

交替隔沟灌溉条件下玉米群体水氮利用研究*

刘小刚^{1,2} 张富仓² 杨启良^{1,2} 王金凤² 李志军²

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650024;
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, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 为探索交替隔沟灌溉条件下玉米优化水氮供给模式,通过遮雨棚内微区试验,研究了沟灌方式、灌水量和施氮量对玉米群体水氮利用的影响。结果表明:交替隔沟灌溉中水低氮处理的籽粒产量最高,是交替隔沟灌溉高水高氮处理的1.06倍。在相同水分和氮肥条件下,交替隔沟灌溉的籽粒产量分别是常规沟灌和固定隔沟灌溉的1.05、1.16倍。各因素对全氮累积总量的影响从大到小依次为:沟灌方式、施氮量、灌水量;灌水量对全氮累积总量影响显著。

关键词: 玉米 交替隔沟灌溉 产量 水分利用率 氮素累积量
中图分类号: S275; S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0100-06

Group Use of Water and Nitrogen on Maize under Alternative Furrow Irrigation

Liu Xiaogang^{1,2} Zhang Fucang² Yang Qiliang^{1,2} Wang Jinfeng² Li Zhijun²

(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, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

The object is to explore an optimal supply model of water and nitrogen on maize under alternative furrow irrigation, the micro-field experiments of rain-shield was conducted about furrow irrigation mode, nitrogen rate and irrigation amount. Results showed that the maize yield of alternative furrow irrigation (AFI), middle water and low nitrogen rate had the maximum grain yield, which was 1.06 times of AFI, high water and high nitrogen rate. Under the same water and nitrogen, the yield of AFI was 1.05 times of normal furrow irrigation (NFI), and 1.16 times of fixed furrow irrigation (FFI). Total nitrogen accumulation (TNA) of AFI was the most, NFI was the second, and FFI was the minimum. The order of effect on TNA was furrow irrigation mode, nitrogen rate and irrigation amount, the influences of irrigation amount on TNA reached significant level.

Key words Maize, Alternative furrow irrigation, Yield, Water use efficiency, Nitrogen accumulation

引言

交替隔沟灌溉作为地面节水灌溉技术之一,具有节水、减少土壤水分深层渗漏等特点。通过改变和调节作物根系区域的湿润方式,可使其产生水分

胁迫的信号传递至叶气孔,减小蒸腾耗水。同时可以改善根系的吸收功能,减少棵间全部湿润时的无效蒸发和总灌水量^[1~5]。交替隔沟灌溉在维持作物产量的同时,可使土壤氮的吸收增加21%^[6]。交替隔沟灌将肥料施于干沟内可减少肥料淋溶的可能

收稿日期: 2010-08-03 修回日期: 2010-12-02
* 国家自然科学基金资助项目(50579066、50879073、51009073)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD88B10)、云南省应用基础研究资助项目(2010ZC043、2010ZC042)和昆明理工大学测试基金资助项目(2010295)
作者简介: 刘小刚,讲师,西北农林科技大学博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: liuxiaogang888@tom.com
通讯作者: 张富仓,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

性,且土壤硝态氮含量在营养生长期和生殖生长期较高^[7]。干旱年份氮肥施在非灌水沟,氮肥吸收降低 50%,在相对湿润年份,灌水沟和非灌水沟的氮肥吸收无差异^[8]。在湿润区交替灌溉硝态氮的累积大于固定灌溉和常规灌溉^[9];和均匀灌水方式相比,交替灌水方式的氮肥利用效率提高 4.54%,节水 27.6%,水分利用率提高 5.3%^[10]。对半干旱地区玉米交替隔沟灌溉的水肥效应研究表明,水肥异区交替隔沟灌溉是较好的水肥耦合方式^[11~12]。本文研究沟灌方式、施氮量和灌水量对玉米群体水氮利用的影响规律,以期为交替灌溉的水氮高效利用和最优调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2006 年 4~7 月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田进行。试验田位于北纬 34°20′,东经 108°24′,海拔 521 m。土壤容积密度为 1.38 g/cm³,分析耕层(0~20 cm)土壤田间持水率 θ_F 为 24%,有机质含量 1.59%,全氮 0.95 g/kg,全磷 0.62 g/kg,全钾 18.46 g/kg,硝态氮 74.1 mg/kg,铵态氮 8.91 mg/kg,速效磷 26.62 mg/kg,肥力属于中等偏上。供试作物为玉米(豫玉 22 号)。

