

适宜灌水施氮方式利于玉米根系生长提高产量

漆栋良, 胡田田^{*}, 吴 雪, 牛晓丽

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘 要: 为研究不同灌水方式和施氮方式对玉米根系生长分布的影响, 2011 年在大田条件下采用垄植沟灌技术, 设交替灌水、固定灌水、均匀灌水和交替施氮、固定施氮、均匀施氮 2 因素 3 水平的随机完全组合试验方案。分抽雄期、灌浆期和成熟期对 0~100 cm 土层监测植株正下方、植株正南侧和植株正北侧的根系生长状况。结果表明, 灌水方式对各位置根长及根系总量影响均达显著水平, 施氮方式只对植株南侧根长和根系总干质量影响显著, 二者的交互作用只对植株北侧根长和总根长影响显著。交替灌水均匀施氮在监测时期内维持了较大总根长, 并使得灌浆期植株不同位置根长、总根量(总根干质量除外)均较大, 并最终获得较大的产量(11 524 kg/hm²)。而固定灌水固定施氮总根长最小, 产量最低。各处理下 0~40 cm 土层根长所占整个土层根长比例均较高, 该比值以交替灌水均匀施氮最大。对比发现, 根系生长分布对灌水方式更加敏感, 通过不同灌水与施氮调控玉米根系生长分布应集中在 0~40 cm 土层, 交替灌水均匀施氮最有利于根系的生长和产量的提高, 为垄植沟灌下较好的灌水施氮方式。该研究为通过不同灌水施氮方式调控作物根系生长并获得高产提供了一定理论依据。

关键词: 灌溉; 作物; 肥料; 施氮方式; 根系生长分布; 产量; 玉米

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.021

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-11-0144-06

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.021 http://www.tcsae.org

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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.021 http://www.tcsae.org

0 引 言

根系是作物吸收水分和养分的主要支持器官, 其生长具有“向水趋肥”性^[1-2]。除水分、养分数量影响作物根系发育外, 水分、养分在土壤中的分布也会对根系的生长与分布产生影响。通过水肥联合作用调控作物根系的生长分布, 充分挖掘作物自身对水分、养分等环境因子的适应潜力, 实现作物粮食优质高产、提高水肥利用效率、维持农业可持续发展, 已引起研究者的广泛关注^[3-5]。

垄植沟灌技术在农业生产中被广泛应用。近年来, 国内外学者围绕该技术进行了大量的关于灌水方式方面的研究, 如根系分区交替灌溉技术提出及应用^[6]。一般地, 水分作为土壤氮肥溶解和向作物根系迁移的介质, 氮肥只有有效的融入水中才能更好的被根系吸收利用^[7]。但是“垄植沟灌”条件下施氮方式单一, 常均匀撒施在整个作物生长区内。当在该条件下进行局部灌溉时, 局部供应的水分必然导致土壤局部湿润现象。这样一来, 灌水区

域有充足的水分供氮素溶解, 而未灌水区域的氮素则不易被吸收^[8]。即使常规沟灌条件下, 处于垄顶的位置水分也难以到达。这在一定程度上不仅造成农业资源的浪费, 而且可能会引起环境污染。因此, 为该技术配以合适的灌水施氮方式显得非常必要。在前期的研究中, 笔者在大田条件下分别研究了不同施氮方式及不同灌水方式对玉米根系生长分布的影响^[9-10], 但未涉及二者对根系生长的交互作用。进一步地, 本文探讨二者耦合条件下玉米根系生长分布规律, 以期通过不同水、氮供应方式调控作物根系生长和提高产量提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设施氮和灌水 2 个因素, 各因素分 3 种不同方式, 共 9 个处理, 见表 1。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatments	灌水方式 Irrigation method	施氮方式 Nitrogen supply method
AA	交替灌水	交替施氮
AC		均匀施氮
AF		固定施氮
CA	均匀灌水	交替施氮
CC		均匀施氮
CF		固定施氮
FA	固定灌水	交替施氮
FC		均匀施氮
FF		固定施氮

收稿日期: 2015-04-06 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51079124)

作者简介: 漆栋良, 男, 甘肃渭源人, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与作物高效利用水氮研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: qdl198799@126.com

※通信作者: 胡田田, 女, 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。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: hutiantian@tom.com

