

浅埋滴灌下水氮减量对春玉米干物质积累及水氮利用效率的影响

张明伟, 杨恒山, 范秀艳, 张瑞富, 张玉芹

(内蒙古民族大学农学院, 通辽 028042)

摘 要: 2017~2018年, 以传统畦灌常规施氮为对照, 采用大田裂区试验, 以传统畦灌常规灌量40%(W1)、常规灌量50%(W2)、常规灌量60%(W3)为主处理, 以常规施氮量50%(N1)、常规施氮量70%(N2)、常规氮施量(N3)为副处理, 研究浅埋滴灌下水氮减量对春玉米干物质积累及水氮利用效率的影响。结果表明, 浅埋滴灌下玉米干物质积累量、各器官干物质转运量及其对子粒贡献率均随着水、氮水平的增加而增加, 子粒产量W3N3处理与W3N2、W2N3、W2N2差异不显著, 显著高于其他处理和CK。灌溉水利用效率各处理显著高于CK; 氮肥偏生产力N1和N2水平显著高于CK, N3水平与CK无差异; 氮吸收效率W3N2最高, 除W3N1和W2N1外, 显著高于其他处理和CK。

关键词: 玉米; 浅埋滴灌; 水氮减量; 灌溉水利用效率; 氮吸收效率

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effect of Reduction of Nitrogen and Irrigation on Dry Matter Accumulation and Utilization Efficiency of Water and Nitrogen of Spring Maize in Shallow Drip Irrigation

ZHANG Ming-wei, YANG Heng-shan, FAN Xiu-yan, ZHANG Rui-fu, ZHANG Yu-qin,

(College of Agronomy, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028042, China)

Abstract: Effect of reduction of nitrogen and irrigation on dry matter accumulation, utilization efficiency of water and nitrogen of spring maize in shallow drip irrigation were studied by using the traditional border irrigation cooperated with the conventional nitrogen application as the control from 2017 to 2018. The experiment was adopted a split plot design, and the main treatment including 40%(W1), 50%(W2) and 60%(W3) of conventional irrigation and the secondary treatment including 50%(N1), 70%(N2) of conventional nitrogen fertilization and conventional nitrogen fertilization(N3). The results showed that the dry matter accumulation, dry matter transport of organ and its contribution rate to grain of each treatment improved with the increase of irrigation and nitrogen level, The yield of W3N3 there was no significant difference with W3N2, W2N3 and W2N2, which were significantly higher than that of other treatments and CK. Utilization efficiency of irrigation water of each treatment was significantly higher than that of CK; nitrogen partial productivity of N1 and N2 were significantly higher than that of CK while there was no significant difference with CK under the N3 level; efficiency of nitrogen absorption of W3N2 was the highest, which were significantly higher than other treatments and CK, except for W3N1 and W2N1.

Key words: Maize; Shallow drip irrigation; Water and nitrogen reduction; Irrigation water use efficiency; Nitrogen absorption efficiency

录用日期: 2020-05-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0300805)、内蒙古民族大学科研立项项目(NMDSS1949)

作者简介: 张明伟, 硕士, 研究方向为玉米高产高效栽培。

E-mail: 1144158082@qq.com

杨恒山为本文通讯作者。

E-mail: yanghengshan2003@aliyun.com

水资源紧缺与农业用水需求之间的矛盾是制约我国农业现代化发展和农民持续增收的重要因素, 尤其是在气候干暖化的背景下表现得尤为突出^[1,2]。水和肥是影响玉米生长发育和产量形成的两个重要因子^[3], 由于传统漫灌方式的沿用, 不但造成灌溉水的浪费, 也限制了肥料吸收利用效率的进一步提高^[4]。近年来, 兼具节水、轻简、高效等优点

的滴灌水肥一体化技术在生产中得到了广泛应用,对于缓解水资源供需矛盾、提高肥料吸收利用效率起到了重要作用^[5,6]。任中生等研究表明^[8],膜下滴灌能够促进玉米生长及氮素吸收,较传统畦灌氮肥利用率提高41.03%。尚文彬^[9]等研究表明,膜下滴灌条件下,通过水肥的调控可使玉米氮肥农学效率、水分利用效率分别提高0.84%~32.80%、1.27%~43.24%。韦彦等^[10]研究表明,滴灌施肥条件下土壤硝态氮大多聚集在表层,淋洗量比畦灌减小85.9%。GHEYSAARI等^[11]研究发现,150 kg/hm²和200 kg/hm²的施氮水平下,100%ET_c(作物需水量)和113%ET_c灌水水平的玉米氮素吸收量分别高于70%ET_c和85%ET_c。研究也表明,滴灌条件下适宜的氮肥供应可明显促进玉米对氮素的吸收,提高产量和氮肥利用效率^[12],但水肥供应过多会使大量土壤硝态氮淋移到深层土壤,导致水肥利用效率降低^[13,14]。

