

适宜灌水施氮方式提高制种玉米产量及水氮利用效率

漆栋良^{1,2}, 胡田田^{1*}, 宋雪³

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 长江大学农学院, 荆州 434025;
3. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 郑州 450002)

摘要: 为通过不同灌水施氮方式调控干旱区作物收获指数提高资源利用效率, 以制种玉米“金西北 22 号”为供试材料, 进行了为期 2 a 的田间试验。试验采用灌水方式 (交替灌水、固定灌水、均匀灌水) 与施氮方式 (交替施氮、固定施氮、均匀施氮) 完全随机组合设计, 测定生育期内作物耗水量 (evapotranspiration, ET) 和成熟期植株的生物量、籽粒产量及其构成 (穗长、穗粗、行粒数和千粒质量等) 和作物吸氮量, 折算收获指数 (harvest index, HI)、水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 和氮利用效率 (nitrogen use efficiency, NUE)。结果表明, 灌水施氮方式只对行粒数有显著影响。ET 只受灌水方式影响, 交替灌水较其他灌水方式显著减小 ET。WUE 表现为: 灌水方式相同时, 交替施氮和均匀施氮大于固定施氮; 施氮方式相同时, 交替灌水>均匀灌水>固定灌水。玉米的吸氮量、HI 和 NUE 与 WUE 表现出相似的规律。2013 年交替灌水均匀施氮下制种玉米的 HI、WUE 和 NUE 最大, 较均匀灌水均匀施氮分别增加 5.46%、11.41%和 19.73%。交替灌水交替施氮 (水氮同区) 的表现与交替灌水均匀施氮相似。2014 年的结果与 2013 年一致。综上, 交替隔沟灌溉均匀施氮和交替隔沟灌溉交替施氮 (水氮同区) 有利于提高制种玉米的产量和水氮利用效率。

关键词: 灌水; 氮; 生物量; 产量; 收获指数; 水氮利用效率; 制种玉米

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.012

中图分类号: S275.3;S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-21-0098-07

漆栋良, 胡田田, 宋雪. 适宜灌水施氮方式提高制种玉米产量及水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 98—104. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.012 http://www.tcsae.org

Qi Dongliang, Hu Tiantian, Song Xue. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving grain yield and water-nitrogen use efficiency of seed maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 98—104. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.012 http://www.tcsae.org

0 引言

2010 年中国农田灌溉水利用系数为 0.5 左右, 而发达国家已经达到 0.7~0.9, 农业生产用水浪费现象严重^[1]。中国化肥利用率低下, 2000 年氮肥当季利用率不足 30%^[2]。这不仅造成农业资源的极大浪费, 而且严重污染环境。如何通过水肥联合调控充分挖掘作物自身对水分、养分等环境因子的适应潜力, 实现产量和资源利用效率的同步提升成为大家关注的焦点问题^[3-6]。

近年来提出的根区局部灌溉高效节水技术, 是植物补偿生长理论在实践中的应用和扩展^[7]。局部灌溉可以调控作物根系形态建成, 以弥补非灌溉区水分亏缺对植物生长的影响, 达到维持甚至增加作物产量的目的^[8-9]。此外, 局部灌溉可以抑制作物的冗余生长^[10]并且提高品质^[11]。其中, 分根区交替灌溉技术 (alternate partial root zone irrigation, APRI) 在干旱、半干旱地区得到了广泛的应用, 取得了良好的节水效益^[12-13]。

研究发现, 作物水分利用效率的高低除与作物需水量、灌水量和灌水方式等因素有密切关系外, 同时还受土壤养分状况和施肥方式的影响^[14]。同样, 氮肥利用率也与灌水方式密切相关^[15]。若采用高效节水灌溉技术 (如间歇灌溉), 原有长期灌溉条件下的施肥方式 (均匀撒施) 不变会导致氮肥的挥发损失大量增加, 多年后导致土壤肥力下降, 不利于农业可持续发展^[16]。但是局部灌溉下, 特别是 APRI 下的施氮方式较少受到关注。鉴于以上考虑, 应对局部灌溉下养分供应方式进行深入研究, 以充分发挥水氮协同效应。

前人研究了不同灌水方式与基追肥比例对玉米产量和水肥利用的影响^[17], 但未涉及与不同根区的肥料供应方式的耦合效应。笔者在大田条件下分别研究了不同灌水施氮方式对玉米根系生长分布的影响^[18]和土壤硝态氮时空分布的影响^[19], 但未涉及二者对收获指数、产量构成和水氮利用效率的影响。因此, 本文探讨不同灌水施氮方式条件下玉米产量构成、收获指数和水氮利用规律, 以期通过适宜施氮方式提高局部灌溉下作物收获指数和水氮利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2013 年和 2014 年在农业部作物高效用水武威科学观测试验站 (37°57'20"N、102°50'50"E) 进行。试验地概况见文献^[18]。

收稿日期: 2018-06-22 修订日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079124); 国家“十二五”863 计划项目 (2011AA100504)