各处理重复 3 次，共设置 27 个小区。进行均匀施氮、均匀灌水、交替施氮、交替灌水时，均固定在 2 个沟内操作；进行固定施氮、固定灌水时固定在 1 个沟中操作。

1.2 试验过程

试验于 2011 年 4—9 月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[10]。供试作物为当地种植的春玉米，品种是金穗 4 号。采用大田垄植沟灌技术，沟和垄的断面为梯形。沟深 30 cm，沟底宽 20 cm，垄顶宽 20 cm，垄底宽 35 cm，沟间距为 55 cm，沟长为 8 m。小区为东西走向，四周开阔，面积 27 m²，小区之间用 0.5 m 宽垄隔开，9 个小区为 1 个区组，9 个处理在区组内随机排列，区组之间设 1.5 m 宽隔离带，共 3 个区组。每小区共 7 行玉米、8 个灌水沟。

起垄前，在垄的位置以过磷酸钙（45 kg/hm²，以 P₂O₅计）作为底肥均匀施撒。之后，开沟起垄。04 月 13 日深

翻并平整土地，04 月 15 日进行小区布置，04 月 17 日挖沟起垄。04 月 21 日垄上点播，05 月 4 日出苗，05 月 10 日定苗，06 月 2 日进入拔节期，07 月 15 日进入大喇叭口期，07 月 26 日进入抽雄期，8 月 25 日进入灌浆期，09 月 25 日收获。

各处理灌水和施氮量相同，灌溉定额 3 750 m³/hm²、施氮量 200 kg/hm²。灌水量用低压管出水口处精确水表测量。灌水时间根据作物各生育阶段的水分需求确定，共灌水 5 次，分别在播后、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期，各灌水 750 m³/hm²。生育期内降雨量为 173 mm。氮肥选用尿素，分 3 次施入，基施 50%，大喇叭口期和抽雄期各 25%。肥料施在沟中（垄上不施），开沟施肥，施后覆土。氮肥基施时，固定施氮和交替施氮在南侧沟，其后固定施氮位置不变，交替施氮在南、北侧沟交替进行；均匀施氮是在南、北两侧沟同时施氮，且两侧施氮量相等，具体见表 2。

表 2 灌水与施氮的时间与位置
Table 2 Time and location of irrigation and nitrogen supply

实施日期 Applied date	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 irrigation	均匀灌水 Conventional irrigation	固定灌水 Fixed irrigation
04-21	南侧沟	两侧沟	南侧沟			
04-26				两侧沟	两侧沟	两侧沟
06-05				南侧沟	两侧沟	南侧沟
07-13	北侧沟	两侧沟	南侧沟	北侧沟	两侧沟	南侧沟
07-31	南侧沟	两侧沟	南侧沟	南侧沟	两侧沟	南侧沟
08-28				北侧沟	两侧沟	南侧沟

1.3 测定项目与方法

1) 根系指标：抽雄期（7 月 28 日）、灌浆期（8 月 25 日）和成熟期（09 月 22 日），在各处理小区正中间一行的相邻行随机选取 9 株玉米进行根系测定，采用土钻法在株下、株南 14 cm、株北 14 cm，以植株下垄顶为基准点沿根系向下间隔 20 cm 进行分层取样。取样方法及根系样本扫描同文献[10]。然后，在 105℃ 杀青 30 min，70℃ 烘至恒质量，称质量，获得根干质量。

2) 土壤指标：在采集根系样品的同时，采取各层土壤样品，用于土壤含水率和土壤 NO₃-N 含量的测定。土壤质量含水率用 105℃ 烘干法测定。土壤 NO₃-N 含量采用风干样测定，经 1 mol/L KCl 浸提后，利用紫外分光光度法（上海分析仪器厂，751-GW）测定。

3) 籽粒产量：在各小区中间，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。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2010 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 SSR 法。