1.2 试验设计

在玉米生育期使用移动式遮雨棚,严格控制降雨量,无雨时敞开遮雨棚和大田状况一样。试验为 3 因素 3 水平正交设计如表 1 所示,各处理重复 3 次。各生育阶段的灌水量见表 2。采用大田垄植隔沟灌技术,沟和垄的断面为梯形。垄下底为 0.4 m,上底为 0.2 m,沟的下底为 0.2 m,上底为 0.4 m,

沟长为 3 m。氮肥选用尿素,分 2 次施入,播前(2006-05-13)施入 40%,拔节期(2006-07-03)施入 60%。

1.3 测定项目

收获时在各小区中随机选取 4.5 m²玉米脱粒称量,70℃干燥至恒质量,折算产量。玉米收获后 105℃杀青 30 min,60℃干燥至恒质量,分别测定根干物质量和地上部分干质量。茎叶和籽粒经干燥磨碎后测定全氮含量,全氮测定用开氏法,用瑞士福斯特卡托公司(Foss Tecator AB)生产的自动定氮仪进行测定^[13]。

2 结果与分析

不同沟灌方式对玉米群体籽粒产量、茎叶产量、水氮利用以及全氮累积量的影响结果见表 3,各结果的极差和方差分析见表 4 和表 5,各因素水平条件下各指标均值见图 1。

由表 3 可知, $A_2B_2C_2$ 处理的产量最高,是 $A_2B_1C_1$ 处理产量的 1.06 倍; $A_3B_1C_3$ 的产量最低,仅为 $A_2B_2C_2$ 处理的 76%。相同灌水和氮肥条件下,交替隔沟灌溉的玉米平均产量可达 9 317 kg/hm²,分别是常规沟灌和固定隔沟灌溉的 1.05 和 1.16 倍。这是由于交替隔沟灌溉使作物不同根区经受适宜的水分胁迫锻炼,刺激作物根系发育,有利于充分利用土壤中的水肥,从而使作物光合产物积累不至于减少甚至略有增加。同一沟灌方式和施氮量条件下,中水处理的产量最大,说明中水处理能为玉米提供比较适宜的土壤水分环境,水分过多会导致土壤硝态氮淋失,过少则降低了土壤养分的有效性。由表 4 的极差可知,沟灌方式对产量的影响最大,施氮量影响次之,灌水量影响最小。由表 5 可知,沟灌方式、灌水量以及施氮量各因素对产量的影响都达到了极显著水平,获得较大产量的最优组合为交替隔沟灌中水低氮处理。

茎叶的干物质的累积量包括除籽粒外的其余生物量。统计表明, $A_1B_1C_2$ 处理的茎叶产量最高可达 6 583 kg/hm²,是 $A_3B_3C_2$ 处理的 1.34 倍; $A_2B_1C_1$ 处理的产量比 $A_1B_1C_1$ 处理低约 140 kg/hm²。在同一水分和氮肥条件下,交替隔沟灌溉的玉米平均茎叶产量可达 5 820 kg/hm²,分别是常规沟灌和固定隔沟灌溉的 1.03 和 1.11 倍。在沟灌方式和施氮量相同时,高水处理的茎叶产量大于中水处理和低水处理;中水处理的籽粒产量最大。说明高水处理导致作物生长旺盛,抑制了生殖生长。低氮处理茎叶产量最大,高氮处理次之,低氮处理最小为 5 323 kg/hm²,比高氮处理小约 336 kg/hm²。由极差分析可知,灌水

表 1 正交设计

Tab.1 Experimental orthogonal design

水平	因素		
	沟灌方式 A	灌水量 B/mm	施氮量 C/kg·hm ⁻²
1	常规沟灌	400	240
2	交替隔沟灌	278	120
3	固定隔沟灌	206	0