前人关于水肥一体化玉米水肥效率的研究大多集中在膜下滴灌上,且以单一因素的研究为主,将节水和减氮结合起来进行研究的较少。浅埋滴灌是通辽市农业技术推广站和本研究团队共同研发的一种新型滴灌技术,地表无膜覆盖、滴灌管浅埋于地表(3~5 cm),在发挥滴灌技术优势的同时,也避免残膜

污染等问题,具有较大的实际应用价值^[15],2018年被列为内蒙古自治区玉米高效节水主推技术之一,已累计推广应用50.82万hm²。浅埋滴灌水肥一体化方式下,本文探讨水肥供应对玉米产量、氮素吸收利用及水氮效率的影响,科学合理地制定灌溉施肥制度,为节水减氮,资源高效利用和促进玉米绿色可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年和2018年在通辽市科尔沁区农业高新科技示范园区(43°36'N,122°22'E)进行,海拔180 m,年平均气温6.8℃,≥10℃的活动积温3 200℃·d,平均无霜冻期为154 d,年均降水量为390 mm。试验地土壤为灰色草甸土,播前试验地耕(0~20 cm)土壤,2017年有机质含量18.52 g/kg,碱解氮含量52.26 mg/kg,有效磷含量11.35 mg/kg,速效钾含量110.83 mg/kg;2018年有机质含量19.63 g/kg,碱解氮含量50.81 mg/kg,有效磷含量13.20 mg/kg,速效钾含量118.69 mg/kg。2017、2018和历年的5~9月平均降水量及全年降水量如表1所示。

表1 2017年、2018年5~9月降水量及全年降水量
Table 1 2017 and 2018 May to September precipitation and annual precipitation mm

年份 Year	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	全年 Yearly
2017年	37.4	73.0	106.5	162.4	14.1	437.5
2018年	34.0	66.4	96.9	147.7	14.6	397.9
历年平均	30.1	70.7	112.6	86.0	31.8	380.9

1.2 试验设计

试验以传统畦灌常规施氮(水4 000 m³/hm²、氮300 kg/hm²)为对照,裂区设计,滴灌定额为主处理,分别为传统畦灌常规灌量60%(W1,1 600 m³/hm²)、常规灌量50%(W2,2 000 m³/hm²)、常规灌量40%(W3,2 400 m³/hm²)3个水平;施氮水平为副处理,分别为设常规施量50%(150 kg/hm²,N1)、常规施量70%(N2,210 kg/hm²)、常规施量(N3,300 kg/hm²)3个水平。氮素供体为尿素(含氮量为46%),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。各处理均基施磷酸二铵(18-46-0)195 kg/hm²,硫酸钾(0-0-50)90 kg/hm²,3次重复,共30个小区,小区面积72 m²(10 m×7.2 m)。供试品种为农华101,采用大小垄(40 cm、80 cm)种植,密度为7.5万株/hm²,

2017年5月2日播种,10月4日收获;2018年4月28日播种,10月2日收获。2017年和2018年各处理均滴灌7次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上生物量

在吐丝期和完熟期分别于各小区取代表性植株3株,按茎鞘、叶片、穗轴、苞叶和子粒分开,在烘箱内105℃杀青30 min,80℃烘至恒重后,测定干物质重。

1.3.2 茎鞘、叶片全氮含量

采用浓H₂SO₄-H₂O₂联合消煮,用Easy Chem全自动化学/离子分析仪测定。

1.3.3 产量及其构成因素

各小区测产面积为24 m²,计算各测产区有效穗

数,人工脱粒后测鲜粒重和含水率,并折算成含水量为14%产量。

1.3.4 相关参数计算

吐丝前干物质积累量(kg/hm²)=吐丝期干物质积累量;

吐丝后干物质积累量(kg/hm²)=完熟期干物质积累量-吐丝期干物质积累量;

吐丝前干物质积累率=吐丝期干物质积累量/成熟期干物质积累量×100%;