作者简介: 漆栋良, 甘肃渭源人, 博士, 主要从事农业水土环境调控及水肥资源高效利用研究。Email: qdl198799@126.com

*通信作者: 胡田田, 陕西礼泉人, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。Email: hutiant@nwsuaf.edu.cn

1.2 试验设计

试验设施氮方式和灌水方式 2 个因素，2013 年各设 3 种不同方式，即灌水方式包括交替灌水（AI）、均匀灌水（CI）和固定灌水（FI）；施氮方式包括交替施氮（AN）、均匀施氮（CN）和固定施氮（FN），与笔者文献[18]的设计一致。不同的是固定灌水固定施氮处理又分为水氮同区（FIFNT）和水氮异区（FIFNY）2 种情况，共 10 个处理。进行均匀施氮、均匀灌水、交替施氮和交替灌水时，涉及玉米行的 2 个沟；进行固定施氮、固定灌水时固定在 1 个沟中操作。根据 2013 年的试验结果，2014 年对 AI 和 CI 2 种灌水方式及 AN 和 CN 2 种施氮方式进行研究。其中，交替灌水交替施氮处理分为水氮同步交替（灌水和施氮在同一沟内，AIANT）和水氮异步交替（灌水沟和施氮沟相反，AIANY），共 5 个处理。各处理重复 3 次。具体处理见表 1。

表 1 2013 年和 2014 年试验设计
Table 1 Experimental design in 2013 and 2014

年份 Year	处理 Treatments	灌水方式 Irrigation method	施氮方式 Nitrogen supply method
2013	AIANT	交替灌水（AI）	交替施氮（AN）
	AICN		均匀施氮（CN）
	AIFN		固定施氮（FN）
	CIAN	均匀灌水（CI）	交替施氮（AN）
	CICN		均匀施氮（CN）
	CIFN		固定施氮（FN）
	FIAN	固定灌水（FI）	交替施氮（AN）
	FICN		均匀施氮（CN）
	FIFNT		固定施氮（FN）
	FIFNY		固定施氮（FN）
2014	AIANT	交替灌水（AI）	交替施氮（AN）
	AIANY		交替施氮（AN）
	AICN		均匀施氮（CN）
	CIAN	均匀灌水（CI）	交替施氮（AN）
	CICN		均匀施氮（CN）

注：AIANT 和 FIFNT 代表灌水和施氮在同一沟内，AIANY 和 FIFNY 指灌水沟和施氮沟相反。
Note: AIANT and FIFNT represent irrigation and N fertilization within a same furrow, AIANY and FIFNY represent irrigation furrow and N fertilization furrow was reversed.

1.3 试验实施

供试作物为当地种植的制种玉米，品种是金西北 22 号。2013 年于 4 月 19 日播种，9 月 20 日收获。2014 年于 4 月 20 日垄上点播，9 月 22 日收获。2013 年和 2014 年玉米生育期内的降雨量分别是 123.6 和 178.5 mm。

各处理灌水和施氮量相同。施氮量采用当地适宜的施氮水平 200 kg /hm²（以纯 N 计）^[20]。氮肥选用尿素，分 3 次施入，基施 50%，大喇叭口期和抽雄期各追施 25%。2013 年，灌溉定额和灌溉时间采用当地常规沟灌的经验值，灌溉定额为 3 750 m³/hm²，灌水定额为 750 m³/hm²。2014 年，根据同地区 APRI 下大田玉米的经济灌溉制度^[21]，灌溉定额降低到 2 700 m³/hm²，灌水定额为 450 m³/hm²，

并增加乳熟期灌水。沟垄设置、底肥实施同文献[18]。氮肥施在沟中（垄上不施），开沟施肥，施后覆土。氮肥基施时，固定施氮在南侧（FIFNT）或北侧沟（FIFNY），交替施氮在南侧沟；追肥时，固定施氮位置不变，交替施氮在南、北侧沟交替进行。均匀施氮始终在南、北两侧沟同时施用，且两侧施氮量相等。追施氮肥时，施肥、灌水在同一天内完成，先施肥后灌水。具体实施见表 2。

表 2 2013 年和 2014 年灌水与施氮的时期与位置
Table 2 Stage and location of irrigation and nitrogen supply in 2013 and 2014

年份 Year	时期 Stage	播后天数 Days after sowing/d	交替施氮 Alternate N supply	均匀施氮 Conventional N supply	固定施氮 Fixed N supply	交替灌水 Alternate furrow irrigation	均匀灌水 Conventional furrow irrigation	固定灌水 Fixed furrow irrigation
2013	播前	-1						
	播后	3				两侧沟	两侧沟	两侧沟
	拔节	45				南侧沟	两侧沟	南侧沟
	大喇叭口	84	北侧沟	两侧沟	南/北侧沟	北侧沟	两侧沟	南侧沟
	抽雄	98	南侧沟	两侧沟	南/北侧沟	南侧沟	两侧沟	南侧沟
	灌浆	119				北侧沟	两侧沟	南侧沟
2014	播前	-1	南侧沟	两侧沟				
	播后	3				两侧沟	两侧沟	
	拔节	46				南/北侧沟	两侧沟	
	大喇叭口	86	北侧沟	两侧沟		南/北侧沟	两侧沟	
	抽雄	99	南侧沟	两侧沟		南/北侧沟	两侧沟	
	灌浆	117				南/北侧沟	两侧沟	
	乳熟	138				南/北侧沟	两侧沟	

注：固定灌水条件下，对 FIFNY，施氮位置为北侧沟，对 FIFNT 为南侧沟；对 AIANY，拔节期灌北侧沟。

Note: Under fixed furrow irrigation, position of N fertilizer application is in north of furrow for FIFNY treatment and in south of furrow for FIFNT treatment; Irrigation at jointing stage is in north furrow for AIANY treatment.

