			2018	W1	N1	8050.05e	9993.60d	837.45f
N2	9367.50cd	10719.90d			1011.15de	362.25de	10.11ab	3.62d
N3	10455.30bc	12078.90c			1126.95cd	400.35cd	10.14ab	3.60d
W2	N1	8538.15de		10724.40d	886.05ef	319.20de	8.98d	3.23e
	N2	10820.70b		14173.65ab	1231.95bc	482.25bc	9.40c	3.68d
	N3	11621.25ab		14651.40ab	1334.25ab	572.85ab	9.86b	4.23ab
W3	N1	9018.45de		10917.15cd	939.90ef	398.25cd	9.28c	3.93c
	N2	11679.00ab		14570.85ab	1331.10ab	551.25ab	9.92b	4.11bc
	N3	12238.20a		15271.80a	1453.05a	617.25a	10.27a	4.36a
	CK		12784.05a	13916.25b	1267.35bc	523.80ab	9.90b	4.09bc
2019	W1	N1	8888.40f	10432.80e	975.60f	288.90d	9.65e	2.86f
		N2	10008.90def	11077.20de	1184.40e	371.70cd	11.01cd	3.46cde
		N3	10822.50de	11682.00d	1382.40cd	430.20bcd	12.04bc	3.75c
	W2	N1	9523.80ef	10581.30e	1153.80e	326.70cd	11.11cd	3.14ef
		N2	11436.30cd	13675.50b	1455.30c	481.50bc	10.80d	3.57cd
		N3	12656.70abc	12565.80c	1702.80ab	601.20ab	13.73a	4.85a
	W3	N1	9923.40ef	11230.20de	1242.90de	368.10cd	11.11cd	3.29de
		N2	12370.50bc	14085.00ab	1678.50ab	576.90ab	12.11bc	4.16b
		N3	13313.70ab	14624.10a	1821.60a	685.80a	12.50b	4.71a
	CK		14063.40a	13589.10b	1629.90b	559.80ab	12.07bc	4.15b



期>完熟期。吐丝期,2018、2019 年 W3N3 处理根冠比与 CK 的差异均未达显著水平。同一灌溉量下,2018 年除 W3 灌溉量外,其他灌溉量下均表现为 N3 与 N2 处理根冠比的差异不显著但显著高于 N1 处理,2019 年除 W2 灌溉量下 N1 与 N3 处理根冠比的差异不显著外,其他灌溉量下均表现为 N1 和 N2 处理根冠比显著低于 N3 水平;同一施氮水平下,2018 年 W1 与 W2 处理根冠比差异均未达显著水平,2019 年除 N1 水平外,W1 处理根冠比显著高于 W2 和 W3 处理。完熟期,2018 年 CK 除与 W1N2、W2N3 和 W3N3 处理根冠比的差异不显著外,显著高于其他处理。同一灌溉量下,除 W1N2 处理外,其他灌溉量下均表现为 N3 与 N2 处理根冠比的差异不显著,但二者均显著高于 N1 处理;同一施氮水平下,除 W1N3 处理显著低于 W3N3 处理外,各灌溉量间的差异均未达显著水平。2019 年 N3 处理下各灌溉量处理根冠比均与 CK 的差异不显著,N1 处理下各灌溉量处理显著低于 CK。同一灌溉量下,W3 灌溉量下各施氮处理间差异显著,表现为 N3>N2>N1,W2 灌溉量下 N1 与 N2 处理根冠比的差异不显著但二者均显著低于 N3 处理,W1 灌溉量下 N2 与 N3 处理差异不显著但均显著高于 N1 处理。同一施氮水平下,N2、N3 处理下 W2 与 W3 处理根冠比的差异