表 2 各生育期的灌水量

Tab.2 Irrigation in growth period of maize mm

水量	播种	苗期	拔节	抽穗	灌浆	乳熟	腊熟	成熟	合计
高水	19	76	57	57	57	57	57	19	400
中水	15	57	38	38	38	38	38	15	278
低水	8	38	30	30	30	30	30	8	206

注:各生育期的灌水量值均舍去了小数点后的数值。

量对茎叶产量影响最大,沟灌方式影响次之,施氮量影响最小。计算可知常规沟灌低水高氮处理的收获指数最大为 0.64,交替隔沟灌和固定隔沟灌低水处

理的收获指数也较大可达到 0.62 以上。这说明在水资源亏缺的条件下,低水处理可以提高生殖生长的比例。

表 3 不同沟灌方式和施氮对玉米群体产量及水氮利用的影响

Tab.3 Effects of furrow irrigation mode and nitrogen rate on yield and use of water and nitrogen

处理	籽粒产量 /kg·hm ⁻²	茎叶产量 /kg·hm ⁻²	水分利用率 /kg·m ⁻³	籽粒全氮 含量/ %	茎叶全氮 含量/ %	籽粒氮素累积 量/kg·hm ⁻²	茎叶氮素累积 量/kg·hm ⁻²	全氮累积总量 /kg·hm ⁻²
A ₂ B ₁ C ₁	9 208.33 ±68.75	6 445.69 ±75.62	2.30 ±0.02	1.44 ±0.01	0.85 ±0.02	132.10 ±2.09	54.91 ±0.96	187.02 ±3.04
A ₂ B ₂ C ₂	9 851.85 ±16.37	5 838.75 ±21.41	3.54 ±0.01	1.43 ±0.00	0.85 ±0.01	141.14 ±0.50	49.48 ±0.86	190.62 ±1.36
A ₂ B ₃ C ₃	8 893.52 ±29.46	5 175.56 ±3.14	4.32 ±0.01	1.39 ±0.02	0.66 ±0.12	123.54 ±0.97	34.20 ±4.13	157.74 ±5.16
A ₁ B ₁ C ₂	8 925.93 ±26.19	6 583.19 ±107.44	2.23 ±0.01	1.39 ±0.02	0.80 ±0.01	123.62 ±1.54	52.63 ±0.10	176.25 ±1.45
A ₁ B ₂ C ₃	8 726.85 ±62.20	5 377.08 ±122.76	3.14 ±0.02	1.37 ±0.01	0.71 ±0.04	119.32 ±0.33	38.20 ±2.77	157.52 ±3.11
A ₁ B ₃ C ₁	8 907.41 ±36.01	5 053.89 ±58.93	4.32 ±0.02	1.45 ±0.03	0.86 ±0.00	129.48 ±2.77	43.40 ±0.46	172.89 ±2.31
A ₃ B ₁ C ₃	7 500.00 ±13.09	5 418.19 ±36.73	1.88 ±0.00	1.37 ±0.01	0.75 ±0.01	102.95 ±0.70	40.78 ±1.03	143.72 ±0.34
A ₃ B ₂ C ₁	8 393.52 ±72.02	5 479.72 ±6.78	3.02 ±0.03	1.43 ±0.03	0.84 ±0.02	120.23 ±1.16	46.15 ±1.33	166.38 ±2.50
A ₃ B ₃ C ₂	8 101.85 ±26.19	4 899.86 ±48.52	3.93 ±0.01	1.36 ±0.08	0.78 ±0.02	110.51 ±5.00	38.26 ±1.30	148.76 ±4.69

表 4 群体产量及水氮利用的极差分析

Tab.4 Range analysis of yield and the use of water and nitrogen

因素	籽粒产量	茎叶产量	水分利用率	籽粒全氮含量	茎叶全氮含量	籽粒氮素累积量	茎叶氮素累积量	全氮累积总量
沟灌方式	1 319.44	554.07	0.45	0.03	0.01	21.04	4.47	25.50
灌水量	445.99	1 105.93	2.06	0.01	0.03	7.34	10.82	11.71
施氮量	586.42	450.32	0.13	0.06	0.14	12.00	10.43	22.43

