

沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响

杨启良^{1,2}, 张富仓^{2*}, 刘小刚^{1,2}, 戈振扬¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650224; 2. 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)

摘要: 采用正交试验设计, 用美国 Dynamax 公司生产的高压流速仪 (High Pressure Flow Meter, 简称 HPFM) 的瞬时法原位测定大田玉米拔节期、抽雄期和蜡熟期的根系及冠层水分传导 (简称根及冠层水导), 研究了不同沟灌方式、灌水量和施氮量对玉米水分传导、产量和植株氮的影响。结果表明, 玉米根系或冠层水导最大值均在拔节期取得, 均随生育期的推移逐渐变小。通过对玉米产量和水分传导综合比较得出最优组合处理是隔沟交替灌 (简称交替沟灌) 中水高肥: 即沟灌方式为交替沟灌、灌溉量为 282 mm、施氮量为 240 Kg·hm⁻² 的处理。可见, 交替沟灌在根区两侧反复的对干燥侧根系进行灌水, 促进根系和冠层水导增大, 提高了根系对水肥的吸收利用和传输效率, 使得植株氮含量较高, 产量较大。

关键词: 灌溉, 氮, 水分, 根系及冠层水导, 产量, 植株氮, 玉米

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.003

中图分类号: S274.1, Q 945

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0015-07

杨启良, 张富仓, 刘小刚, 等. 沟灌方式和水氮对玉米产量和水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 15-21.

Yang Qiliang, Zhang Fucang, Liu Xiaogang, et al. Effects of different furrow irrigation patterns, water and nitrogen supply levels on hydraulic conductivity and yield of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 15-21. (in Chinese with English abstract)

0 引言

植物的水分传导表示根系运输水分的能力, 它的高低直接影响根系吸收水分的多少, 是根系感受土壤水分变化的最直接生理指标之一^[1-3]。为了揭示植物水分传导的影响因素, 明确不同植物的抗旱性及其对其环境的适应性, 许多学者对干旱、盐分、温度、复水和土壤通气状况等环境因素对植物水分传导的影响进行了大量研究^[4-10]。国内外的研究表明, 施氮磷肥均提高作物根水导, 而氮磷亏缺降低根水导^[11-14]; 适度的土壤水分亏缺因水通道蛋白的调节并不会引起根水导的下降^[15], 而土壤水分含量过高或过低均降低根水导。Kramer 和 Boyer (1995)^[10]的研究表明, 土壤水分过高, 通气状况较差会降低根对水分的吸收, 主要表现在根的径向水导阻力增大, 根系呼吸强度和氧气含量降低, 根区 CO₂ 浓度增大, 而较高浓度的 CO₂ 比缺氧更容易导致根水导降低。North 和 Nobel (1991)^[6]的研究表明, 干旱使根水导大大降低, 但重新复水 3 d 后, 大量新根出现, 且根水导还高于充分供水处理。胡田田等^[16]研究了局部湿润方式对玉米不同根区土——根系统水分传导的影响, 结果表明, 部分根

区交替灌溉的非灌水区的水分传导明显大于部分根区固定灌溉处理。

过去对不同湿润方式的研究和实践表明, 隔沟交替灌溉、控制性分根交替灌溉以及固定灌等是维持部分根区干燥的湿润方式, 在不影响光合作用的前提下可以明显减小作物的蒸腾速率和灌水量, 维持甚至提高产量, 改善作物品质, 显著提高作物的水分利用效率^[17-19]。但对不同沟灌方式下不同灌水量和施氮量对玉米不同生育期水分传导的研究还尚未见报道。

因此, 本文以玉米为供试材料, 在不同沟灌方式和水氮处理下对玉米根系和冠层水导、产量和植株氮的影响进行了试验研究。拟为玉米在不同生育期的灌水量、全生育期的施氮量、作物的水分传输机理以及选择合理的灌溉方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2006 年 4—9 月在西北农林科技大学节水灌溉试验站的移动式防雨棚中进行。试验站地处 N34° 20', E108° 24', 海拔高度为 521 m, 气候为干旱半干旱气候, 属渭河北三道台塬地区, 地下水埋深较深, 供试土壤为土娄土, 土壤质地为中壤。该试验田土壤基本理化性质为: 有机质 9.34 g/kg, 全氮 0.87 g/kg, 碱解氮 33.43 mg/kg, 速效磷 12.78 mg/kg, 速效钾 116 mg/kg。

1.2 试验设计

供试玉米品种为豫玉 22 号, 2006 年 4 月 24 日播种, 9 月 10 日收获。本试验采用正交设计 L₉(3⁴), 为 3 因素 3 水平 (见表 1)。本试验正交设计 9 个处理, 又添加 3 个

收稿日期: 2010-07-21 修订日期: 2010-12-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50579066, 50879073, 51009073); 云南省应用基础研究面上项目 (2010ZC042)