1.4 测定项目与方法

降雨量：通过距离试验地 50 m 的自动气象站获得。
土壤指标：播前和收获后，每小区随机选取 3 个采样点，取样至 100 cm 土层，每 20 cm 为一层，用烘干法测定土壤质量含水率，用 AA3 (3)型流动分析仪（德国 SEAL 公司）测定播前土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量。
地上部指标：成熟期各小区中间，选取有代表性的植株 5 株，将植株分剪，105 ℃杀青，然后 75 ℃烘干至恒质量测得其生物量；取 10 株进行考种，考种指标包括制种玉米穗长、穗粗、秃尖长、行粒数和千粒质量；选取 2 行玉米进行测产，果穗风干、脱粒、称质量，得到籽粒产量；取有代表性的植株 3 株，分茎秆和苞叶、叶片、籽粒、穗轴，烘干，称质量，粉碎过筛后用 H₂SO₄-H₂O₂

消煮, 用 AA₃(3)型流动分析仪测定植物全 N 含量。

1.5 指标计算方法

耗水量 (evapotranspiration, ET) 由水量平衡公式计算:

$$ET = P_r + M + K - C - R \pm \Delta W \quad (1)$$

式中 M 为时段内的灌水量 (mm); P_r 为时段内的降雨量 (mm); K 为时段内的地下水补给量 (mm); C 为时段内的排水量 (mm), 可忽略不计, $C=0$; ΔW 为时段内土壤储水量的变化。地下水埋深在 40 m 以下, 可忽略不计, $K=0$; R 为地表径流量, 考虑到试验制种玉米试验期间无地表径流发生, $R=0$ 。

水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 和灌溉水利用效率 (irrigation water use efficiency, IWUE): 分别为籽粒产量与生育期内耗水量的比值和籽粒产量与生育期内灌水量的比值。

氮素利用效率 (nitrogen use efficiency, NUE) = 籽粒产量 / (施氮量 + 0~100 cm 土层播前土壤矿质氮储量)。土壤矿质氮储量为土壤 NO_3^- -N 和土壤 NH_4^+ -N 储量之和。

收获指数 (harvest index, HI) = 籽粒产量 / 生物量。

氮收获指数 (nitrogen harvest index, NHI) = 籽粒吸氮量 / 秸秆吸氮量。

0~100 cm 土层土壤储水的消耗量 (soil water depletion, mm) = 播种时 0~100 cm 土层土壤的储水量 - 收获时 0~100 cm 土层土壤的储水量。其中, 土壤储水量 (mm) = 土壤容重 (g/cm^3) $\times$ 土层厚度 (cm) $\times$ 土壤质

量含水率 (%) $\times 10$ 。

1.6 数据处理

试验数据用 Sigma plot 软件绘图, SPSS12.0 统计分析软件进行方差分析与多重比较, 方差分析用 one-way ANOVA, 多重比较用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 灌水施氮方式对制种玉米产量构成要素的影响

由表 3 可以看出, 不同灌水施氮方式间玉米的穗长、穗粗和秃尖长差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。2013 年行粒数表现为: 任一灌水方式下, 交替施氮 (AN) 与均匀施氮 (CN) 无显著差异, 但显著大于固定施氮 (FN) 处理。任一施氮方式下, 行粒数表现为交替灌水 (AI) $>$ 均匀灌水 (CI) $>$ 固定灌水 (FI)。AIANT 和 AICN 处理的行粒数最大。千粒质量只受灌水方式影响, 表现为 AI 处理大于 CI 与 FI 处理。不同处理 (AIANT 处理除外) 的产量与行粒数表现出相似的规律。相同灌水施氮方式下 2014 年的籽粒产量较 2013 年减少 19.5%~35.31%。2014 年, 千粒质量只受灌水方式影响, 表现为 AI 处理 $>$ CI 处理。行粒数和产量均表现为 AICN 与 AIANT 处理 $>$ AIANY 处理 $>$ CIAN 与 CICN 处理。说明灌水施氮方式只对制种玉米行粒数产生影响, 交替隔沟灌溉均匀施氮或交替隔沟灌溉交替施氮 (水氮同区) 有利于增加制种玉米的行粒数。

表 3 不同灌水施氮方式下玉米产量及其构成因素

Table 3 Maize yield and its components for different irrigation and nitrogen supply methods