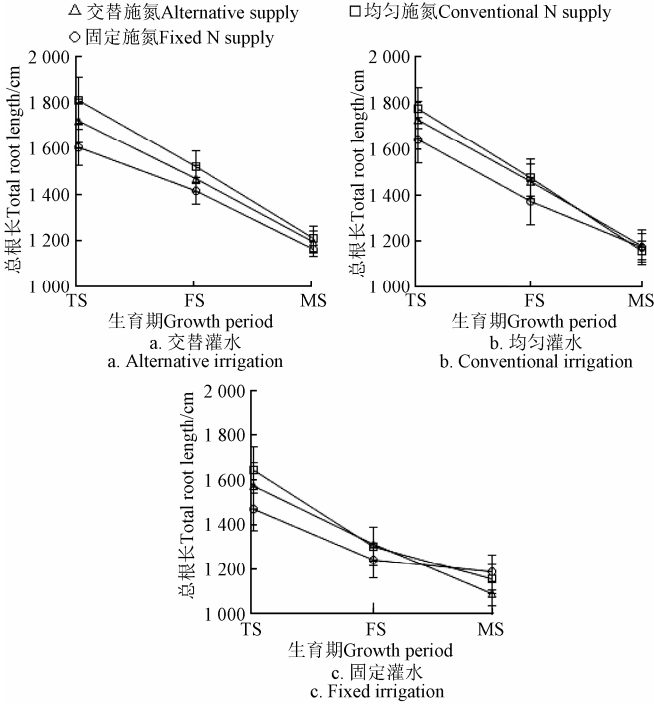
2 结果与分析

2.1 不同灌水施氮方式下玉米根长变化

2.1.1 根长随生育期的变化

在抽雄期、灌浆期和成熟期对 0~100 cm 土层玉米

总根长（株下、株南和株北样本根长之和）的测定结果表明（图 1）。



注：TS、FS 和 MS 分别表示抽雄期、灌浆期和成熟期。
Note: TS, FS, MS represents tasseling stage, filling stage and maturity stage, respectively.
图 1 不同处理下 0~100 cm 玉米总根长随生育期的变化
Fig.1 Changes in total root length of maize during growth periods at 0-100 cm for different treatments

各处理抽雄期总根长最大, 灌浆期次之, 成熟期最小。交替灌水下生育期内和均匀灌水抽雄期, 总根长均表现为均匀施氮>交替施氮>固定施氮 ($P<0.05$)。灌浆期, 均匀灌水和固定灌水下, 固定施氮<均匀施氮与交替施氮 ($P<0.05$); 成熟期, 均匀灌水下 3 种施氮方式间总根长无显著差异, 固定灌水下固定施氮和均匀施氮>交替施氮 ($P<0.05$)。另外, 统计分析结果表明交替灌溉并均匀施氮在监测时期内维持了较大总根长。说明 3 种灌水方式下不同施氮处理间总根长差异随生育期呈逐渐减小趋势, 灌水方式相同时, 均匀施氮有利于维持较大的总根长。

2.1.2 根系的空间分布

试验中最后一次施用氮肥是在玉米的抽雄期, 至此 5 次灌水也已进行了 4 次; 同时, 考虑到灌浆期是作物产量形成的关键时期, 故下文以灌浆期为例分析不同灌水施氮方式对根系生长的影响。对不同水、氮供应方式下 0~100 cm 土层中株北、株南和株下根长的测定结果表明 (表 3): 灌水方式对各位置根长影响显著 ($P<0.05$), 且在植株南侧达到极显著水平 ($P<0.01$); 施氮方式对植株南侧根长的影响显著 ($P<0.05$), 其他位置不显著; 灌水方式×施氮方式对植株北侧根长影响显著 ($P<0.05$), 其他位置不显著。值得一提的是, 固定灌水 3 种施氮方式下株南的根长明显大于株北 ($P<0.05$), 差值在 FF 下达到最大。AC 在株南、株北和株下均维持了较大的根长, AA 植株下根长与 AC 相同, 植株北侧仅次于 AC, 高于其他处理。植株北侧和植株下, 施氮方式相同时, 固定灌水小于均匀灌水与交替灌水 ($P<0.05$)。可见, 灌水方式对水平位置的根长分布起主要作用。AC 有利于维持各位置较大根长, AA 次之, 明显优于其他处理。

表 3 各处理下灌浆期植株不同位置 0~100 cm 土层玉米根长及 F 检验结果

Table 3 Length of maize roots under different positions with different treatments in soil layer of 0-100 cm at filling stage and results of F test