吐丝后干物质积累率=吐丝后干物质积累量/成熟期干物质积累量×100%;

营养器官干物质转运量(kg/hm²)=吐丝后营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量;

营养器官干物质转运率=干物质转运量/吐丝期营养器官积累量×100%;

营养器官干物质转运贡献率=干物质转运量/成熟期子粒干重×100%;

器官氮积累量(kg/hm²)=成熟期器官干重×成熟期器官含氮量;

器官氮转运量(kg/hm²)=吐丝后器官氮积累量-成熟期器官氮积累量;

灌溉水利用效率(IWUE, kg/m³)=子粒产量/灌水量;

氮肥偏生产率(NPEP, kg/kg)=子粒产量/施氮量;

氮素吸收效率(NUpE, kg/kg)=地上部植株氮总积累量/施氮量。

2 结果与分析

2.1 浅埋滴灌下水氮减量对玉米干物质积累的影响

表2 春玉米吐丝前、吐丝后干物质积累量与积累率
Table 2 Dry matter accumulation and rate of spring maize before and after spinning

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	吐丝前 Before silking		吐丝后 After silking	
			积累量(t/hm²)	积累率(%)	积累量(t/hm²)	积累率(%)
			Accumulation	Accumulation rate	Accumulation	Accumulation rate
2017年	W1	N1	8.72 e	51.07	8.35 e	48.93
		N2	10.48 cd	49.99	10.47 cd	50.01
		N3	10.71 cd	50.43	10.53 cd	49.57
	W2	N1	9.63 de	50.89	9.30 de	49.11
		N2	11.43 bc	50.87	11.04 bc	49.13
		N3	11.79 abc	50.57	11.53 abc	49.43
	W3	N1	9.50 de	51.02	9.12 de	48.98
		N2	12.50 ab	50.27	12.37 ab	49.73
		N3	13.19 a	50.52	12.92 a	49.48
	CK		13.04 a	51.75	12.15 abc	48.25
2018年	W1	N1	8.61 f	50.85	8.33 d	49.15
		N2	9.99 def	50.67	9.72 bc	49.33
		N3	10.53 cde	50.64	10.27 bc	49.36
	W2	N1	9.75 ef	50.57	9.53 cd	49.43
		N2	11.45 bcd	50.53	11.21 b	49.47
		N3	11.84 abc	50.49	11.61 ab	49.51
	W3	N1	9.29 ef	50.74	9.02 cd	49.26
		N2	12.60 ab	49.36	12.92 a	50.64
		N3	13.11 a	50.31	12.95 a	49.69
	CK		13.13 a	50.74	12.74 ab	49.26

由表2可知,吐丝期前、后干物质积累量随着水、氮水平的增加而增加,W3N3、W3N2、W2N3处理干物质积累量均与CK无显著差异;吐丝期前各处理玉米干物质积累量除W3N3、W3N2、W2N3与CK之间的差异不显著外,其他处理均显著低于CK;

吐丝期后各灌溉定额下N2、N3处理与CK之间的差异均不显著,N1处理均显著低于CK;氮肥用量处理间亦存在差异,除2017年吐丝期前W1N1外,其他处理吐丝期前后各灌溉定额下均表现为N2处理与N3处理之间的差异不显著,但二者均显著高于N1

处理。浅埋滴灌具有较大的节水潜力,在节水前提下,充足的氮肥供给仍能使玉米保持较强的物质生产能力。干物质积累率总体上吐丝期前略高于吐丝期后,CK表现更为明显。吐丝期前干物质积累率除2018年W1N1外,其他各处理均低于CK,吐丝期后干物质积累率除2018年W1N1略低于CK,W3N1与CK基本一致,其他处理均略高于CK。

2.2 浅埋滴灌下水氮减量对玉米干物质转运的影响

由表3可知,茎鞘和叶片的干物质转运量及其

对子粒贡献率均随水氮水平的增加而增加,不同器官之间表现为茎鞘>叶片。茎鞘、叶片干物质转运量W3N3、W3N2、W2N3处理均与CK无显著差异,除W3N2、W2N3处理外,W3N3均显著高于其他处理;茎鞘干物质转运率W3N3、W3N2、W2N3、W1N3(2018年)处理高于CK,其他处理均低于CK,叶片干物质转运率W3N3、W3N2、W2N3(2018年)处理高于CK,其他处理均低于CK,茎鞘转运对子粒的贡献率滴灌在低水氮水平时低于CK,叶片转运对子粒的贡献率各处理均低于CK。