年份 Year	处理 Treatment	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/cm	秃尖长 Bare top length/cm	单株行粒数 Grains per row per plant	千粒质量 Thousand seed weight/g	产量 Grain yield/ (kg/hm^2)	生物量 Aboveground biomass/ (kg/hm^2)	收获指数 HI/%
2013	AIANT	14.41a	4.59a	0.27a	17a	304.5a	8189b	18550a	44.1a
	AICN	13.52a	4.38a	0.35a	17a	303.8a	8415a	18951a	44.4a
	AIFN	13.02a	4.08a	0.38a	16b	299.7a	7228c	16770b	43.1b
	CIAN	14.18a	4.21a	0.24a	15b	291.2b	7632b	18008a	42.0b
	CICN	13.70a	4.38a	0.34a	15b	293.4b	7913b	18331a	42.1b
	CIFN	13.30a	4.15a	0.25a	14c	293.0b	7235c	17310b	41.3c
	FIAN	14.08a	4.32a	0.31a	13c	291.4b	7266c	17740b	41.0c
	FICN	13.35a	4.29a	0.27a	13c	292.5b	7231c	17581b	41.1c
	FIFNT	12.97a	4.10a	0.34a	12d	291.9b	6871d	16855b	40.8d
	FIFNY	12.82a	4.08a	0.23a	12d	290.3b	6633d	15248c	40.2d
2014	AIANT	13.21a	4.39a	0.37a	13a	285.4a	6307a	14546a	43.4a
	AIANY	12.54a	4.27a	0.25a	12b	283.8a	5851b	13608a	43.0a
	AICN	13.12a	4.15a	0.33a	13a	289.6a	6774a	15500a	43.7a
	CIAN	13.04a	4.04a	0.41a	11c	278.2b	5228c	12328b	41.4b
	CICN	12.89a	4.18a	0.37a	11c	277.5b	5119c	12088b	41.4b

注: 相同年份同列数字后不同字母表示差异性达 0.05 显著水平; 下同。

Note: Different letters after data in same column mean significant difference at 0.05 level within a same year; The same as below.

2.2 灌水施氮方式对地上部生物量和收获指数的影响

由表 3 可知, 2013 年, AIANT、AICN、CIAN 和 CICN 处理的生物量最大, FIFNY 处理的生物量最小, 其他处理间生物量差异不显著; 不同处理收获指数与行粒数表现出相似的规律。其中, AICN 的收获指数较 CICN 增加

5.46% ($P<0.05$)。2014 年, 与 CICN 和 CIAN 处理相比, AIANT、AIANY 和 AICN 处理的生物量和收获指数均明显增大 ($P<0.05$)。说明交替隔沟灌溉均匀施氮或交替隔沟灌溉交替施氮 (水氮同区或异区) 有利于增加制种玉米生物量和收获指数。

2.3 灌水施氮方式对制种玉米利用水分的影响

由表 4 可以看出,不同处理下土壤水分利用表现不同:2013 年 0~100 cm 土层土壤储水的消耗量在 AIA NT、AICN 和 AIFN 处理下最大, FIFNT 和 FIFNY 处理下最小,其他处理间差异不显著。制种玉米生育期内耗水量(ET)仅受灌水方式影响, AI 处理明显小于 CI 与 FI 处理。WUE 和 IWUE 均表现为:灌水方式相同时, CN 与 AN 处理>FN 处理;施氮方式相同时, AI 处理>CI 处理>FI 处理。AIA NT 与 AICN 处理最大, FIFNY 和 FIFNT 处理最小。其中, AICN 的 WUE 较 CICN 增加 11.41% ($P<0.05$)。2014 年,与 CIAN 和 CICN 处理相比, AIA NT、AIA NY 和 AICN 处理下 0~100 cm 土层土壤储水的消耗量明显增加, ET 明显减小。WUE 和 IWUE 均表现为 AIA NT 与 AICN 处理>AIA NY 处理>AICN 与 CICN 处理。说明交替隔沟灌溉均匀施氮或交替隔沟灌溉交替施氮(水氮同区)有利于增加 0~100 cm 土层土壤储水的消耗量、制种玉米生育期内耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率。

表 4 不同处理的水分消耗与利用
Table 4 Depletion and utilization of soil water for different treatments

年份 Year	处理 Treatment	0~100 cm 土层土壤储水的消耗量 Soil water depletion in 0-100 cm soil depths/mm	蒸发 蒸腾量 ET/mm	水分 利用效率 WUE/ (kg m ⁻³)	灌溉水 利用效率 IWUE/ (kg m ⁻³)
2013	AIA NT	122.1a	508.6b	1.61a	2.18a
	AICN	125.4a	506.3b	1.66a	2.24a
	AIFN	117.8a	508.9b	1.42b	1.93b
	CIAN	105.4b	525.7a	1.45b	2.04b
	CICN	104.8b	530.0a	1.49b	2.11b
	CIFN	103.5b	529.1a	1.37c	1.93c
	FIAN	101.4b	520.0a	1.40c	1.94c
	FICN	100.8b	521.0a	1.39c	1.93c
	FIFNT	95.6c	528.7a	1.30d	1.83d
	FIFNY	94.3c	526.6a	1.26d	1.74d
2014	AIA NT	142.5a	428.8b	1.47a	2.34a
	AIA NY	141.6a	435.4b	1.34b	2.17b
	AICN	144.8a	438.9b	1.54a	2.51a
	CIAN	119.0b	473.9a	1.10c	1.94c
	CICN	121.3b	471.4a	1.09c	1.90c

注: ET 为蒸发蒸腾量; WUE 为水分利用效率; IWUE 为灌溉水利用效率。
Note: ET, WUE and IWUE represent evapotranspiration, water use efficiency and irrigation water use efficiency respectively.