均不显著,N1 施氮水平下,W1 与 W3 处理根冠比的差异不显著但二者均显著低于 W2 处理。

不同水氮减量处理单位根干质量产量整体随灌溉量和施氮水平的增加而呈降低的趋势,吐丝期,不同水氮减量处理单位根干质量产量均显著高于 CK。同一灌溉量下,N1 与 N2 处理单位根干质量产量的差异不显著但显著高于 N3 处理;同一施氮水平下,2018 年除 N2 水平下 W1 与 W2 处理单位根干质量产量的差异不显著但显著高于 W3 处理外,N1、N3 水平下 W1 与 W3 处理差异不显著,2019 年不同灌溉量间的差异均不显著。完熟期,除 2019 年 W3N3 处理单位根干质量产量与 CK 差异不显著外,各处理均显著高于 CK。同一灌溉量下,2018、2019 年 N1 处理均显著高于 N3 处理;同一施氮量下,2018 年 N1 施氮水平下 W1、W2 处理均与 W3 处理差异不显著,W1 处理显著高于 W2 处理,N2 施氮水平下 W1、W3 处理均与 W2 处理差异不显著,W1 处理显著高于 W3 处理,N3 施氮水平下 W2 与 W3 处理差异不显著但二者均显著低于 W1 处理;2019 年 N1 施氮水平下 W1 处理与 W3 处理差异不显著但二者均显著高于 W2 处理,N2 水平下各灌溉量间差异不显著,N3 水平下 W2 与 W3 处理差异不显著但二者均显著低于 W1 处理。

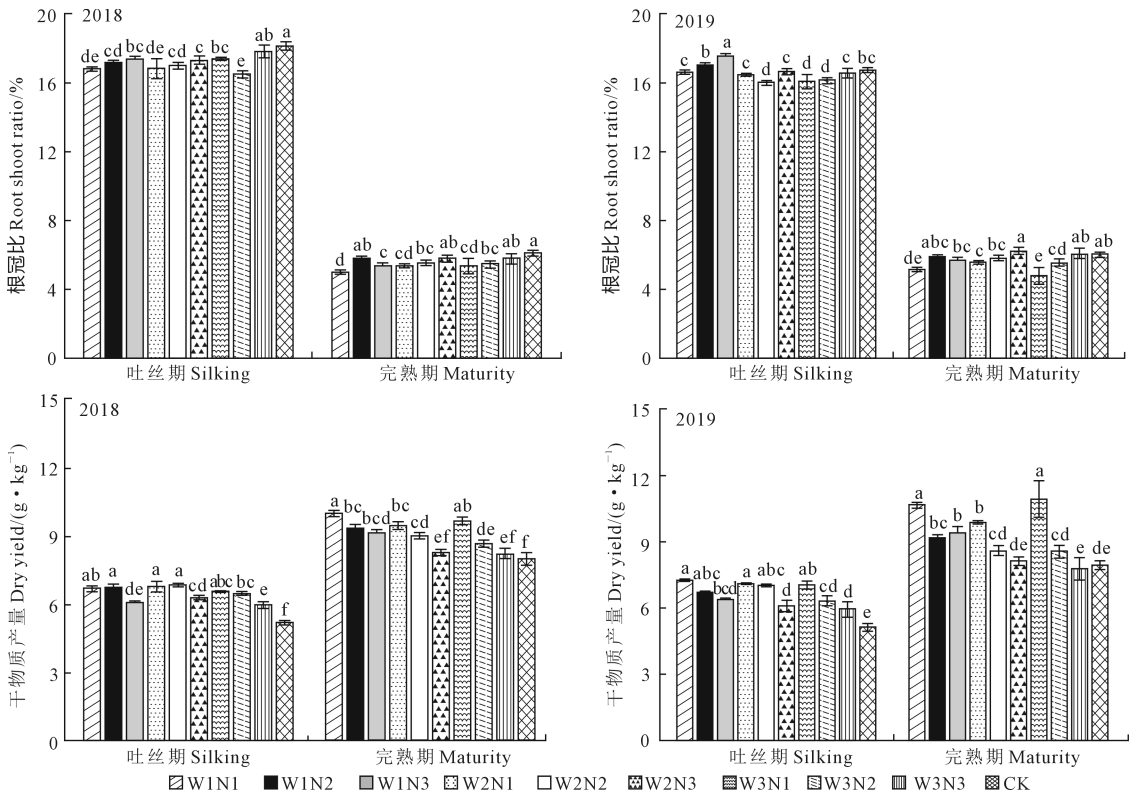


图 1 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对玉米根冠比和单位根干质量产量的影响

Fig.1 Effects of reduction of nitrogen and irrigation of shallow drip irrigation on root-shoot ratio and yield per unit root dry weight of maize under the condition of densification