作者简介: 杨启良 (1978—), 甘肃通渭人, 博士, 研究方向为节水灌溉理论与技术。昆明 昆明理工大学现代农业工程学院, 650224。

E-mail: yangqilianglovena@163.com

*通信作者: 张富仓 (1962—), 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉理论与技术。杨凌 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 712100。Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

处理（常规沟灌高水高肥，常规沟灌中水高肥，交替沟灌中水高肥）共 12 个处理，2 次重复，共 24 个小区。于 2006 年 6 月 8 日开始灌水处理，根据不同的生育期共灌水 7 次；灌水时交替沟灌第 1 次为东侧灌水沟，第 2 次为西侧，轮流交替灌水，固定沟灌固定于东侧灌水沟，常规沟灌在两侧灌水沟均供水。不同时期的水分处理如表 2。小区面积 14 m²，行距 60 cm，株距 40 cm，每小区共计 60 株。磷肥选用过磷酸钙（600 kg/hm²），播种时作为基肥一次统一施入；氮肥选用尿素，分 2 次施入，第一次播种时（4 月 24 日）施入 40%，第 2 次（7 月 18 日）施入 60%。3 次水分传导测定时对应生育期的灌溉量和施肥量分别为：拔节后期（7 月 8 日），高水、中水和低水分别为 210、153 和 118 mm，高肥、低肥和不施肥分别为 96、48 和 0 kg/hm²；抽雄后期（7 月 25 日），高水、中水和低水分别为 267、191 和 148 mm，高肥、低肥和不施肥分别为 240、120 和 0 kg/hm²；灌浆后期（9 月 3 日），高水、中水和低水分别为 400、282 和 216 mm，高肥、低肥和不施肥分别为 240、120 和 0 kg/hm²。其他田间管理均保持一致。

表 1 玉米 3 因素 3 水平的正交试验方案

Table 1 Orthogonal experiment design of L₉(3⁴) on maize

编号	A 沟灌方式	B 灌溉量/mm	C 施氮量/Kg-hm ⁻²
1	A1 交替沟灌 (AFI)	B1 高水 (400)	C1 高肥 (240)
2	A1 交替沟灌 (AFI)	B2 中水 (282)	C2 低肥 (120)
3	A1 交替沟灌 (AFI)	B3 低水 (216)	C3 不施肥 (0)
4	A2 常规沟灌 (CFI)	B1 高水 (400)	C2 低肥 (120)
5	A2 常规沟灌 (CFI)	B2 中水 (282)	C3 不施肥 (0)
6	A2 常规沟灌 (CFI)	B3 低水 (216)	C1 高肥 (240)
7	A3 固定沟灌 (FFI)	B1 高水 (400)	C3 不施肥 (0)
8	A3 固定沟灌 (FFI)	B2 中水 (282)	C1 高肥 (240)
9	A3 固定沟灌 (FFI)	B3 低水 (216)	C2 低肥 (120)

表 2 不同生育期灌水处理

Table 2 Amount of irrigation water under three treatments in different periods

生育期	灌水日期	mm		
		高水	中水	低水
播种-出苗	05-18	20	20	20
出苗-拔节	06-08	76	57	38
拔节-抽穗前	06-23	57	38	30
拔节-抽穗	07-06	57	38	30
抽穗后-灌浆	07-23	57	38	30
灌浆-蜡熟前	08-08	57	38	30
灌浆-蜡熟后	08-23	57	38	30
蜡熟-收获	09-01	19	15	8
灌水量合计/mm		400	282	216

1.3 测定指标及方法

1.3.1 测定指标

每个处理每次测定选择 4 株长势均匀健壮的植株用高压流速仪测定根系和冠层水导。用百分之一感量的天

平测定根干质量、冠层干质量和玉米籽粒质量。根系和冠层干物质磨碎后用瑞士福斯特卡托公司 (Foss Tecator AB) 生产的自动定氮仪测定全氮，全氮测定用开氏法。

1.3.2 测定方法

玉米水分传导测定前给仪器加水后保持压力 550 Kpa，排除高压流速仪 (High Pressure Flowe Meter, HPFM) 体内的气泡，历时 12 h。测定前对仪器进行归零，本试验测定根系及冠层水导采用瞬时法，即调整压力变率达 5~10 KPa/s，持续增压到大约 500 KPa 时获得流速和压力随时间的变化关系，其曲线斜率表示根系或冠层水导。本试验测定玉米根水导时均在土表面以上 7 cm 处切断玉米秆与压力耦合器相接，切割点以下测定根水导，以上测定冠层水导。

1.4 统计分析

数据处理采用正交设计中的直观分析法，用 SAS 软件进行方差分析。

2 结果与分析

植物的水分传导是水分经由土壤进入根系-茎-叶柄-叶片系统传输的过程，是反映生长和水分生理特性的一个重要指标。其根系及冠层水导的大小受沟灌方式、灌水量、施肥量和生育期等许多因素的影响。