2.4 灌水施氮方式对玉米氮素吸收和利用的影响

灌水施氮方式对玉米氮素吸收和利用的影响如表 5 所示。由表 5 可知, 秸秆吸氮量、籽粒吸氮量和氮利用效率均表现为: 2013 年, 任一灌水方式下, AN 与 CN 处理间无显著差异, 但显著大于 FN 处理。任一施氮方式下, AI 处理>CI 处理>FI 处理, 差异达显著水平。AICN 与 AIA NT 处理的吸氮量最大, FIFNY 处理的吸氮量最小。其中, AICN 的 NUE 较 CICN 增加 19.73% ($P<0.05$)。2014

年, AIA NT 与 AICN 处理大于 AIA NY、CIAN 和 CICN 处理, AIA NY、CIAN 和 CICN 处理间差异不显著。氮收获指数(NHI)表现为: 2013 年, AIA NT 与 AICN 处理最大, FIFNY 处理最小, 其他处理间差异不显著; 2014 年, 不同处理间 NHI 的差异同籽粒吸氮量。说明交替隔沟灌溉均匀施氮或交替隔沟灌溉交替施氮(水氮同区)有利于提高制种玉米的吸氮量、氮收获指数和氮素利用效率。

表 5 不同处理下制种玉米的吸氮量、
氮收获指数和氮素利用效率

Table 5 Nitrogen uptake, nitrogen harvest index and nitrogen use efficiency of seed maize for different treatments

年份 Year	处理 Treatment	秸秆吸氮量 Straw N uptake/ (kg·hm ⁻²)	籽粒吸氮量 Grain N uptake/ (kg·hm ⁻²)	氮收获 指数 N harvest index/%	氮利用效率 Nitrogen use efficiency/ (kg·kg ⁻¹)
2013	AIA NT	63.3a	123.1a	66.0a	26.4a
	AICN	65.6a	129.5a	66.4a	27.3a
	AIFN	56.9b	101.2b	64.0b	22.7b
	CIAN	56.4b	103.9b	64.8b	23.4b
	CICN	56.3b	102.7b	64.6b	22.8b
	CIFN	50.4c	88.5c	63.7b	20.9c
	FIAN	50.2c	89.6c	64.1b	19.5c
	FICN	48.9c	88.7c	64.4b	19.4c
	FIFNT	45.7d	81.4d	64.1b	17.6c
	FIFNY	42.7e	71.3e	62.6c	17.1d
2014	AIA NT	50.4a	98.4a	66.1a	20.5a
	AIA NY	47.4b	83.4b	63.8b	18.7b
	AICN	53.6a	102.5a	65.7a	21.0a
	CIAN	44.3b	75.6c	63.1b	17.6b
	CICN	45.8b	77.4c	62.8b	17.3b

3 讨论

本研究发现, 较均匀灌水均匀施氮, 交替灌水交替施氮(水氮同区)和交替灌水均匀施氮下玉米收获指数明显增大(表 3)。可能的原因是: 基于生长冗余和超补偿理论, 交替隔沟灌溉使同化产物在作物不同器官间得以最优分配, 把生长冗余减至最低限度^[22]。作物生长冗余是指作物在株高、叶面积、分枝或分蘖数、繁殖器官数量、生长期长度及生物产量对经济产量的比例等方面存在大量冗余^[23]。这在大豆^[24]和棉花^[25]等作物中也得到证实。此外, 不同施氮方式影响干物质的转移量和转移率, 采用优化施氮管理措施可以使干物质较多地分配到经济器官, 是获得高产的重要途径^[26]。说明当交替灌水与均匀施氮或交替施氮相结合时, 可以进一步减少作物生长的冗余效应。

大量研究证实了交替隔沟灌溉的节水效应, 有学者对其机理做了详细阐述^[7,13]。但是之前关于交替隔沟灌溉较均匀隔沟灌溉大幅提高 WUE 的报道多在前者的灌水量较后者的灌水量明显降低的情况下, 如有研究表明与均匀隔沟灌溉相比, 交替隔沟灌溉在灌水量减少 50%的