## 2.4 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米产量和产量构成因素的影响

由表 3 可知,不同水氮减量处理的穗粒数、千粒重、产量均随施氮水平与灌溉量的增加而增加。2018 年 W1N3、W2N2、W2N3、W3N2 和 W3N3 处理穗粒数与 CK 的差异不显著,2019 年除 W2N3、W3N3 处理穗粒数与 CK 的差异不显著外,其他处理穗粒数均显著低于 CK。同一灌溉量下,2018 年 N2 与 N3 处理穗粒数的差异不显著,2019 年 N3 处理显著高于 N1 处理;同一施氮水平下,2018 年除 N1 处理的 W3 显著高于 W1 外,其他灌溉量下各处理间的差异均不显著,2019 年 N2、N3 水平下 W2 与 W3 处理穗粒数的差异不显著,但均显著高于 W1 处理。2018 年 W3N3 处理千粒重与 CK 的差异不显著,2019 年除 W2N3、W3N3 处理千粒重与 CK 的差异不显著外,其他处理均显著低于 CK。同一灌溉量下,2018 年、2019 年 N3 处理显著高于 N1 处理;同一施氮水平下,N1 水平下 2018 年不同灌溉量处理千粒重的差异均不显著,2019 年 W1、W3 处理与 W2 处理差异不显著,且 2018 年 W3 处理显著高于 W1 处理,N2 水平下 2018、2019 年均表现为 W1、W3 处理均与 W2 处理差异不显著,W3 处理显著高于 W1 处理,N3 水平下 2018 年各灌溉量间差异显著,表现为 W3>W2>W1,2019 年各灌溉量间差异未达显著

水平。2018 年、2019 年均以 CK 产量为最高,且与 W2N3 和 W3N3 的差异不显著,但显著高于其他处理。同一灌溉量下,除 2019 年 W1 灌溉量下 N2 处理产量显著低于 N3 处理外,其他灌溉量下 N2 与 N3 处理产量的差异均不显著;同一施氮水平下,N1 水平下不同灌溉量处理产量随灌溉量增加的变化不明显,N3 水平下 W2 与 W3 处理产量的差异不显著,但二者均显著高于 W1 处理。

## 2.5 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米水氮利用效率的影响

由图 2 可知,2018 年、2019 年 CK 灌溉水利用效率均显著低于其他处理。同一灌溉量下,除 2019 年 W1 灌溉量下 N3 处理灌溉水利用效率显著高于 N2 处理外,其他灌溉量下均表现为 N3 与 N2 处理灌溉水利用效率的差异不显著但均显著高于 N1 处理;同一施氮水平下,不同灌溉量处理灌溉水利用效率的差异均达显著水平。2018 年、2019 年 W1N3 处理氮肥偏生产力显著低于 CK,W2N3 和 W3N3 处理氮肥偏生产力与 CK 的差异均不显著,其他处理则均显著高于 CK。同一灌溉量下,不同减氮处理氮肥偏生产力间的差异均达显著水平;同一施氮水平下,除 2018 年、2019 年的 W1N3 处理外,其他处理均表现为 W2 与 W3 处理氮肥偏生产力的差异不显著,但均高于 W1 处理。

表 3 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米产量和产量构成因素的影响

Table 3 Effects of reduction of nitrogen and irrigation of shallow drip irrigation on yield and yield components of maize under the condition of densification