表 5 群体产量及水氮利用的方差分析

Tab.5 Intuitive analysis of yield and the use of water and nitrogen

项目	方差来源	离差平方和	自由度	方差估计	F 值	项目	方差来源	离差平方和	自由度	方差估计	F 值
籽粒产量	沟灌方式	2.69 ×10 ⁶	2	1.34 ×10 ⁶	293.28	茎叶产量	沟灌方式	4.93 ×10 ⁵	2	2.47 ×10 ⁵	3.43
	灌水量	3.34 ×10 ⁵	2	1.67 ×10 ⁵	36.45		灌水量	1.84 ×10 ⁶	2	9.18 ×10 ⁵	12.75
	施氮量	5.73 ×10 ⁵	2	2.87 ×10 ⁵	62.58		施氮量	3.29 ×10 ⁵	2	1.64 ×10 ⁵	2.28
水分利用率	沟灌方式	0.31	2	0.15	13.51	籽粒全氮含量	沟灌方式		2		0.89
	灌水量	6.35	2	3.17	279.92		灌水量		2		0.19
	施氮量	0.03	2	0.01	1.20		施氮量	0.01	2		4.51
茎叶全氮含量	沟灌方式	31.18	2	15.59	33.72	籽粒氮素累积	沟灌方式	675.24	2	337.62	29.90
	灌水量	176.22	2	88.11	190.55		灌水量	89.14	2	44.57	3.95
	施氮量	192.80	2	96.40	208.48		施氮量	245.17	2	122.59	10.85
茎叶氮素累积量	沟灌方式	31.18	2	15.59	33.72	合计全氮吸收	沟灌方式	995.95	2	497.97	30.79
	灌水量	176.22	2	88.11	190.55		灌水量	228.04	2	114.02	7.05
	施氮量	192.80	2	96.40	208.48		施氮量	872.24	2	436.12	26.97

$F_{0.05}(2,4)=6.94,F_{0.01}(2,4)=18.00$

A₁B₃C₁ 处理的水分利用率最大达 4.32 kg/m³, 分别是 A₃B₁C₃ 处理和 A₃B₂C₁ 处理的 2.30 和 1.43 倍。总的来说,水分利用率和灌水量呈反比。在灌水量和施氮量相同的条件下,交替隔沟灌溉的水分利用率最大均值为 3.39 kg/m³,常规沟灌次之,

固定隔沟灌溉最小为 2.94 kg/m³。这是由于交替隔沟灌溉让玉米根系承受一定的水分胁迫,刺激根系吸收的补偿功能,提高根系的传导能力和水分利用率;适量施氮能提高作物渗透调节能力,抑制蒸腾失水,提高水分利用率。在沟灌方式和灌水量一定的

条件下,低氮处理水分利用率最大,高氮次之,无氮处理的最小。由极差分析可得,灌水量对水分利用率影响最大,沟灌方式影响次之,施氮量影响最小。其中灌水量对其影响达到了极显著水平,沟灌方式对其影响显著,而施氮量对其影响不显著。要获得较大的水分利用率,应选交替隔沟灌溉低水处理。

籽粒全氮含量反应了籽粒全氮的吸收状况和籽粒品质。其中 $A_1B_3C_1$ 处理的籽粒含量最大为 1.45%,比 $A_3B_1C_3$ 和 $A_3B_3C_2$ 处理分别高出 0.08% 和 0.09%。统计分析表明,交替隔沟灌溉的籽粒全氮含量最高,说明交替隔沟灌溉有利于提高籽粒品质。而固定隔沟灌溉的部分根区水分持续偏低,直接影响了作物的长势和根系活力,导致籽粒品质偏低。在沟灌方式和施氮量相同时,各水分水平的籽粒全氮含量由大到小依次为中水处理、低水处理、高水处理。分析表明籽粒全氮含量和施氮量呈正相关,其中高氮处理的全氮含量均值为 1.44%,比无氮处理的高约 0.07%。方差分析表明,施氮量对籽