情况下可以维持玉米籽粒产量不变^[27]。对此, Sadras^[28]批判性地指出, 交替隔沟灌溉提高 WUE 不是源于其技术本身, 而是减少了供水量。本研究中, 相同灌水量下, APRI 下制种玉米的籽粒产量增加(表 3)而全生育期 ET 减少(表 4), 使 APRI 的 WUE 显著大于其他灌水处理(表 4)。产量增加的原因可能是: 与均匀隔沟灌溉相比, 交替隔沟灌溉可以促进根系生长、优化气孔行为和提高了收获指数等^[13]。本研究中交替灌水均匀施氮较均匀灌水均匀施氮的收获指数明显增大验证了这一点(表 3)。ET 减少的原因可能在于: 一方面, APRI 可以减少深层土壤渗漏量、植株蒸腾量^[29]和土壤蒸发量^[30], 本研究中表现为交替隔沟灌溉减小 60~100 cm 土层的土壤含水率(综合不同施氮方式, 收获时交替隔沟灌溉下 60~100 cm 土层的平均土壤质量含水率为 13.1%, 均匀隔沟灌溉和固定隔沟灌溉的相应值分别为 14.9%和 15.7%)。供试地区蒸发量很大(年均 2 000 mm 以上), 交替隔沟灌溉每次只给根系一半区域供水, 另一半维持干燥状态, 使土壤蒸发损失量降低。另一方面, 交替隔沟灌溉使 0~100 cm 土层土壤储水的消耗量增加(表 4)。这与文献[29]的研究结果一致。交替隔沟灌溉下根量增加(综合不同施氮方式, 成熟期交替隔沟灌溉下单株根干质量为 12.4 g, 均匀隔沟灌溉和固定隔沟灌溉的相应值分别为 11.4 和 10.3 g)和根系导水率增强^[31]或许可以解释这一现象。进一步地, 本试验条件下交替隔沟灌溉与均匀施氮或交替施氮的 WUE 较均匀灌水均匀施氮或交替施氮明显增大(表 4)。这可能与二者结合时进一步促进根系生长^[18]密切相关。说明采用均匀施氮或交替施氮, 可以使交替隔沟灌溉的节水效益得到更好的发挥。

本研究表明, 交替隔沟灌溉可明显增加制种玉米的吸氮量, 而且这一效应在交替施氮或均匀施氮下更加明显, 而固定施氮表现相反(表 5)。可能的原因是: 植株从土壤吸收氮素的能力与根系的表面积和土壤中可利用氮素的多少紧密相连^[32]。一方面, 交替灌水通过补偿作用可明显促进根系生长^[13], 植株吸氮量与根长密度呈显著性正相关^[33], 而且交替灌溉可促进土壤有机氮转化为矿物质氮, 使更多的矿物质氮被植物利用^[34]。更为重要的是, 由于干湿交替出现, 交替隔沟灌溉保持了良好的通气和土壤水分条件, 从而增加了土壤微生物的活性并促进氮素吸收^[35]; 另一方面, 均匀施氮或交替施氮下植株两侧土壤 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 分布均匀且在根际周围较高^[19], 与交替灌水结合可促进根系生长^[18]和有利于实现水氮的协同供应, 从而增加氮素被吸收的概率。与之相对应的是, 固定施氮处理施氮侧的土壤 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 浓度长期处于较高水平^[19], 高浓度的土壤 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 对整个根系系统有抑制作用, 不利于根系生长和水氮的协同供应^[36]。

需要注意的是, 2014 年制种玉米生育期内的降雨量较 2013 年增加 54.9 mm, 但是相同灌水施氮方式下 2014 年的籽粒产量较 2013 年减少 19.5%~35.31%(表 3)。可能的原因是: 1) 2014 年制种玉米的灌溉定额只占 2013 的 72%; 2) 试验实施 2 a 内, 制种玉米苗期至灌浆期的

降雨量大小及频率相差不大。2014 年玉米乳熟期出现一次大的降雨, 降雨量达 69.4 mm, 但此时制种玉米需水量较小^[37], 而且 2014 年还增加了乳熟期灌水, 因此该次强降雨对制种玉米产量的影响非常有限。具体原因需要进一步研究。