表3 春玉米各器官转运量、转运率及对子粒贡献率
Table 3 Transport capacity, transport rate and contribution rate to grain of spring maize

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	转运量(kg/hm ²) Transshipment		转运率(%) Transport rate		子粒贡献率(%) Grain contribution rate	
			茎 鞘	叶 片	茎 鞘	叶 片	茎 鞘	叶 片
			Stem sheath	Blade	Stem sheath	Blade	Stem sheath	Blade
2017年	W1	N1	987.75 e	201.00 e	17.77	8.57	11.13	2.26
		N2	1 172.25 d	462.00 bcd	18.50	13.98	11.41	4.50
		N3	1 316.25 cd	370.50 cd	19.56	12.26	12.38	3.48
	W2	N1	1 135.50 de	320.25 de	18.30	12.66	11.91	3.36
		N2	1 423.50 bc	475.50 bc	19.78	14.31	12.98	4.34
		N3	1 491.75 ab	526.50 ab	20.13	15.31	13.24	4.67
	W3	N1	1 017.75 e	312.75 de	17.23	11.64	10.78	3.31
		N2	1 614.75 ab	596.25 ab	20.17	16.85	13.26	4.90
		N3	1 715.25 a	610.50 ab	20.24	16.52	13.38	4.76
	CK		1 617.00 ab	621.00 a	19.81	15.68	13.19	5.07
2018年	W1	N1	950.25 d	232.50 d	17.33	9.81	10.78	2.64
		N2	1 141.50 c	393.00 bc	18.93	12.82	11.47	3.95
		N3	1 366.50 c	380.25 c	19.90	13.76	12.98	3.61
	W2	N1	1 129.50 cd	380.25 c	18.82	13.37	11.66	3.93
		N2	1 431.00 b	445.50 b	19.10	14.62	12.82	3.99
		N3	1 707.75 ab	510.00 ab	22.27	15.72	15.13	4.52
	W3	N1	1 073.25 d	348.75 cd	18.28	13.80	11.04	3.59
		N2	1 773.75 ab	528.75 ab	21.43	16.17	14.05	4.19
		N3	1 809.00 a	583.50 a	20.85	16.93	14.13	4.56
	CK		1 614.75 ab	599.25 a	19.67	15.46	12.97	4.81

2.3 浅埋滴灌下水氮减量对玉米氮素积累量的影响

由表4可知,吐丝期前后各器官氮素积累量均随水氮用量增加而增加,茎鞘及整株氮素积累量吐丝期前后各滴灌定额下N1水平处理均显著低于CK,在同一滴灌定额下N2与N3处理间均未达显著水平;叶片和子粒氮素积累量各灌溉定额下均表现为N1处理显著低于CK,W2N2、W2N3、W3N2、W3N3与CK之间的差异不显著,叶片氮素积累量W2N3、W3N2、W3N3处理间差异不显著,子粒氮素

积累量W3N2与W3N3差异不显著;穗部氮素积累各灌溉定额下N1处理均显著低于CK,在W3滴灌定额下N2、N3处理与CK之间的差异均不显著,在W2、W3灌溉定额下N2与N3处理间未达显著水平。

2.4 浅埋滴灌下水氮减量对玉米氮素转运的影响

由表5可知,春玉米茎、叶和整株氮素转运量及转运贡献率整体随水、氮用量的增加而增加。茎鞘氮素转运量不同滴灌定额下N1各处理均显著低于CK,在W2、W3灌溉定额下N2、N3处理与CK之间的