年份 Year	灌溉定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	有效穗数 Effective panicles /(10 <sup>4</sup> ear · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /(t · hm <sup>-2</sup> )	
2018	W1	N1	8.52a	335.27d	318.79e	9.06f	
		N2	8.67a	382.57bc	333.37cd	10.86cd	
		N3	8.50a	417.14ab	335.82cd	11.05c	
	W2	N1	8.59a	348.15cd	328.85de	9.77e	
		N2	8.67a	416.81ab	343.93bc	12.5ab	
		N3	8.71a	423.09ab	350.84b	12.63ab	
	W3	N1	8.62a	383.40bc	322.58e	10.29de	
		N2	8.82a	413.02ab	348.77b	12.42b	
		N3	8.77a	426.78a	354.19a	12.99ab	
		CK		8.42a	428.48a	362.29a	13.04a
	2019	W1	N1	8.62a	382.44e	318.93e	10.70f
			N2	8.63a	397.34de	337.23cd	11.42e
N3			8.69a	415.17cd	355.67bc	12.13d	
W2		N1	8.81a	384.27e	329.36de	11.13ef	
		N2	8.55a	424.88bc	343.41cd	12.51cd	
		N3	8.52a	439.30ab	361.38abc	12.83abc	
W3		N1	8.64a	383.46e	331.64cd	11.17ef	
		N2	8.62a	425.73bc	344.12cd	12.63bcd	
		N3	8.69a	448.10a	364.26ab	13.12ab	
		CK		8.43a	445.36a	376.61a	13.20a

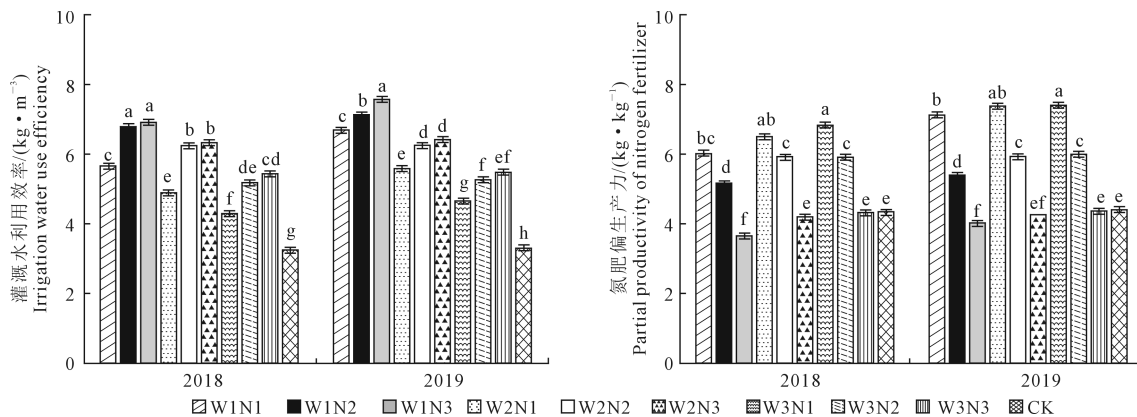


图2 增密种植下浅埋滴灌水氮减量对春玉米水氮利用效率的影响

Fig.2 Effects of reduction of nitrogen and irrigation of shallow drip irrigation on water and nitrogen use efficiency of maize under the condition of densification

### 3 讨论

增密种植是现代农业生产中提高玉米单产的重要措施之一<sup>[16]</sup>。随着种植密度的增加,作物群体内单株生长空间变小,个体间对水、肥、气、热的竞争加剧,单株冠层、根层生长发育受限,植株对耕层土壤水氮供应的响应增强,通过改变灌溉方式提高对玉米水肥的供应能力是打破增密后根冠生长受限的有效途径<sup>[17]</sup>。研究表明,滴灌可保证玉米生育后期的养分供应,提高开花后干物质积累能力和转运效率<sup>[18-19]</sup>。滴灌春玉米0~20 cm土层根系质量和根长最大,其中地表根系总长度占总根长近50%<sup>[20-21]</sup>。本研究在增密种植下比较不同灌溉方式对玉米根冠的影响,结果表明在同一施氮量下,浅埋滴灌与传统畦灌在吐丝前对玉米干物质积累、转运影响不明显,吐丝后浅埋滴灌下玉米干物质积累量、转运量以及籽粒贡献率显著高于传统畦灌,相对于传统畦灌浅层土壤中根系比例增加,深层略有下降,这与薛新伟等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。本研究还发现增密种植下浅埋滴灌各处理根冠比较传统畦灌并无明显降低,在同一施氮水平灌溉量减少50%的情况下与传统畦灌无明显差异。可见,增密种植下浅埋滴灌可促进玉米冠层干物质积累和耕层土壤根系合理分布,提升根冠协同生长能力,提升玉米增密增产潜力。