4 结 论

大田条件下, 对不同灌水施氮方式下制种玉米的产量和水氮利用效率进行为期 2 a 的研究, 结果表明: 任一施氮方式下, 交替隔沟灌溉下制种玉米的收获指数、水分利用效率(water use efficiency, WUE)和氮利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)最大, 均匀隔沟灌溉次之, 固定隔沟灌溉最小; 任一灌水方式下, 交替施氮和均匀施氮的收获指数、WUE 和 NUE 较固定施氮增加。交替灌水均匀施氮和交替灌水交替施氮(水氮同区)下制种玉米的收获指数、WUE 和 NUE 最大; 其中, 较均匀灌水均匀施氮, 2013 年交替灌水均匀施氮下上述指标分别增加 5.46%、11.41%和 19.73%。2014 年的结果与之相似。可见, 交替隔沟灌溉交替施氮(水氮同区)或交替隔沟灌溉均匀施氮有利于提高制种玉米的产量及水氮利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] 王震, 吴颖超, 张娜娜, 等. 我国粮食主产区农业水资源利用效率评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 292—296. Wang Zhen, Wu Yingchao, Zhang Na'na, et al. Evaluation on agricultural major grain water utilization efficiency in producing Areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 292—296. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴建富, 施翔, 肖青亮, 等. 我国肥料利用现状及发展对策[J]. 江西农业大学学报, 2003, 5(25): 725—727. Wu Jianfu, Shi Xiang, Xiao Qingliang, et al. Present situation of utilization of fertilizers in China and development strategy for fertilizers[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2003, 5(25): 725—727. (in Chinese with English abstract)
- [3] Eck H V. Irrigated corn yield response to nitrogen and water[J]. Agronomy Journal, 1984, 76(3): 421—428.
- [4] Li Shengxiu, Wang Zhaohui, Malhi S S, et al. Nutrient and water management effect on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China[J]. Advance in Agronomy, 2009, 102(9): 223—265.
- [5] 杜红霞, 冯浩, 吴普特, 等. 水、氮调控对夏玉米根系特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 1(31): 189—100. Du Hongxia, Feng Hao, Wu Pute, et al. Influence of water and N fertilization regulation on root growth characteristics of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 1(31): 189—100. (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang Yaosheng, Janz B, Engedal T, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen rates on water use efficiency and nitrogen uptake in maize[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 271—276.
- [7] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2437—2446.
- [8] Niu X, Hu T, Zhang F, et al. 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.
- [9] de Lima R S N, de Assis Figueiredo F A M M, Martins A O, et al. Partial root zone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 183: 13—22.
- [10] Dry P R, Loveys B R. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial root zone drying[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 1998, 4(3): 140—148.
- [11] Loveys B R, Stoll M, Dry P R, et al. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops[J]. *Acta Horticulturae*, 2000, 537(537): 187—197.
- [12] Sepaskhah A R, Ahmadi S H. A review on partial root-zone drying irrigation[J]. *International Journal of Plant Production*, 2010, 4(4): 241—258.
- [13] Du T S, Kang S Z, Zhang J H, et al. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66: 2253—2269.
- [14] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [15] Li F S, Liang J H, Kang S Z, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize[J]. *Plant Soil*, 2007, 295(2): 279—291.
- [16] 茆智, 崔远来, 董斌, 等. 水稻高效节水与持续高产的灌排技术[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(2): 65—67.
- Mao Zhi, Cui Yuanlai, Dong Bin, et al. Irrigation and drainage technology of high efficient saving water and continue high yield for rice production[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, 33(2): 65—67. (in Chinese with English abstract)
- [17] 农梦玲, 谢振兴, 李伏生. 灌水方式和水平与施肥方式对糯玉米产量和水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2014(4): 22—26.
- Nong Mengling, Xie Zhenxing, Li Fusheng. Effect of irrigation method & level and fertilization method on yield, water& fertilizer use of pot-grown sticky maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(4): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [18] 漆栋良, 胡田田, 吴雪, 等. 适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 144—149.
- Qi Dongliang, Hu Tiantian, Wu Xue, et al. Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 144—149. (in Chinese with English abstract)
- [19] 漆栋良, 胡田田. 灌水施氮方式对玉米生育期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 时空分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 279—287.
- Qi Dongliang, Hu Tiantian. Effects of different nitrogen supply and irrigation methods on dynamics and distribution of soil nitrate N for maize grown duration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 279—287. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2009, 28(3): 1460—1469.
- Yang Rong, Su Yongzhong. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 28(3): 1460—1469. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨秀英, 杜太生, 潘英华, 等. 沙漠绿洲区不同灌水方式条件下玉米灌溉制度研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(3): 22—24.
- Yang Xiuying, Du Taisheng, Pan Yinghua, et al. Scheduling irrigation for maize under different irrigation methods in Minqin Oasis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(3): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理[J]. *水利学报*, 2002, 33(3): 64—68.
- Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Cai Huanjie, et al. Water saving mechanism for promoting water use efficiency by using alternate furrow irrigation techniques[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(3): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵发清, 朱必凤, 马海燕. 作物的生长冗余和生命体的节约原则[J]. *生态学杂志*, 1996, 15(1): 32—34.
- Zhao Faqing, Zhu Bifeng, Ma Haiyan. The uninteresting growth of crops and economical principle of living beings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, 15(1): 32—34. (in Chinese with English abstract)
- [24] Graterol Y E, Eisenhauer D E, Elmore R W. Alternate-furrow irrigation for soybean production[J]. *Agricultural Water Management*, 1993, 24(2): 133—145.
- [25] 杜太生, 康绍忠, 张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2546—2555.
- Du Taisheng, Kang Shaozhong, Zhang Jianhua. Response of cotton Growth and water use to different partial root zone irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2546—2555. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张瑞富, 杨恒山, 毕文博, 等. 超高产栽培下氮肥运筹对春玉米干物质积累及转运的影响[J]. *作物杂志*, 2011(1): 41—44.
- Zhang Ruifu, Yang Hengshan, Bi Wenbo, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and transport of spring maize under super-high yield cultivation[J]. *Crops*, 2011(1): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [27] Kang S Z, Liang Z S, Pan Y H, et al. Alternate furrow irrigation for maize production in arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(3): 267—274.
- [28] Sadras V O, Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis[J]. *Irrigation Science*, 2009, 27(3): 183—190.
- [29] Jia D Y, Dai X L, Men H W, et al. Assessment of winter wheat grown under alternate furrow irrigation in northern China: Grain yield and water use efficiency[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, 94: 349—359.
- [30] Tang L S, Li Y, Zhang J H. Partial root zone irrigation increase water use efficiency, maintains yield and enhance economic profit of cotton in arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1527—1533.
- [31] Hu T T, Kang S Z, Li F S, et al. Effects of partial root-zone irrigation on hydraulic conductivity in the soil-root system of maize plants [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(12): 4163—4172.