表4 春玉米各器官氮素积累量
Table 4 Nitrogen accumulation in organs of spring maize

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	吐丝前 Before silking				吐丝后 After silking				
			茎	叶	穗	整 株	茎	叶	穗	子粒	整 株
			Stem	Leaf	Spike	Whole plant	Stem	Leaf	Spike	Grain	Whole plant
2017年	W1	N1	23.27 e	43.82 d	12.15 e	79.24 e	9.45 e	22.26 e	5.58 d	127.30 e	164.59 e
		N2	30.92 d	63.43 c	14.73 d	109.07 cd	10.84 de	32.89 cd	10.51 bc	146.60 cde	200.84 de
		N3	38.85 cd	65.36 c	16.85 c	121.06 c	12.16 d	30.16 cd	9.33 cd	149.51 cde	201.15 cd
	W2	N1	31.94 de	52.37 cd	13.96 d	98.27 de	10.43 e	25.50 de	7.54 cd	135.58 de	179.06 de
		N2	47.78 bc	81.97 b	16.87 c	146.62 b	15.35 c	35.91 abc	10.80 bc	160.70 bcd	222.76 bcd
		N3	50.76 abc	85.96 ab	17.92 bc	154.64 b	16.52 bc	39.12 abc	11.91 ab	169.51 bc	237.05 bc
	W3	N1	25.53 de	57.36 cd	14.36 d	97.24 de	10.27 e	28.19 cde	6.75 cd	132.27 e	177.48 e
		N2	57.45 ab	92.54 ab	19.04 ab	169.03 ab	18.95 a	43.92 ab	13.17 a	185.13 ab	261.18 ab
		N3	62.82 a	100.87 a	20.69 a	184.39 a	19.69 a	46.24 a	13.64 a	204.25 a	283.82 a
	CK		55.26 ab	90.90 ab	19.10 ab	165.26 ab	17.18 ab	42.89 ab	11.37 ab	186.88 ab	258.32 ab
2018年	W1	N1	27.47 d	56.01 e	13.58 e	97.06 f	10.97 e	31.35 c	9.07 d	141.40 e	192.78 e
		N2	35.10 cd	76.80 bcd	15.92 de	127.82 de	12.96 de	40.84 ab	9.39 d	159.95 de	223.15 d
		N3	44.50 bc	73.10 cd	16.29 cde	133.89 cde	15.07 cd	35.59 bc	10.50 cd	170.11 cd	231.27 d
	W2	N1	32.77 cd	70.88 cd	15.51 de	119.17 def	12.47 de	37.29 bc	10.22 cd	156.15 de	216.14 de
		N2	50.06 ab	80.58 b	16.73 cde	147.37 bcd	16.79 bc	42.08 abc	11.55 bc	185.82 bc	256.25 bc
		N3	53.29 ab	88.43 ab	17.80 bc	159.53 abc	16.87 bc	45.35 ab	12.43 b	192.36 b	267.01 bc
	W3	N1	30.53 cd	63.09 de	15.38 de	109.01 ef	11.90 e	32.56 c	10.03 d	156.65 de	211.14 de
		N2	58.26 a	93.76 ab	21.84 a	173.86 ab	18.73 ab	48.21 a	15.75 a	213.77 a	296.45 a
		N3	63.25 a	105.48 a	20.22 ab	188.95 a	20.40 a	51.20 a	14.57 a	220.29 a	306.46 a
	CK		56.16 ab	102.81 a	19.72 ab	178.68 ab	19.72 a	50.08 a	14.65 a	202.23 ab	286.68 ab

注:茎代表茎鞘,叶代表叶片,穗代表穗轴和苞叶,整株代表不同时期各器官氮素积累之和。下表同。
Note: Stem represents stem sheath, leaf represents leaf, ear represents rachis and bract, the whole plant represents the sum of nitrogen accumulation in different organs at different periods. The same below.

表5 春玉米各器官氮素转运量及转运贡献率
Table 5 Transport capacity and contribution rate of nitrogen in different organs of spring maize

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	转运量(kg/hm ²) Transshipment				转运贡献率(%) Transfer contribution rate
			茎	叶	穗	整 株	
			Stem	Leaf	Spike	Whole plant	
2017年	W1	N1	13.82 f	21.57 e	6.57 a	41.95 e	32.96
		N2	20.08 de	30.53 cd	4.22 b	54.83 d	37.40
		N3	26.70 cd	35.20 c	7.52 a	69.41 cd	46.43
	W2	N1	21.51 de	26.87 de	6.42 a	54.80 de	40.42
		N2	32.43 bc	46.06 b	6.07 ab	84.55 bc	52.62
		N3	34.24 b	46.84 b	6.01 ab	87.10 b	51.38
	W3	N1	15.26 ef	29.17 cd	7.61 a	52.04 e	39.34
		N2	38.50 ab	48.62 ab	5.87 ab	92.98 ab	50.23
		N3	43.13 a	54.63 a	7.05 a	104.81 a	51.32
	CK		38.08 ab	48.01 ab	7.74 a	93.82 ab	50.21
2018年	W1	N1	16.50 e	24.66 f	4.51 b	45.67 e	32.30
		N2	22.14 d	35.96 de	6.53 a	64.63 cd	40.41
		N3	29.43 cd	37.52 d	5.79 ab	72.74 bcd	42.76