2.1 不同因素水平对玉米根水导的影响

由表 3 可知，各处理玉米根水导随生育期的推移而逐渐变小，均随施肥量的增加而增加。从沟灌方式、灌水量和施氮量 3 因素对不同生育期玉米根水导影响的极差可以看出，在拔节期灌水量的极差 R 最大，施肥量的极差 R 最小，3 个因素对拔节期玉米根水导影响的主次顺序为灌水量 > 沟灌方式 > 施肥量，而抽雄期和蜡熟期 3 因素对玉米根水导影响的主次顺序为施肥量 > 沟灌方式 > 灌水量。方差分析结果如表 7 所示，3 因素对不同生育期根水导的影响均达显著水平。

表 3 不同处理对玉米根水导的影响

Table 3 Effect of different treatments on root hydraulic conductivity of maize

处理编号	因素水平			根水导/(10 ⁻³ kg·s ⁻¹ ·MPa ⁻¹ ·g ⁻¹)		
	A	B	C	拔节期	抽雄期	蜡熟期
1	1	1	1	7.88	1.07	0.54
2	1	2	2	7.99	0.82	0.38
3	1	3	3	2.03	0.61	0.25
4	2	1	2	6.76	0.88	0.28
5	2	2	3	4	0.28	0.34
6	2	3	1	4.07	0.88	0.37
7	3	1	3	2.66	0.55	0.26
8	3	2	1	5.41	0.64	0.39
9	3	3	2	1.15	0.43	0.3
				最佳组合方案		
				主次因素 最优组合		
				B>A>C B ₂ A ₁ C ₁		
				拔节期		
				A	B	C
K ₁	5.97	5.77	5.79			
K ₂	4.94	5.8	5.3			
K ₃	3.07	2.42	2.9			
极差 R	2.9	3.38	2.88			

接上页

	抽雄期			最佳组合方案	
	A	B	C	主次因素	最优组合
K_1	0.84	0.83	0.86	$C>A>B$	$C_1A_1B_1$
K_2	0.68	0.88	0.71		
K_3	0.54	0.64	0.48		
极差 R	0.3	0.25	0.38		

	蜡熟期			最佳组合方案	
	A	B	C	主次因素	最优组合
K_1	0.39	0.36	0.43	$C>A>B$	$C_1A_1B_2$
K_2	0.33	0.37	0.32		
K_3	0.32	0.31	0.28		
极差 R	0.07	0.06	0.15		

注：这里根水导的量化采用根水导测定值除以根系干质量所得的比值。
A, 沟灌方式; B, 灌溉量; C, 施氮量。

由各因素不同水平对不同生育期玉米根水导的影响知, 在 3 个生育期中, A 因素交替沟灌 (k_1) 处理均取得最大值, 平均根水导分别高出常规沟灌 (k_2) 和固定沟灌 (k_3) 达 21% 和 83.2%; 而 B 因素中水 (k_2) 处理均取得最大值, 平均根水导分别高出高水 (k_1) 和低水 (k_3) 达 1.3% 和 109.2%; C 因素高肥 (k_1) 处理均取得最大值, 平均根水导分别高出中肥 (k_2) 和不施肥 (k_3) 达 11.9% 和 93.4%。可见, 沟灌方式、灌水量和施肥量对根水导的影响均比较明显。试验结果表明, 根水导的优选组合是 $A_1B_2C_1$, 在添加的交替沟灌中水高肥处理取得 (表 6)。

2.2 不同因素水平对玉米冠层水导的影响

由表 4 可知, 玉米冠层水导随生育期的推移而逐渐变小。从沟灌方式、灌水量和施氮量 3 因素对不同生育期玉米冠层水导影响的极差可以看出, 在拔节期和抽雄期灌水量的极差 R 最大, 沟灌方式的极差 R 最小。3 个因素对拔节期和抽雄期玉米冠层水导影响的主次顺序为灌水量 > 施肥量 > 沟灌方式, 3 个因素对蜡熟期玉米冠层水导影响的主次顺序为施肥量 > 灌水量 > 沟灌方式。方差分析结果如表 7 所示, 除了抽雄期沟灌方式对根水导的影响不显著外, 3 因素对其它生育期根水导的影响均达显著水平。

由各因素不同水平对不同生育期玉米冠层水导的影响知, 3 个生育期中, A 因素交替沟灌 (k_1) 处理均取得最大值, 平均冠层水导分别高出常规 (k_2) 和固定 (k_3) 沟灌处理达 4.1% 和 8.4%; 而 B 因素中水处理 (k_2) 均取得最大值, 平均冠层水导分别高出高水 (k_1) 和低水 (k_3) 处理达 4.9% 和 41.1%; C 因素高肥处理 (k_1) 均取得最大值, 平均冠层水导分别高出中肥 (k_2) 和不施肥 (k_3) 处理达 17.1% 和 17.7%。可见, 灌水处理对冠层水导的影响比较明显, 而沟灌方式和施肥处理对冠层水导的影响并不明显。试验结果表明, 3 个生育期冠层水导的优选组合均为 $A_1B_2C_1$, 在添加的交替沟灌中水高肥处理取得 (表 6)。