- [32] Wang Huiqun, Liu Fulai, Andersen M N, et al. Comparative effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen uptake in potatoes (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Irrigation Science, 2009, 27(6): 443–447.
- [33] 马存金, 刘鹏, 赵秉强, 等. 施氮量对不同氮素效率玉米品种根系时空分布及氮素吸收的调控[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 845–859.
- Ma Cunjin, Liu Peng, Zhao Bingqiang, et al. Regulation of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution of roots and nitrogen uptake in different N use efficiency maize cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 845–859. (in Chinese with English abstract)
- [34] Wang Y S, Liu F L, Neergaard A D, et al. Alternate partial root-zone irrigation induced dry/wet cycles of soils stimulate N mineralization and improve N nutrition in tomatoes[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1/2): 167–177.
- [35] Wang J F, Kang S Z, Li F L, et al. Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil microorganism and maize growth [J]. Plant and Soil, 2008, 302(1/2): 45–52.
- [36] Zhang H, Andrea J, Peter W, et al. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate[J]. Plant Biology, 1999, 96(11): 6529–6534.
- [37] 张芮, 成自勇, 李有先. 水分亏缺对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 125–128.
- Zhang Rui, Cheng Ziyong, Li Youxian. Effect of regulated deficit drip irrigation oil growth characteristic and yield of plastic-film. mulched corn for seed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 125–128. (in Chinese with English abstract)

Rational irrigation and nitrogen supply methods improving grain yield and water-nitrogen use efficiency of seed maize

Qi Dongliang^{1,2}, Hu Tiantian^{1*}, Song Xue³

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 3. Zhengzhou University Multi-functional Design and Research Academy CO., LED, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Ridge planting-furrow irrigation has been widely used, but information on rational irrigation and nitrogen (N) supply methods under ridge planting-furrow irrigation has received only limited attention. To improve harvest index (HI) and resource use efficiency of crop through different irrigation and N supply methods in arid areas, we carried out field experiments to investigate the effect of different irrigation and N supply methods on HI and water-nitrogen use efficiency of seed maize (*Zay mays*, Gold northwestern 22) grown in the arid area of northwest China in 2013 and 2014. All experimental ridges were built in a west-east direction. The experiment was comprised of 3 irrigation methods and 3 N supply methods in 2013. The 3 irrigation treatments included alternate furrow irrigation (AI), fixed furrow irrigation (FI) and conventional furrow irrigation (CI). In the CI treatment, all the furrows were irrigated for every irrigation event. In the AI treatment, the 2 neighboring furrows were alternately irrigated during consecutive watering events. In the FI treatment, only 1 (south furrow) of the furrows was irrigated. At each irrigation treatment, the 3 N supply treatments were used and they included alternate N supply (AN), fixed N supply (FN) and conventional N supply (CN). In the CN treatment, N fertilizer was applied to all furrows. In the AN treatment, N fertilizer was alternately applied to 1 of the neighboring 2 furrows in consecutive fertilization. In the FN treatment, N fertilizer was only supplied to 1 of every 2 furrows. Evapotranspiration (ET) during maize grown season, and biomass, grain yield and its components as well as nitrogen uptake at maturity stage of maize were measured. The HI, water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE) were calculated. Based on the results of 2013, the fixed treatments (fixed furrow irrigation and fixed nitrogen supply) were excluded in 2014. The results showed that, the grains per row per plant were greatly affected by irrigation and nitrogen supply methods. Thousand seed weight was only influenced by irrigation method. The ET during maize grown season was only influenced by irrigation method, and AI significantly reduced ET compared to the other irrigation methods. The WUE of maize for AN and CN was higher than that for FN in any irrigation method; AI had the highest WUE, followed by CI and FI in any nitrogen supply method. Nitrogen uptake, HI and NUE of maize showed similar results compared to WUE. AI coupled with CN achieved the highest HI, WUE and NUE in 2013, and these increased by 5.46%, 11.41% and 19.73%, respectively if compared with CI coupled with CN. AI coupled with AN (irrigation and N fertilization were conducted within a same furrow) showed a similar result compared to AI coupled with CN. The 2014 experiment verified the above results. Therefore, alternate furrow irrigation coupled with conventional nitrogen supply and alternate furrow irrigation coupled with alternate nitrogen supply (irrigation and N fertilization were conducted within a same furrow) are useful to improve grain yield and water-nitrogen use efficiency of seed maize.

Keywords: irrigation; nitrogen; biomass; yield; harvest index; water-nitrogen use efficiency; seed maize