续表5 Continued 5

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	转运量(kg/hm ²) Transshipment				转运贡献率(%) Transfer contribution rate
			茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	整 株 Whole plant	
2018 年	W2	N1	20.30 e	33.59 e	5.29 ab	59.18 de	37.90
		N2	33.27 bc	38.50 cd	5.18 ab	76.94 bc	41.41
		N3	36.43 abc	43.08 bc	5.37 ab	84.88 abc	44.12
	W3	N1	18.63 e	30.53 ef	5.36 ab	54.52 de	34.80
		N2	39.53 ab	45.56 abc	6.09 a	91.18 ab	42.65
		N3	42.86 a	54.28 a	5.64 ab	102.78 a	46.66
	CK		36.44 abc	52.73 ab	5.07 ab	94.24 ab	46.60

差异不显著,各滴灌定额下 N2 与 N3 处理间差异均未达到显著水平;叶片氮素转运量在 W1 灌溉定额下各处理均显著低于 CK,在 W2、W3 灌溉定额 N2、N3 处理与 CK 之间的差异不显著(2017 年),在 W2 灌溉定额下 N3 处理与 CK 之间差异不显著, N2 处理均显著低于 CK, W3 灌溉定额下 N2、N3 处理与 CK 之间的差异不显著(2018 年);水氮对穗部氮素转运影响不大,转运规律不明显;从氮素转运总量来看,在不同灌溉定额下 N1 处理均显著低于 CK,在 W2、W3

灌溉定额下 N2、N3 处理与 CK 之间的差异不显著,同一滴灌定额下 N2 与 N3 差异不显著,但二者均显著高于 N1 处理。这也说明浅埋滴灌水肥一体化条件下,增加灌溉定额有利于提高玉米氮素转运量,不同器官间以叶片表现得更为明显。转运贡献率 W2N2、W2N3、W3N2、W3N3 高于 CK(2017 年),2018 年除 W3N3 处理外,其他处理均低于 CK。

2.5 浅埋滴灌下水氮减量对玉米产量及水、氮利用效率的影响

表6 春玉米产量和水氮利用效率
Table 6 Yield, water and nitrogen utilization efficiency of spring maize

年 份 Year	滴灌定额 Drip irrigation quota	施氮水平 Nitrogen level	产 量 (t/hm ²) Yield	灌溉水利用效率 (kg/m ³) IWUE	氮肥偏生产力 (kg/kg) NPEP	氮吸收效率 (kg/kg) NUPE
2017 年	W1	N1	10.06 d	6.29 ab	67.07 ab	1.10 b
		N2	10.66 bc	6.66 ab	50.74 cd	0.96 cd
		N3	10.78 bc	6.74 a	35.94 ef	0.67 e
	W2	N1	10.68 bc	5.34 c	71.20 a	1.19 ab
		N2	11.71 ab	5.86 bc	55.76 c	1.06 bc
		N3	11.79 ab	5.90 bc	39.30 e	0.79 de
	W3	N1	10.39 c	4.33 d	69.27 ab	1.18 ab
		N2	12.52 ab	5.22 cd	59.63 bc	1.24 a
		N3	12.66 a	5.28 cd	42.20 de	0.95 cd
	CK		11.38 bc	2.85 e	37.93 ef	0.86 d
2018 年	W1	N1	10.01 d	6.26 ab	66.73 ab	1.29 b
		N2	10.53 bc	6.58 ab	50.14 cd	1.06 cd
		N3	11.13 bc	6.96 a	37.10 ef	0.77 ef
	W2	N1	10.55 bc	5.28 c	70.33 a	1.44 ab
		N2	11.82 ab	5.91 bc	56.29 cd	1.22 bc
		N3	11.93 ab	5.97 bc	39.77 ef	0.89 e
	W3	N1	10.28 bc	4.28 e	68.53 ab	1.41 ab
		N2	12.35 ab	5.15 cd	58.81 c	1.46 a
		N3	12.81 a	5.34 cd	42.70 e	0.99 de
	CK		11.43 b	2.86 f	38.10 ef	0.96 de