粒全氮含量影响最大,沟灌方式次之,灌水量的影响最小。说明施氮可显著提高器官氮素累积和转运量,且施氮对氮素累积和转运的效应大于水分的效应。

籽粒全氮累积量取决于产量和籽粒含氮量。其中 $A_2B_2C_2$ 处理的籽粒全氮累积量最大,虽然该处理的籽粒的全氮含量仅为 1.43%,但由于产量最高,所得到的籽粒全氮累积量也最大。由图 1 可知,交替隔沟灌溉的全氮累积量最大,比常规沟灌和固定隔沟灌溉分别多 24 kg/hm² 和 63 kg/hm²;中水处理的籽粒全氮累积量最大,低水处理比高水处理高约 5 kg/hm²,说明高水处理并不能提高籽粒全氮累积量和改善作物品质;籽粒的全氮累积量和施氮量呈正相关。方差和极差分析结果表明,各因素对籽粒全氮累积量的影响由大到小依次为沟灌方式、施氮量、灌水量。其中沟灌方式对其影响达到了极显著水平,施氮量对其影响显著。交替隔沟灌溉高氮处理可以获得较大的籽粒全氮累积量。

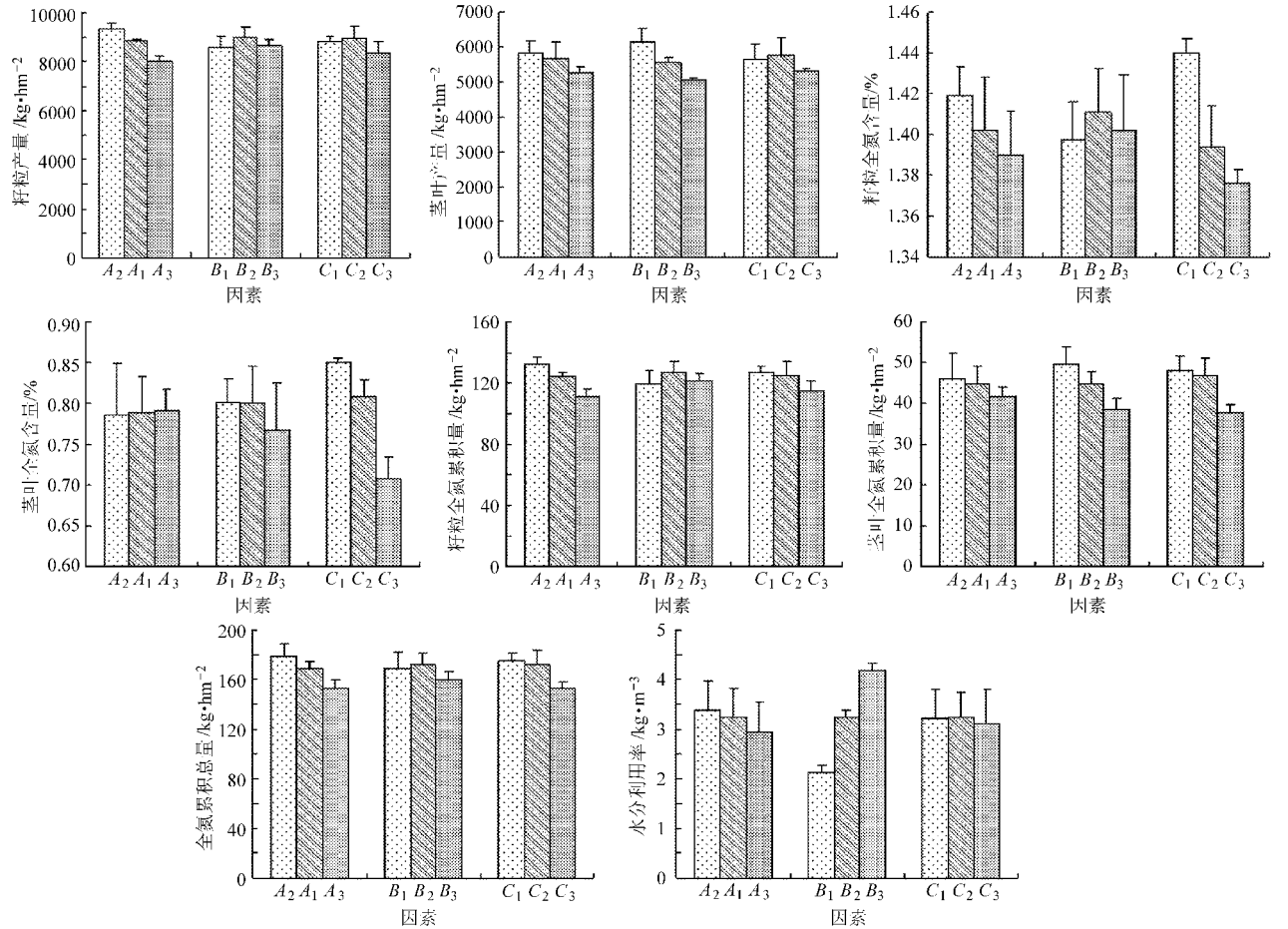


图1 不同因素水平的玉米群体产量及水氮利用参数均值

Fig.1 Mean parameters of maize product and utilization of water and nitrogen

$A_2B_1C_1$ 处理的茎叶全氮累积量最大,比 $A_3B_1C_3$ 处理高 14 kg/hm²。交替隔沟灌溉的茎叶全氮累积量最大,常规沟灌次之,固定隔沟灌溉最小。高水处

理明显提高了茎叶的全氮累积量,这是由于高水处理的茎叶干物质累积量较大。统计表明,灌水量对茎叶的全氮累积量影响最大,沟灌方式影响次之,而

施氮量对其影响最小。各因素对茎叶全氮累积量的影响达到了显著水平, $A_2B_1C_1$ 处理可获得较大的茎叶全氮累积量。