2.3 不同因素水平对玉米产量和植株氮的吸收的影响

由表 5 可知, 从沟灌方式、灌水量和施氮量 3 因素对不同生育期玉米产量和植株氮影响的极差可以看出, 对产量而言, 灌水量的极差 R 最大, 其次为施肥量, 再次是沟灌方式。3 个因素对玉米产量影响的主次顺序为灌水量 > 施肥量 > 沟灌方式。对植株氮而言, 施肥量的极

表 4 不同处理对玉米冠层水导的影响
Table 4 Effect of different treatments on shoot hydraulic conductivity of maize

处理编号	因素水平			冠层水导/($10^{-5} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)		
	A	B	C	拔节期	抽雄期	蜡熟期
1	1	1	1	5.08	1.98	0.96
2	1	2	2	4.91	1.63	0.61
3	1	3	3	4.61	1.41	0.99
4	2	1	2	5.08	1.77	0.83
5	2	2	3	5.44	1.72	0.8
6	2	3	1	3.78	1.36	0.49
7	3	1	3	5.07	1.49	0.6
8	3	2	1	5.29	2.2	1.42
9	3	3	2	3.16	1.02	0.21

	拔节期			最佳组合方案	
	A	B	C	主次因素	最优组合
K_1	4.87	5.08	4.72	$B>C>A$	$B_2C_1A_1$
K_2	4.77	5.21	4.38		
K_3	4.51	3.85	4.06		
极差 R	0.36	1.36	0.66		

	抽雄期			最佳组合方案	
	A	B	C	主次因素	最优组合
K_1	1.67	1.75	1.85	$B>C>A$	$B_2C_1A_1$
K_2	1.62	1.85	1.47		
K_3	1.57	1.26	1.54		
极差 R	0.1	0.59	0.37		

	蜡熟期			最佳组合方案	
	A	B	C	主次因素	最优组合
K_1	0.85	0.8	0.96	$C>B>A$	$C_1B_2A_1$
K_2	0.71	0.94	0.55		
K_3	0.74	0.56	0.8		
极差 R	0.15	0.38	0.41		

注：这里冠层水导的量化采用冠层水导测定值除以冠层干质量所得的比值。

差 R 最大, 其次为沟灌方式, 再次是灌水量。3 个因素对玉米植株氮影响的主次顺序为施肥量 > 沟灌方式 > 灌水量。方差分析结果如表 7 所示, 3 因素对产量的影响达显著水平, 而 3 因素对植株氮的影响均不显著。

由各因素不同水平对玉米产量和植株总氮含量的影响知, 无论玉米产量, 还是植株总氮含量, A 因素交替沟灌 (k_1) 处理均取得最大值, 平均产量分别高出常规 (k_2) 和固定 (k_3) 沟灌处理达 3.5% 和 7.16%, 平均植株氮含量分别高出 3.7% 和 7.1%; 而 B 因素中水处理 (k_2) 均取得最大值, 平均产量分别高出高水 (k_1) 和低水 (k_3) 处理达 0.1% 和 19.2%, 平均植株氮含量分别高出 1.8% 和 2.3%; C 因素高肥处理 (k_1) 均取得最大值, 平均产量分别高出中肥 (k_2) 和不施肥 (k_3) 处理达 5% 和 8%, 平均植株氮含量分别高出 2.2% 和 15.5%。试验结果表明, 玉米产量和植株氮的优选组合是 $A_1B_2C_1$, 在表 6 的交替沟灌中水高肥处理取得。

表 5 不同处理对玉米产量和植株氮的影响

Table 5 Effect of different treatments on yield and nitrogen accumulation of maize