处理 Treatments	根长 Root length/cm		
	株北 South of plant	株南 North of plant	株下 Under plant
AA	438±14ab	410±11ab	618±28a
AC	453±27a	431±12a	630±39a
AF	415±14bc	420±19ab	589±23abc
CA	418±19bc	439±19a	595±34abc
CC	412±34bc	403±16b	576±33abc
CF	394±24bc	415±20ab	564±39abc
FA	368±15c	405±23b	519±29c
FC	359±11c	399±15b	544±31bc
FF	347±14c	413±20ab	499±27c
F 检验概率 Probability of F-test			
灌水方式 Irrigation method (I)	0.0195*	0.0087**	0.0195*
施氮方式 Nitrogen supply method (N)	0.1328	0.0243*	0.8573
灌水×施氮 I×N	0.0145*	0.1423	0.4540

注: 同列数字后不同字母表示差异性达 0.05 显著水平; *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下差异显著; 下同。

Note: Different letters after data in same column mean significant difference at 0.05 levels; * and ** represents significant differences at 0.05 and 0.01 level, respectively; Same as below.

不同灌水施氮方式下各土层根长占 0~100 cm 土层总根长的比例 (表 4) 表明: 0~40 cm 土层为 69.71%~74.75%, AC 最大, CA 最小; >60~100 cm 土层为 14.69%~18.81%, AC 最小, CC 最大。分层而言, 0~20 cm 土层占 42.54%~47.27%, AC 最大, FA 最小; >20~40 cm 土层占 25.65%~30.39%; 40~60 cm 土层占 10.57%~12.42%; >60~80 cm 土层占 8.86%~10.58%; >80~100 cm 土层所占比例最低, 为 5.64%~7.89%。各处理间变化幅度在 0~40 cm 土层最大, 达 5.04%, 其他土层均小于 2.30%。可见, 各处理 0~40 cm 土层根长所占整个土层根长比例最高且不同处理间这一比值差异最大, AC 使得 0~40 cm 土层根长所占 0~100 cm 土层根长比例最大。

表 4 玉米灌浆期各土层根长所占 0~100 cm 土层根长比例
Table 4 Root length ratio at each layer in 0-100 cm soil layer for different treatments at filling stage of maize

处理 Treatments	土层深度 Soil depth/cm				
	0~20	>20~40	>40~60	>60~80	>80~100
AA	42.85	30.39	11.18	8.86	6.72
AC	47.27	27.48	10.57	9.05	5.64
AF	44.22	28.35	11.34	9.27	6.81
CA	44.06	25.65	12.3	10.09	7.89
CC	43.27	27.12	11.49	10.58	7.53
CF	43.73	26.95	12.42	9.6	7.29
FA	42.54	28.73	11.62	9.64	7.47
FC	42.71	29.63	11.35	8.79	7.52
FF	43.54	28.91	11.39	8.66	7.5

2.2 不同灌水施氮方式下玉米灌浆期总根量及收获期籽粒产量

在表征根系生长的诸多参数中, 根长 (主根长+次生根长)、根干质量和根表面积作为表征指标被普遍采用。不同水、氮供应方式下 0~100 cm 土层中植株各位置样本总根长、总根干重和总根表面积的结果表明 (表 5), 灌水方式对总根长、总根干质量和总根表面积的影响显著, 且前 2 项达极显著水平 ($P<0.01$); 施氮方式对总根干质量的影响显著, 二者交互作用对总根长的影响显著 ($P<0.05$), 其他情况不显著。说明根系总量指标受灌水方式影响显著, 施氮方式影响集中在根系总干质量, 二者的交互作用只对总根长构成了影响。不同灌水施氮方式对籽粒产量的显著性分析表明: 灌水方式、施氮方式及二者的交互作用均对籽粒产量的影响达到显著水平。灌浆期, AC 下总根长、总根表面积最大, 也获得了最大的籽粒产量 (11 524 kg/hm²)。FF 下总根长最小, 籽粒产量最小。CC 虽使得总根干质量最大, 却没有获得最大籽粒产量。说明总根长与籽粒产量联系更加紧密, AC 有利于根系生长和增加产量。

2.3 灌浆期不同灌水施氮方式下的土壤水分和土壤 NO₃-N 含量

灌浆期 0~40 cm 土层植株不同位置的土壤质量含水率 (土壤含水率) 和土壤 NO₃-N 含量 (土壤 NO₃-N) 表现为 (表 6): 灌水方式、施氮方式及二者的交互作用对