此外,相比于传统畦灌因粗放的施肥灌溉方式而导致水氮利用效率低下的问题<sup>[23-25]</sup>,滴灌水肥一体化下氮肥可直接随灌水释放到玉米植株近根部,提高植株根部对养分的吸收利用效率<sup>[26]</sup>,减小株间水分蒸发量<sup>[27]</sup>,实现水氮的高效利用。浅埋滴灌下玉米水氮利用效率高主要表现在浅埋滴灌能够实现氮肥后移<sup>[28]</sup>,灌水以点渗透的方式湿润作物根系

周围的土壤,氮肥随水分均匀地施入根区附近<sup>[29]</sup>,不仅能够保证增密后单株水分、养分的供应,还能有效避免水分的浪费以及氮素向深层土壤淋溶<sup>[30]</sup>,能够满足玉米生育中后期籽粒形成对水氮的需求,发挥水氮协同促进吸收的作用。本研究发现,增密种植下浅埋滴灌水氮减量处理灌溉水利用效率均显著高于传统畦灌。同一氮肥水平下,较传统畦灌在减少灌溉量50%的情况下氮肥偏生产力的差异不显著,表现出较高的水氮吸收利用能力。

### 4 结论

与传统畦灌常规施肥处理相比,增密种植下浅埋滴灌水氮减量处理虽因减水减肥而出现减产但二者的差异不显著。增密种植下浅埋滴灌W2N3水氮处理根系分布合理且根冠比协调,其产量、氮肥偏生产力与CK的差异均不显著,但灌溉水利用效率提高了94.15%,在增密种植下实现了玉米高产与高效的兼顾。因此,增密种植下浅埋滴灌2000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>、施氮300 kg·hm<sup>-2</sup>可满足玉米正常生长发育,并获得较高产量和水氮利用效率。该结果可为西辽河平原浅埋滴灌玉米高产与资源高效利用种植提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.  
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [2] 石德杨,李艳红,夏德军,等.种植密度对夏玉米根系特性及氮肥吸收的影响[J].中国农业科学,2017,50(11):2006-2017.  
SHI D Y, LI Y H, XIA D J, et al. Effects of planting density on root characteristics and nitrogen uptake in summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2006-2017.