由表6知,子粒产量以W3N3处理产量最高,与W3N2、W2N3、W2N2处理差异不显著,均显著高于其他处理和CK。W1滴灌定额下N2与N3差异不显著,但二者均显著高于N1处理,W2滴灌定额下各处理间差异不显著,W3滴灌定额下N2与N3差异不显著,但二者均显著高于N1处理(2017年),N2与N1差异不显著,但N3显著高于N1处理(2018年);灌溉水利用效率各处理均显著高于CK,除W3灌量下N1与N3差异显著外,其他各灌量下不同施氮水平处理间差异均未达显著水平;氮肥偏生产力在同一滴灌定额下N1、N2水平显著高于CK,在N3水平下均与CK无显著差异,N1显著高于N2、N3水平,N2显著高于N3水平;氮吸收效率W3N2处理最高,除与W3N1、W2N1处理差异不显著外,均显著高于其他处理和CK,W1灌溉定额下不同施氮水平差异显著,W2、W3灌溉定额下N1与N2水平差异不显著,但二者均显著高于N3水平。

3 讨论

3.1 浅埋滴灌对玉米灌溉水利用效率影响

玉米是需水较多的作物,北方春玉米区适量补水是保证玉米高产的有效措施^[16]。滴灌被誉为节水灌溉的典范,膜下滴灌是将覆膜种植与滴灌相结合,具有节水、保墒、保温、增产等功效,一度是北方旱作区的主推节水高产技术^[17]。浅埋滴灌以表土覆盖代替地膜,既解决了节水保墒问题,又避免了残膜污染问题。本团队前期研究表明,在较传统畦灌减水30%的条件下,浅埋滴灌与膜下滴灌灌溉水利用效率分别为4.96 kg/m³和4.37 kg/m³,二者差异不显著,但均显著高于传统畦灌^[18]。李媛媛^[19]等研究表明,浅埋滴灌条件下滴灌定额2 350 m³/hm²可较传统畦灌3 200 m³/hm²节水26.56%。本研究试验设计较传统畦灌减水量在40%~60%,灌溉水利用效率2017年分别是6.74 kg/m³、5.90 kg/m³和5.28 kg/m³,2018年分别是6.96 kg/m³、5.97 kg/m³和5.34 kg/m³,传统畦灌2017年、2018年灌溉水利用效率分别为2.85 kg/m³和2.86 kg/m³,显著低于浅埋滴灌下各处理。研究结果表明,浅埋滴灌技术具有显著的节水增效作用。同期的田间调查结果表明,浅埋滴灌的灌溉水利用效率高的原因一是覆土代替覆膜,减少了水分的有效蒸发;二是浅埋滴灌出苗要好于地膜覆盖,苗齐、苗壮为其高产奠定了基础。

3.2 浅埋滴灌对玉米氮效率影响

水氮用量对于玉米的产量形成及水氮的吸收利用效率具有重要影响,二者之间也存在明显耦合效

应^[20,21]。李玉斌等^[22]在膜下滴灌条件下进行了水氮互作对玉米产量及水氮利用的研究表明,水氮互作对玉米产量影响差异显著,过量施氮明显降低氮肥利用效率,滴灌定额2 700 m³/hm²施氮200 kg/hm²时产量及水氮利用效率相对较高。徐泰森^[23]等研究指出,膜下滴灌条件下水、氮在一定范围内配合表现出明显的正交互作用,促进玉米的生长发育,在吉林省西部施氮量280 kg/hm²、滴灌定额500 mm为最佳水氮组合。以上研究表明,滴灌可充分发挥水氮耦合效应,在水氮减量的情况下皆能满足玉米正常水氮需求。本研究结果表明,浅埋滴灌与传统畦灌施氮量相同时,滴灌定额较传统畦灌减量40%时可获得最高产量,产量提高11.25%(2017年)和12.07%(2018年),氮肥偏生产力及氮吸收效率较传统畦灌常规施氮均有所提高,但未达显著水平,这说明浅埋滴灌较传统畦灌更能具有节水节肥、增产增效潜力。本研究还发现,浅埋滴灌下减水50%、减氮30%,较减水40%常规施氮在产量上略有下降,但差异未达到显著水平,且减水50%、减氮30%,氮肥偏生产力和氮吸收效率相对较高。当水氮用量在继续减少时,虽水氮利用效率有所提高,但产量会明显降低。综上所述,浅埋滴灌水肥一体化对氮肥利用效率有明显促进作用,一方面表现在施氮遵循氮随水入,实现以肥促水,以水调肥,发挥水氮耦合优势。另一方面表现在能够根据玉米需水需肥规律实现少量多次,对玉米水氮供需在时间上更加合理,可弥补传统畦灌常规施氮氮肥一次性追施导致生育后期氮素匮乏的不足。综合产量、水氮高效利用等因素,西辽河平原在生长季正常降水情况下,水氮用量可实现较传统畦灌常规施氮减水50%、减氮30%,此时滴灌定额为2 000 m³/hm²、施氮量为210 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 彭 霄,蒲 甜,杨 峰,等.灌水时间和灌水比例对单套作玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(21): 3763-3772.
Peng X, Pu T, Yang F, et al. Effects of irrigation time and ratio on yield and water use efficiency of maize under monoculture and intercropping[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3763-3772. (in Chinese)
- [2] 赵茹欣,王会肖,董宇轩.气候变化对关中地区粮食产量的影响及趋势分析[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文):1-14[2020-04-01].
- [3] 谭 华,郑德波,邹成林,等.水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):18-23.
Tan H, Zheng D B, Zou C L, et al. Effect of drip irrigation and fertilization on grain yield and nitrogen utilization of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 18-23. (in Chinese)