植株南侧土壤含水率和植株北侧土壤 NO₃-N 的影响达显著水平，植株北侧土壤含水率仅受灌水方式影响，植株南侧土壤 NO₃-N 仅受施氮方式影响。植株下土壤含水率仅受灌水方式的影响显著，植株下土壤 NO₃-N 则不受灌水施氮方式影响。40~100 cm 土层中，植株南、北 2 侧土壤含水率仅受灌水方式影响，土壤 NO₃-N 仅受施氮方式影响，植株下土壤水分与氮素均不受灌水施氮方式影响（为节省篇幅，数据未出现）。说明土壤含水率主要受灌水方式影响，土壤 NO₃-N 含量主要受施氮方式影响，相比灌水方式对土壤水分和氮素分布影响更深。

表 5 灌浆期不同处理下 0~100 cm 土层玉米总根量及收获时籽粒产量及 F 检验结果

Table 5 Total root volume of maize in the soil layer of 0-100 cm at filling stage and grain yield at harvest and results of F test

处理 Treatments	总根长 Total root length/cm	总根干质量 Total root dry weight/mg	总根表面 Total root surface area/cm ²	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)
AA	1469±51b	967±17abc	1921±83b	10145±421ab
AC	1520±61a	1150±21ab	2364±93a	11524±225a
AF	1418±50bc	1143±15ab	1826±92b	9625±368bc
CA	1456±86b	822±11cd	2018±82b	9846±400b
CC	1472±54b	1196±15a	1924±104b	9725±213b
CF	1372±70bcd	1165±18ab	2031±94b	9524±358c
FA	1311±58cd	814±18cd	1983±92b	9365±411d
FC	1301±72cd	767±18d	2030±105b	9306±439d
FF	1269±82d	862±14bc	1919±84b	9021±227e
F 检验概率 Probability of F-test				
灌水方式 Irrigation method (I)	0.0003**	<0.0001**	0.0329*	0.0235*
施氮方式 Nitrogen supply method (N)	0.1512	0.0120*	0.2741	0.0341*
灌水×施氮 I×N	0.0121*	0.1310	0.6718	0.0356*

表 6 玉米灌浆期 0~40 cm 土层中各处理的土壤水分和土壤 NO₃-N 含量及 F 检验结果

Table 6 Soil water content and soil NO₃-N under different treatments in soil layer of 0-40 cm at filling stage of maize and results of F test

处理 Treatment	土壤质量含水率 Mass fraction of soil moisture/%			土壤 NO ₃ -N ⁻ Soil NO ₃ -N content/(mg·kg ⁻¹)		
	株南 South of plant	株北 North of plant	株下 Under of plant	株南 South of plant	株北 North of plant	株下 Under of plant
AA	13.1c	14.5a	14.8a	21.4b	20.0b	26.5a
AC	12.8c	14.0a	14.2a	22.7b	21.4b	24.5a
AF	14.5b	12.6b	12.8b	33.0a	17.3c	23.2a
CA	14.2b	14.0a	12.5b	24.5b	21.4b	24.1a
CC	14.3b	14.1a	13.0b	23.5b	21.6b	25.2a
CF	14.8ab	13.0a	12.4b	35.0a	16.7c	21.5a
FA	14.7ab	11.4b	12.1c	20.2b	24.8a	22.6a
FC	15.1ab	11.3b	12.0c	22.4b	25.6a	23.0a
FF	16.7a	11.5b	11.3d	34.0a	16.2c	22.4a
F 检验概率 Probability of F-test						
灌水方式 Irrigation method (I)	0.0021**	0.0247*	0.0214*	0.2145	0.0124*	0.1542
施氮方式 Nitrogen supply method (N)	0.0325*	0.1231	0.6325	0.0241*	0.0356*	0.2587
灌水×施氮 I×N	0.0412*	0.2174	0.6741	0.4561	0.0325*	0.3095