- [3] 张萌,潘高峰,黄益勤,等.增密与减氮对秋玉米产量形成与氮肥利用的影响[J].农业科学与技术(英文版),2019,20(6):1-13.  
ZHANG M, PAN G F, HUANG Y Q, et al. Effects of increased planting density with reduced nitrogen application on yield formation and nitrogen utilization of autumn maize[J]. Agricultural Science & Technology, 2019, 20(6): 1-13.
- [4] 丁相鹏,白晶,张春雨,等.扩行缩株对夏玉米群体冠层结构及产量的影响[J].中国农业科学,2020,53(19):3915-3927.  
DING X P, BAI J, ZHANG C Y, et al. Effects of line-spacing expansion and row-spacing shrinkage on population structure and yield of summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 3915-3927.
- [5] NIU X L, HU T T, ZHANG F C. Severity and duration of osmotic stress on partial root system: effects on root hydraulic conductance and root growth[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 79(2): 177-186.
- [6] 戴俊英,沈秀瑛,徐世昌,等.水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,1995(3):356-363.  
DAI J Y, SHEN X Y, XU S C, et al. The effect of water stress on maize photosynthetic characters and yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995(3): 356-363.
- [7] 宋日,刘利,吴春胜,等.根系生长空间对玉米生长和养分吸收的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):58-64.  
SONG R, LIU L, WU C S, et al. Effects of root growth space on growth and N and P uptake in corn (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37(6): 58-64.
- [8] 崔吉晓,檀海斌,吴佳迪,等.微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量的影响[J].玉米科学,2017,25(3):105-110.  
CUI J X, TAN H B, WU J D, et al. Effects of fertigation on maize growth and yield through micro-sprinkling irrigation in Hebei province [J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 105-110.
- [9] 王增丽,栾元利,温广贵,等.不同灌溉方式下制种玉米叶面积指数、干物质累积与产量研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):27-31.  
WANG Z L, LUAN Y L, WEN G G, et al. Research on the leaf area index, dry matter accumulation with yield of seed maize under different irrigation methods[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 27-31.
- [10] 蔡红光,袁静超,刘剑钊,等.高密度种植条件下春玉米氮素的需求规律与适宜施氮量[J].中国农业科学,2017,50(11):1995-2005.  
CAI H G, YUAN J C, LIU J Z, et al. Optimal nitrogen application rate and nitrogen requirement characteristics in spring maize under high planting density condition [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1995-2005.
- [11] 闫伟平,谭国波,赵洪祥,等.吉林半干旱区不同灌溉方式对土壤水分变化及玉米产量的影响[J].玉米科学,2012,20(5):111-114,120.  
YAN W P, TAN G B, ZHAO H X, et al. Effect of the different irrigation methods on the soil moisture variation and yield of corn in semi-arid area of Jilin[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 111-114, 120.
- [12] 梅园雪,冯玉涛,冯天骄,等.玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J].玉米科学,2018,26(1):98-102.  
MEI Y X, FENG Y T, FENG T J, et al. Brief discussion on the efficient water-saving planting mode of shallow buried drip irrigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1): 98-102.
- [13] 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 applica-
- tion effects of shallow subsurface drip irrigation mode under mulch [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(11): 1-5.
- [14] 郭金路,谷健,尹光华,等.辽西半干旱区浅埋式滴灌对春玉米耗水特性及产量的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2514-2520.  
GUO J L, GU J, YIN G H, et al. Effect of shallow-buried drip irrigation on water consumption characteristics and yield of spring maize in semi-arid region of western Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2514-2520.
- [15] 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 Liaohe Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 69-77.
- [16] KANTE M, REVILLA P, DE LA FUENTE M, et al. Stay-green QTLs in temperate elite maize [J]. Euphytica, 2016, 207(2): 463-473.
- [17] 陈延玲,吴秋平,陈晓超,等.不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):52-59.  
CHEN Y L, WU Q P, CHEN X C, et al. Root growth and its response to increasing planting density in different maize hybrids [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 52-59.
- [18] 侯云鹏,孔丽丽,蔡红光,等.东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J].中国农业科学,2019,52(20):3559-3572.  
HOU Y P, KONG L L, CAI H G, et al. The accumulation and distribution characteristics on dry matter and nutrients of high-yielding maize under drip irrigation and fertilization conditions in semi-arid region of northeastern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(20): 3559-3572.
- [19] 杨明达,关小康,刘影,等.滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J].作物学报,2019,45(3):443-459.  
YANG M D, GUAN X K, LIU Y, et al. Effects of drip irrigation pattern and water regulation on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen, and water use efficiency in summer maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(3): 443-459.
- [20] 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.
- [21] 邹海洋,张富仓,吴立峰,等.基于不同水肥组合的春玉米相对根长密度分布模型[J].农业工程学报,2018,34(4):133-142.  
ZOU H Y, ZHANG F C, WU L F, et al. Normalized root length density distribution model for spring maize under different water and fertilizer combination [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 133-142.
- [22] 薛新伟,杨恒山,张瑞富,等.滴灌对半干旱地区土壤盐运动 and 次生盐渍化影响的研究进展[J].中国农学通报,2019,35(32):89-94.  
XUE X W, YANG H S, ZHANG R F, et al. Effects of drip irrigation on soil water and salt movement and secondary salinization in semi-arid areas: research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(32): 89-94.