- [4] 杜 君, 杨占平, 魏义长, 等. 北方夏玉米滴灌施肥一体化技术应用效果[J/OL]. 核农学报, 2020(3): 621–628.
Du J, Yang Z P, Wei Y C, et al. Application effect of integrated drip irrigation and fertilization technology for summer maize in northern China[J/OL]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020(3): 621–628. (in Chinese)
- [5] 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 Y 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)
- [6] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 563–568.
Sun W T, Sun Z X, Wang C X, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 563–568. (in Chinese)
- [7] 周继华, 贾松涛. 不同灌溉施肥方式对春玉米产量和水分生产效率影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 224–227.
Zhou J H, Jia S T. Effects of different irrigation and fertilization methods on yield and water use efficiency of spring corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 224–227. (in Chinese)
- [8] 任中生, 屈忠义, 李 哲, 等. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 149–155.
Ren Z S, Qu Z Y, Li X, et al. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao irrigation district, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 149–155. (in Chinese)
- [9] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 49–55.
Shang W B, Zhang Z X, Zheng E N, et al. Nitrogen-water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 49–55. (in Chinese)
- [10] 韦 彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 67–72.
Wei Y, Sun L P, Wang S Z, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 67–72. (in Chinese)
- [11] Gheysari M, Mirlatifi S M, Homae M, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 946–954.
- [12] Sui J, Wang J D, Gong S H, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 132–139.
- [13] Badr M A, Hussein S D A, Eltohamy W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands[J]. Gesunde Pflanzen, 2010, 62(1): 11–19.
- [14] Man J G, Yu J S, White P J, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 26–37.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 张祖光. 补充性灌溉对旱地玉米生长和产量的影响[D]. 中国农业科学院, 2016.
- [17] 岳文俊, 陈喜靖, 王维汉, 等. 不同氮处理对温室膜下滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25(3): 461–469.
Yue W J, Chen X J, Wang W H, et al. Effects of different nitrogen treatments on yield and quality of greenhouse muskmelon under mulched drip irrigation condition[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(3): 461–469. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] 李媛媛, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌条件下不同灌水量对春玉米干物质积累与转运的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(8): 1234–1242.
Li Y Y, Yang H S, Zhang R F, et al. Effects of different irrigation amount on dry matter accumulation and transportation of spring maize under shallow subsurface drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(8): 1234–1242. (in Chinese)
- [20] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2008(5): 870–878.
Zhang Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008(5): 870–878. (in Chinese)
- [21] 刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2007(2): 286–291.
Liu X Y, Tian C Y. Coupling effect of water and nitrogen of cotton under plastic mulching by drip irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2007(2): 286–291. (in Chinese)
- [22] 李玉斌, 马忠明. 水氮互作对膜下滴灌玉米产量及水氮利用的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(2): 102–109.
Li Y B, Ma Z M. Effect of irrigation and nitrogen amount on yield, water and nitrogen use efficiency of maize under plastic mulched drip irrigation[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(2): 102–109. (in Chinese)
- [23] 徐泰森, 孙 扬, 刘彦萱, 等. 膜下滴灌水肥耦合对半干旱区玉米生长发育及产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(5): 118–122.
Xu T S, Sun Y, Liu Y X, et al. Effects of combinations of water and nitrogen on growth and yield of drip irrigation under plastic film mulching maize in western Jilin province[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(5): 118–122. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)