3 讨论

以灌浆期玉米根系生长分布为切入点，研究表明，灌水方式对各位置根长影响均达显著水平，施氮方式只对植株南侧根长影响显著（表 3）。另外，根系总量各指标受灌水方式的影响显著，施氮方式影响集中在根系总干质量，二者的交互作用只对总根长构成了影响（表 5）。这可能与不同的水、氮供应方式直接导致了土壤水分、氮素分布与供应的差异有关（表 6）：如在根系的主要分布层（0~40 cm 土层），仅灌水方式对植株下土壤含水率的影响达显著水平，而施氮方式对植株下土壤水分和氮素均无显著影响。植株下的根长远大于植株南、北 2 侧（表 3），因此可能受灌水方式影响更深。一般而言，水分和养分对根系生长的作用不是孤立的，而是相互作用、相互影响的^[11-12]。尽管如此，植物对养分的吸收离不开水分的供应，水分作为土壤氮肥溶解和向作物根系迁移的介质，使根系对水分的反应更敏感^[13]。类似地，杜红霞等就水、氮调控对夏玉米根系特性影响的研究表明，水分对根系干质量、根系表面积等的影响较氮肥大^[3]；石小虎等对番茄根系的研究也表明，水分作用大于氮素作用和水氮交互作用^[14]。

本研究发现，AC 使得灌浆期植株不同位置根长、总根量（总根干质量除外）均较大（表 3、表 5），并最终获得较大的产量，而 FF 总根长最小，产量最低，其他介于二者之间。原因可能在于，交替灌水可使不同区域或部位的根系交替经受一定程度的干旱锻炼^[15-16]，均匀施氮可使氮肥均匀分布在作物根系周围。二者结合时，一方面，可多次利用不同根区交替灌水对根系生长补偿效应的刺激作用^[17]，另一方面，均匀分布的土壤氮素在交替得到水分供应时，有利于植株 2 侧根系均匀生长^[9]，最终有利于整个根系的生长。该试验条件下，AC 在监测生育期内维持了较大的根量并使得灌浆期 0~40 cm 土层根长较多（表 4）也说明 AC 对根系生长较为有利。另外，AA 植株下根长与 AC 相同，最终产量也仅次于 AC，优于其他处理，可见交替施氮也较固定施氮有利于根系生长^[9]。而 FA、FC 和 FF 下，植株南侧的土壤含水率是植株北侧 130%左右（表 6），AF、CF 和 FF 下，植株南侧的土壤 NO₃-N 含量是植株北侧的 2 倍左右（表 6）。这样一来，一侧土壤水、氮供应充足，一侧却得不到有效的供应，虽促进了灌水侧根系生长，但对干燥侧无有效土壤水分及氮素可用，使得根系整体生长不利。另外，根系的改善往往有助于产量的提高，有研究表明产量与根长呈显著相关关系^[18-19]垄植沟灌下交替隔沟灌溉提高水分利用效率也与根系的改善密切相关^[20]。该试验条件下籽粒产量与总根长联系紧密（表 5），总体呈总根长越大，产量越高。这与笔者以灌水方式或施氮方式单因子条件下的结果相一致^[9-10]。

本试验条件下，FF 下灌水侧根长是非灌水侧 119%，这与 Skinner 的研究——非灌水沟是灌水沟根系生物量的 126%相反^[21]。原因可能在于，本试验中，FF 水氮同区布置，对于非灌水侧，一方面，供试地区多年平均降水量 164.4 mm，年均蒸发量 2 000 mm，水分供应非常有限，

从而可使这部分根系生长受到严重抑制、甚至死亡^[22]。另一方面,不施氮侧与非灌水侧一致,土壤中只有播前残留的氮素可用,从而限制了该侧根系的生长。对于灌水侧,也即施氮侧,水、氮供应充足,根系大量增殖,体现了根系生长的“向水趋肥”性^[1-2]。而 Skinner 的试验中,降雨量是该试验区的 2 倍多,水分相对充足,氮肥施在垄上,非灌水沟也可以得到有效的氮素供应,根量较大,而灌水沟被认为水分过多导致温度较低、通气不良,抑制了根系生长^[23]。

本文中,各处理下 0~40 cm 土层根长所占整个土层根长比例均较高(表 4),说明 0~40 cm 土层是玉米根系的主要分布层^[24-25]。另外,各处理间的这一比值在该土层变幅较大,这与该土层下土壤水分和土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化剧烈相一致(表 6)。Farre 等^[26]发现在沙壤土中,玉米通过根系吸收的大部分水来自于 0~50 cm 土层,该试验试供土壤与之相似。可见,该地区通过局部供应水、氮调控玉米根系生长也应通过调控 0~40 cm 土层的土壤水、氮供应为主。