处理编号	因素水平			单株产量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	根系全氮/%	冠层全氮/%
	A	B	C				
1	1	1	1	213.22	9137.79	1.327	1.948
2	1	2	2	209.22	8966.57	1.286	1.955
3	1	3	3	177.73	7616.79	1.023	1.789
4	2	1	2	209.02	8957.79	1.192	1.883
5	2	2	3	191.75	8217.64	1.052	1.742
6	2	3	1	179.09	7675.07	1.217	1.915
7	3	1	3	190.27	8154.43	0.974	1.647
8	3	2	1	212.11	9090.21	1.224	1.875
9	3	3	2	157.69	6758.14	1.192	1.796
单株产量/g				最佳组合方案			
	A	B	C	主次因素	最优组合		
K ₁	200.1	204.2	201.5	B>C>A	B ₂ C ₁ A ₁		
K ₂	193.3	204.4	192				
K ₃	186.7	171.5	186.6				
极差 R	13.4	32.9	14.9				
产量/kg·hm ⁻²				最佳组合方案			
	A	B	C	主次因素	最优组合		
K ₁	8573.7	8750	8634.4	B>C>A	B ₂ C ₁ A ₁		
K ₂	8283.5	8758.1	8227.5				
K ₃	8000.9	7350	7996.3				
极差 R	572.8	1408.1	638.1				
根系全氮				最佳组合方案			
	A	B	C	主次因素	最优组合		
K ₁	1.212	1.165	1.256	C>A>B	C ₁ A ₁ B ₂		
K ₂	1.154	1.187	1.223				
K ₃	1.13	1.144	1.016				
极差 R	0.082	0.043	0.24				
冠层全氮				最佳组合方案			
	A	B	C	主次因素	最优组合		
K ₁	1.898	1.826	1.912	C>A>B	C ₁ A ₁ B ₂		
K ₂	1.846	1.857	1.878				
K ₃	1.773	1.833	1.726				
极差 R	0.125	0.031	0.186				

表 6 添加处理对玉米水分传导、产量和植株氮的影响

Table 6 Effect of add treatments on hydraulic conductivity, yield and nitrogen accumulation of maize

添加处理	根水导/(10 ⁻⁵ kg·s ⁻¹ ·MPa ⁻¹ ·g ⁻¹)			冠层水导/(10 ⁻⁵ kg·s ⁻¹ ·MPa ⁻¹ ·g ⁻¹)			产量		植株氮	
	拔节期	抽雄期	蜡熟期	拔节期	抽雄期	蜡熟期	产量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	根系全氮/%	冠层全氮/%
常规沟灌高水高肥	7.10	0.77	0.36	6.06	2.13	0.34	187.25	8024.79	1.277	1.889
常规沟灌中水高肥	7.23	0.61	0.39	6.59	1.70	0.79	232.73	9974.14	1.302	2.050
交替沟灌中水高肥	10.63	0.80	0.62	9.76	2.24	1.43	244.28	10468.93	1.413	2.224

表 7 玉米水分传导、产量和植株氮的方差分析

Table 7 Variance analysis of hydraulic conductivity, yield and nitrogen accumulation of maize

项目	方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 值	P 值		
根水导	拔节期	A	2.09E-09	2	1.05E-09	557.6	<0.01	
		B	6.74E-09	2	3.37E-09	1798.3	<0.01	
		C	1.40E-10	2	0.70E-10	37.3	<0.01	
	抽雄期	A	1.16E-11	2	0.58E-11	23.2	<0.01	
		B	2.56E-11	2	1.23E-11	51.0	<0.01	
		C	1.57E-11	2	0.79E-11	31.3	<0.01	
	蜡熟期	A	6.05E-13	2	3.03E-13	8.2	0.01	
		B	4.93E-12	2	2.46E-12	66.8	<0.01	
		C	5.33E-12	2	2.66E-12	72.3	<0.01	
冠层水导	拔节期	A	4.1E-13	2	2.1E-13	5.3	0.03	
		B	9.0E-12	2	4.5E-12	118.1	<0.01	
		C	6.7E-13	2	3.4E-13	8.8	0.01	
	抽雄期	A	1.3E-14	2	0.7E-14	3.8	0.06	
		B	1.4E-12	2	0.7E-12	412.1	<0.01	
		C	8.2E-13	2	4.1E-13	239.1	<0.01	
	蜡熟期	A	8.6E-15	2	4.3E-15	6.5	0.02	
		B	3.5E-13	2	1.8E-13	261.1	<0.01	
		C	1.0E-12	2	0.5E-12	764.7	<0.01	
产量	单株产量	A	2.6E+02	2	1.3E+02	14.6	0.01	
		B	6.4E+03	2	3.2E+03	359.0	<0.01	
		C	5.4E+02	2	2.7E+02	30.3	<0.01	
	总产量	A	4.8E+05	2	2.4E+05	14.6	0.01	
		B	1.2E+07	2	0.6E+07	359.0	<0.01	
		C	9.9E+05	2	4.9E+05	30.3	<0.01	
	植株氮含量	根系	A	3.3E-03	2	1.7E-03	1.1	0.31
			B	2.5E-03	2	1.3E-03	0.8	0.38
			C	6.4E-03	2	3.2E-03	2.1	0.17
冠层		A	3.3E-02	2	1.7E-02	5.6	0.03	
		B	3.0E-04	2	1.5E-04	0.1	0.82	
		C	7.1E-03	2	3.5E-03	1.2	0.28	

3 讨论

试验表明, 3 个因素对拔节期玉米根水导影响的主次顺序为灌水量>沟灌方式>施肥量, 抽雄期和蜡熟期的主次顺序为施肥量>沟灌方式>灌水量。这是由于本试验玉米各生育期的灌水量和施肥量均有所不同, 拔节期玉米正处于营养生长阶段, 对水分的需求较多, 本试验灌水量较多(表 2), 而在抽雄和蜡熟期玉米处于生殖生长阶段, 对养分的需求较水分敏感, 本试验施肥分 2 次进行, 第 1 次于播种时施入 40%, 第 2 次于 7 月 18 日(抽雄期)施入 60%。对植株氮影响的主次顺序为施肥量>沟灌方式>灌水量。对玉米产量影响的主次顺序为灌水量>施肥量>沟灌方式。综合比较不同处理对根水导、冠层水导、产量和植株氮的影响得出最优组合处理是交替沟灌中水高肥。

3.1 沟灌方式对玉米水分传导和产量的影响

部分根区交替灌溉每次灌水后大约一半根系被湿润, 而另一半根系处于干燥状态, 以一定的周期反复对干燥侧根系灌水, 刺激次生根较快生长, 明显提高根密度和水肥利用效率, 产量降低不明显, 甚至有所提高^[20]。本研究表明, 与常规和固定沟灌相比, 交替沟灌根系水导较大, 植株氮含量较多, 产量较高。其中交替沟灌提高根水导的原因是多方面的。(1) 部分根区灌溉时, 灌水侧根系存在明显的吸水补偿效应^[16]。当植物生长在根区土壤水分不均一的环境时, 促进了根系对水分的吸收^[21]。交替沟灌总是按照一定的频率对干燥侧根系反复灌水, 当植物经过一段时间的干旱复水后出现了新的侧根, 具有提高水通道蛋白活性增大根水导的功能^[21]。(2) 当水分流经侧根和主根相连的部位时促进了水分的流入^[22]。研究发现根条数与根水导呈正相关关系^[23], 由于交替沟灌提高根条数^[24], 并增加侧根与主根相连的节点数, 这也会提高根水导。(3) 交替沟灌 (ADI) 处理干燥侧根系产生的脱落酸 (ABA) 具有提高根水导的功能^[2], 加之, ADI 处理根区通气性和土壤温度的提高^[25]也会提高根水导^[9], 因此, 经过干旱锻炼复水后的根系更容易吸收水分, 且根水导还高于充分供水处理。虽然固定沟灌处理也提高根区土壤温度, 干燥侧根系也诱导产生干旱信号脱落酸, 由于固定沟灌处理非灌水侧长时间的干燥, 土-根界面阻力增大, 根系开始收缩, 一方面使得该侧的根密度减小, 根系生长减缓、衰老甚至死亡^[20], 另一方面使得根系栓质化程度加重^[6], 木质部空穴化均导致根水导减小^[26], 因此, 导致根水导明显降低。此外, 本研究发现 3 种沟灌方式处理的根水导均随着生育期的推移而减小, 这与以前的研究结果保持一致^[27]。

3.2 灌水量对玉米水分传导和产量的影响

水分是作物进行光合作用制造有机质的原料, 向作物体内输送营养的媒介, 决定着作物的健康生长状况、产量的高低和品质的好坏。本研究表明, 根水导、植株氮含量和产量最大值均在中水处理 (282 mm) 而非高水处理 (400 mm) 和低水处理 (216 mm) 取得, 可能的原因是低水处理使得根区土壤干旱。有研究表明, 土壤干旱促使根栓质化^[6]和空穴化^[26], 导致根水导减小。而高水处理使得根区土壤的通透性变差导致根水导减小, 同时灌水量较大, 根系密集区的部分营养物质向下迁移不利于根系吸收, 导致水肥利用效率和产量下降, 加之, 通气状况较差会降低根对水分的吸收, 主要表现在根的径向导水阻力增大, 根系呼吸强度和氧气含量降低, 根区 CO₂ 浓度增大, 而较高浓度的 CO₂ 比缺氧更容易导致根水导降低^[10]。根水导的降低也减小了向冠层输送水分养分的效率, 导致光合、蒸腾速率和气孔导度下降^[1], 限制碳的同化^[28], 导致产量降低。有研究表明, 在适度水分胁迫下, 水通道蛋白会提高自身调控能力^[15], 对根水导具有一定调节作用。也有研究表明, 水通道蛋白充当阀门而可逆地提高植物的水分传导, 在不利条件下促使植物吸水^[29]。

3.3 施肥量对玉米水分传导和产量的影响

氮亏缺会引起根水导降低, 而施用氮肥提高根水导, 导致光合、蒸腾速率和气孔导度增大 (Clarkson 等, 2000) 和产量提高。本研究表明, 与不施肥处理相比, 高氮 (240 kg/hm²) 和低氮 (120 kg/hm²) 处理均提高根水导、植株氮含量和产量, 均随着施肥量的增加而增大, 这与以往研究结果一致^[11,24,30]。当给植物供应营养物质时, 提高了水通道蛋白活性, 使得植物体内随水分流动的水通道蛋白的速度增大, 促进根水导提高^[31] (Barbara 等, 2002)。