4 结 论

灌水方式和施氮方式通过影响土壤水分和氮素的供应影响了玉米根系的生长分布。整体上,玉米根系生长分布对灌水方式较施氮方式及二者交互作用更敏感。交替灌溉并均匀施氮处理玉米总根长最大,其产量最高($11\,524\text{ kg/hm}^2$),而固定灌溉并固定施氮处理总根长最小,产量最低。交替灌溉并交替施氮表现仅次于交替灌溉并均匀施氮处理,但明显优于其他处理。通过灌水与施肥调控根系生长分布应集中在 0~40 cm 土层中。

可见,玉米根系的生长分布与水分、氮素的供应等环境条件密切相关,具有很强的可塑性。垄植沟灌条件下采用交替灌水均匀施氮最有利于玉米根系生长并获得高产,交替灌水交替施氮也较其他处理有利。然而,生产实际中,相比传统的均匀灌水和氮肥撒施在整个作物生长区域内,交替灌水需要严格控制灌水时间,保证只给设定的沟灌水;均匀撒施氮肥于沟内则比较耗时、费力。

参 考 文 献

- [1] 刘庚山,郭安红,任三学,等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2342—2352.
Liu Gengshan, Guo Anhong, Ren Sanxue, et al. The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat[J]. Acta Ecologica Science, 2003, 23(11): 2342—2352. (in Chinese with English abstract)
- [2] North G B, Nobel P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of Agave desert (Agavaceae)[J]. American Journal of Botany, 1991, 78(7): 906—915.
- [3] 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)
- [4] 李韵珠,王凤仙,刘来华. 土壤水氮资源的利用与管理 I——土壤水氮条件与根系生长[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 206—213.
Li Yunzhu, Wang Fengxian, Liu Laihua, Used and management of soil water and nitrogen resources I: Soil water and nitrogen conditions and root development[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(3): 206—213. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国农业生态学报, 2013, 21(3): 282—289.
Wang Yanzhe, Liu Xiwei, Sun Hongyun, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 282—289. (in Chinese with English abstract)
- [6] Kang Shaozhong, Zhang Jianhua. 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.
- [7] Hu Tianian, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2): 208—214.
- [8] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Corn growth and nitro-gen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(4): 609—612.
- [9] 漆栋良,吴雪,胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2804—2813.
Qi Dongliang, Wu Xue, Hu Tianian. Effects of nitrogen supply methods on root growth, yield and nitrogen use efficiency[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2014, 47(14): 2804—2813. (in Chinese with English abstract)
- [10] 漆栋良,胡阳光,胡田田,等. 不同灌水方式下春玉米的根系生长分布[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 990—996.
Qi Dongliang, Hu Yangguang, Hu Tianian, et al. Root growth and distribution of spring maize under different irrigation methods[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(11): 990—996. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杜军,杨培岭,李云开,等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 57—64.
Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2011, 27(2): 57—64. (in Chinese with English abstract)
- [12] Hodge C A, Popovid, N N. Pollution control in Fertilizer Production[M]. New York: CRC Press, 1994.
- [13] 高方胜,徐坤,徐立功,等. 土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(4): 69—72.
Gao Fangsheng, Xu Kun, Xu Ligong, et al. Effect of soil water on growth, development, yield and quality of tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2005, 14(4): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [14] 石小虎,曹红霞,杜太生,等. 膜下沟灌水氮耦合对温室番茄根系分布和水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 89—93.
Shi Xiaohu, Cao Hongxia, Du Taisheng, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root distribution and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(2): 89—93, 100. (in Chinese with English abstract)
- [15] 潘英华,康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 39—43.
Pan Yinghua, Kang Shaozhong. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternative furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(1): 39—43. (in Chinese with English abstract)
- [16] Mingo D M, Theobald J C, Bacon M A, et al. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial root zone drying: Enhancement of root growth[J]. Functional Plant Biology, 2004, 31(10): 971—978.
- [17] Buttar G S, Thind H S, Aujla M S. Methods of planting and irrigation at various levels of nitrogen affect the seed yield and water use efficiency in transplanted oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 253—260.
- [18] 刘世全, 曹红霞, 张建青, 等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1362—1371.
Liu Shiquan, Cao Hongxia, Zhang Jianqing, et al. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water nitrogen use efficiency of small pumpkin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1362—1371. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李波, 任树梅, 杨培岭, 等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 39—44.
Li Bo, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Impacts of water supply on root distribution and yield of tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [20] Kang Shaozhong, Liang Zongsuo, Hu Wei, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants[J]. Agricultural Water Management, 1998, 38(1): 69—76.
- [21] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn[J]. Plant and Soil, 1998, 199(2): 187—194.
- [22] North G B, Nobel P S. Changes in root hydraulic conductivity for two tropical epiphytic cacti as soil moisture varies[J]. American Journal of Botany, 1994, 81(1): 46—53.
- [23] Burke J J, Upchurch M J. Cotton rooting patterns in relation to soil temperature and the thermal kinetic window[J]. Agronomy Journal, 1995, 87, 1210—1216.
- [24] 郭庆发. 中国玉米栽培学[M]. 第一版. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 167—202.
- [25] 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 109—117.
Zhou Changming, Li Yuannong, Yin Minhua, et al. Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges for rain harvesting improving root growth and yield of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 109—117. (in Chinese with English abstract)
- [26] Farre I, Faci J M. Comparative response of maize and sorghum to deficit irrigation in a Mediterranean environment[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1): 135—143.