4 结 论

干旱半干旱地区, 在玉米营养生长和生殖生长的过程中, 不仅要选择合理的灌水量和施肥量, 而且更应该合理选用灌溉方式, 只有将各个方面有机的结合起来才能达到节水增效的目的。本试验通过比较得出最优组合处理为交替沟灌中水高肥: 即沟灌方式为交替沟灌、灌溉量为 282 mm、施肥量为 240 kg/hm² 的处理。具体结果如下:

1) 与常规和固定沟灌相比, 交替沟灌的平均根水导、冠层水导、产量和植株氮含量分别提高了 21% 和 83.2%、4.1% 和 8.4%、3.5% 和 7.16%、3.7% 和 7.1%。

2) 与高水和低水处理相比, 中水处理的平均根水导、冠层水导、产量和植株氮含量分别提高了 1.3% 和 109.2%、4.9% 和 41.1%、0.1% 和 19.2%、1.8% 和 2.3%;

3) 与中肥和不施肥处理相比, 高肥处理的平均根水导、冠层水导、产量和植株氮含量分别提高了 11.9% 和 93.4%、17.1% 和 17.7%、5% 和 8%、2.2% 和 15.5%。

可见, 与常规和固定灌溉方式相比, 交替沟灌中水高肥处理能更有效地展现自己的优越性, 提高根系和冠层水导, 促进水分养分吸收利用, 增加产量, 具有很好的应用价值。

[参 考 文 献]

- [1] Clarkson D T, Carvajal M, Henzler T, et al. Root hydraulic conductance: diurnal aquaporin expression and the effects of nutrient stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51 (342): 61-70.
 - [2] Hose E, Steudle E, Hartung W. Abscisic acid and hydraulic conductivity of maize roots: a study using cell- and root-pressure probes[J]. *Planta*, 2000, 211(6): 874-882.
 - [3] Lo Gullo M A, Nardini A, Salleo S. Changes in root hydraulic conductance of *Olea oleaster* seedlings following drought stress and irrigation 1[J]. *New Phytol*, 1998, 140(1): 25-31.
 - [4] Martínez-Ballesta M C, Aparicio F, Pallás V, et al. Influence of saline stress on root hydraulic conductance and PIP expression in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2003, 160: 689-697.
 - [5] 康绍忠, 张建华. 不同土壤水分与温度条件下土根系统中导水率的变化及其相对重要性[J]. *农业工程学报*, 1997, 13 (2): 76-81.
- Kang Shaozhong, Zhang Jianhua. Hydraulic conductivities in soil root system and relative importance at different soil