Rational irrigation and nitrogen supply methods improving root growth and yield of maize

Qi Dongliang, Hu Tiantian^{*}, Wu Xue, Niu Xiaoli

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Ridge-furrow irrigation is widely used in crop production. Few studies focus on the interaction effect of furrow irrigation methods and nitrogen supply method on crops, especially for root distribution. In this study, the coupling effects of different furrow irrigation and nitrogen supply methods on growth and distribution of root and yield for maize were investigated. Ridge-furrow irrigation was conducted in field in 2011 with spring maize of Jinsui4. Three furrow irrigation and N-fertilizer supply methods were designed including alternate, fixed and conventional furrow irrigation, and alternate, fixed and conventional nitrogen supply. Each treatment was replicated three times and the plot was layout by complete randomized design. The root length and weight beneath the plant canopy, south and north of the plant in the soil layers of 0-100 cm were measured at the growth stages of tasseling, filling and maturity with sampling at 20 cm as an interval. Grain yield was also measured at the harvest. The results showed that only root length and the total dry weight of the plant in the south were significantly influenced by nitrogen supply methods. The total root length and root length of the plant in north was influenced by the interaction of irrigation and nitrogen supply methods. The total root length of plants under the alternate furrow irrigation was kept larger in the growth period. Meanwhile, under the alternative furrow irrigation and conventional N-supply, the root length of the plant in north, south and beneath the canopy in the soil layer of 0-100 cm, as well as total root length and total root surface area at the filling stage were larger, thereby resulted in highest yield of 11 524 kg/ hm². In contrast, total root length as well as yield of fixed furrow irrigation with fixed nitrogen supply was smallest. The root length under the plant in the soil layer of 0-100 cm of the alternate furrow irrigation with alternate nitrogen supply was as large as the alternate furrow irrigation with conventional nitrogen supply. The root length ratio in the soil layer of 0-40 cm to 0-100 cm was larger under different treatments and the largest one was found in the treatment of alternate furrow irrigation combined with conventional nitrogen supply. The results suggested that root growth and distribution are more susceptible to irrigation methods. Regulation for root growth and distribution of maize through different irrigation and nitrogen supply methods should be mainly in the soil layer of 0-40 cm. Yield and root growth of maize can improved by alternate furrow irrigation with conventional nitrogen supply but inhibited by fixed furrow irrigation with fixed nitrogen supply. Alternate furrow irrigation with alternate nitrogen supply is only inferior to alternate furrow irrigation with conventional nitrogen supply in improving the yield and root growth of maize, but superior to the other treatments. Thus, alternate furrow irrigation combined with conventional nitrogen supply is considered an optimum coupling pattern of irrigation and nitrogen supply method under the ridge-furrow irrigation.

Key words: irrigation; crops; fertilizer; nitrogen supply method; root growth and distribution; yield; maize