- water potential and temperature[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13 (2) : 76—81. (in Chinese with English abstract).
- [6] North G B, Nobel P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of *A. gavae* (A gavaeae)[J]. American Journal of Botany, 1991, 78 (7): 906—915.
- [7] North G B, Nobel P S. Radial hydraulic conductivity of individual root tissues of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller as soil moisture varies [J]. Annals of Botany, 1996, 77(2): 133—142.
- [8] North G B, Nobel P S. Hydraulic conductivity of concentric root tissues of *Agave deserti* Engelm. under wet and drying conditions[J]. New Phytol, 1995, 130(1): 47—57.
- [9] Cochard H, Martin R, Gross P, Bogeat-Tfiboulot M B. Temperature effects on hydraulic conductance and water relation of *Quercus robur* L[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(348): 1255—1259.
- [10] Kramer P J, Boyer J S. Water Relation of Plant and Soil[M]. Orlando: Academic Press, 1995.
- [11] Lovelock C E, Ball M C, Feller I C, et al. Variation in hydraulic conductivity of mangroves: influence of species, salinity, and nitrogen and phosphorus availability[J]. Physiologia Plantarum, 2006, 127(3): 457—464.
- [12] 慕自新, 张岁岐, 杨晓青, 等. 氮磷钾对玉米根系水流导度的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(1): 45—51.
- Mu Zixin, Zhang Suiqi, Yang Xiaoqing, et al. Effect of nitrogen and phosphorus deficiency on maize root hydraulic conductivity[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(1): 45—51.
- [13] 沈玉芳, 曲东, 王保莉, 等. 干旱胁迫下磷营养对不同作物苗期根系导水率的影响[J]. 作物学报, 2005, 2(31): 214—218.
- Shen Yufang, Qu Dong, Wang Baoli, et al. Effects of phosphorus on root hydraulic conductivity of crops under drought stress[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 2(31): 214—218.
- [14] 谭勇, 梁宗锁, 王渭玲, 等. 氮、磷、钾营养胁迫对黄芩幼苗根系活力及根系导水率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 69—72.
- Tan Yong, Liang Zongsuo, Wang Weiling, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium stress on root vigor and hydraulic conductance of *Astragalus membranaceus* seedling[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 69—72.
- [15] Kirch H H, Vera-Estrella R, Gollack D, et al. Expression of water channel proteins in *Mesembryanthemum crystallinum*[J]. Plant Physiol, 2000, 123: 111—124.
- [16] 胡田田, 康绍忠. 局部湿润方式对玉米不同根区土-根系统水分传导的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 11—16.
- Hu Tiantian, Kang Shaozhong. Effects of localized irrigation model on hydraulic conductivity in soil-root system for different root-zones of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 11—16. (in Chinese with English abstract)
- [17] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物分区交替灌溉的理论及试验[J]. 水利学报, 2001, 11: 80—86.
- Kang Shaozhong, Pan Yinghua, Shi Peize, et al. Controlled root-divided alternative irrigation—Theory and experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 11: 80—86. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李志军, 张富仓, 康绍忠. 控制性根系分区交替灌溉对冬小麦水分与养分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 17—21.
- Li Zhijun, Zhang Fucang, Kang Shaozhong. Impacts of the controlled roots-divided alternative irrigation on water and nutrient use of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 17—21. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杜太生, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 43—48.
- Du Taisheng, Kang Shaozhong, Xia Guimin, et al. Response of grapevine growth and water use to different partial root zone drying patterns under drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [20] Martre P, North G, Nobel P. Hydraulic conductance and mercury-sensitive water transport for roots of *Opuntia acanthocarpa* in relation to soil drying and rewetting[J]. Plant Physiol, 2001, 126, 352—362.
- [21] McCully M, Canny M. Pathways and processes of water and nutrient movement in roots[J]. Plant Soil, 1988, 111 (2) , 159—170.
- [22] Ekanayake I, O' Toole J, Garrity D. Inheritance of root characters and their relations to drought resistance in rice[J]. Crop Sci, 1985, 25(6): 927—933.
- [23] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26—32.
- Liang Zongsuo, Kang Shaozhong, Shi Peize, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. benefit[J]. Sci. Agric. Sin, 2000, 33(6): 26—32. (In Chinese, with English abstract)
- [24] Monteith J, Unsworth M. Principles of Environmental Physics[A]. Edward Arnold, London, 2007.
- [25] Sperry J, Hacke U, Oren R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply[J]. Plant Cell Environ, 2002, 25(2): 251—263.
- [26] Nardini A, Lo Gullo M, Salleo S. Seasonal changes of root hydraulic conductance (KRL) in four forest trees: an ecological interpretation[J]. Plant Ecol, 1998, 139 (1) : 81—90.
- [27] Hubbard R, Bond B, Ryan M. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees[J]. Tree Physiol, 1999, 111(19): 413—417.
- [28] Steudle E. Water up take by roots: effects of water deficit[J]. J. Exp. Bot, 2000, 51 (350) : 1531—1542.
- [29] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 控制性分根区灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 62—67.
- Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Effects of controlled root-divided irrigation on transport and utilization

of water and nitrogen in maize rootzone soil[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 62—67. (in Chinese with English abstract)

[30] Barbara Shaw, Thomas TH, Cooke D T. Responses of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to drought and nutrient deficiency stress[J]. Plant Growth Regulation, 2002, 37(1): 77—83.

Effects of different furrow irrigation patterns, water and nitrogen supply levels on hydraulic conductivity and yield of maize

Yang Qiliang^{1,2}, Zhang Fucang^{2*}, Liu Xiaogang^{1,2}, Ge Zhenyang¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650024, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Effects of different furrow irrigation patterns, water and nitrogen supply levels on hydraulic conductivity and yield of maize were studied by orthogonal experiment design. Hydraulic conductivity of maize root and shoot was measured for stage of shooting, heading and late filling by transient method with High Pressure Flow Meter (HPFM) developed by Dynamax Corporation in USA in the maize field. The results showed that maximum root and shoot hydraulic conductivity was obtained in stage of shooting, its value was gradually smaller along with growing stage. The optimal combination was obtained by the yield and hydraulic conductivity of maize in this experiment, which the relative furrow irrigation patterns was alternate partial root-zone furrow irrigation pattern and the irrigation quota was 282mm, and the quantity of supply nitrogen was 240 kg·hm⁻². It is obvious that alternate furrow irrigation repeating watering for growing root in drying rootzone, promoting root and shoot hydraulic conductivity increased, water fertilization use and transport efficiency improved, and higher nitrogen accumulation in plant and yield of maize was obtained.

Key words: irrigation, nitrogen, moisture, root and shoot hydraulic conductivity, yield, nitrogen accumulation in plant, maize