氮素累积与干物质累积密切相关,是籽粒产量形成的基础。其中 $A_2B_2C_2$ 处理的全氮累积总量最大为 191 kg/hm^2 , $A_3B_1C_3$ 的累积总量最小,为 $A_2B_2C_2$ 处理的 75%。和 $A_2B_2C_2$ 处理相比, $A_2B_1C_1$ 处理的茎叶全氮累积量最大,但没有很好地向籽粒转移,不利于水氮利用效率的提高。从图 1 可知,交替隔沟灌溉的全氮累积总量最大,常规沟灌次之,其中固定隔沟灌溉小于交替隔沟灌溉均值可达 26 kg/hm^2 ,这是由于交替灌水可使作物在较长的时间内维持较高的氮素累积速率。研究表明土壤含水率过大会导致土壤硝态氮淋失和增大了氮素的氨挥发损失,土壤含水率过小抑制了玉米对氮肥的吸收和氮肥效益的发挥,这和本试验的中水处理的全氮累积总量最大、低水处理的最小一致。灌水全氮累积量总量与施氮量呈正比。统计表明,各因素对全氮累积总量的影响由大到小依次为:沟灌方式、施氮量、灌水量,其中灌水量对其影响显著。

3 讨论

试验结果表明,在灌水量和施氮量相同的条件下,交替灌溉的生物量累积和水分利用率高于常规灌溉和固定灌溉,这和在甘肃民勤小坝口试验站的结果一致^[3]。主要是由于交替隔沟灌溉能够在土壤干燥区内产生控制气孔开度的根源信号,使作物气孔开度在一个较为适宜的范围内,从而减少了作物蒸腾耗水,降低了作物的蒸发蒸腾,提高了灌溉水分利用率。根据籽粒产量统计分析,确定的最优组合为交替隔沟灌中水低氮处理。灌水量和沟灌方式

对水分利用率影响显著,低水交替隔沟灌溉可以获得较高的水分利用率。虽然施氮量对水分利用率的影响不显著,但施氮对产量等影响显著,而产量又决定了水分利用率。

试验结果表明,水分适宜时交替隔沟灌溉促进了氮肥效应的发挥,常规沟灌方式则限制了氮肥效应的发挥,而固定隔沟灌溉的水分胁迫极大抑制了氮肥效应的发挥;水分较少时交替隔沟灌使玉米生长发育受到抑制,氮素效应不能够充分地发挥。交替沟灌的氮素累积总量最大,这主要因为交替沟灌条件下作物的生理应急机制(根系分布、气孔开度大小)及土壤的生态激励(土壤氮素活性、土壤微生物活性)共同作用,在不降低作物产量的同时,提高了氮素利用效率^[2,14~15]。

沟灌方式、灌水量和施氮量对作物水氮利用的影响是交互的,只有综合考虑各因素对产量、水氮利用的效应,才能为提高水氮利用效率找到最佳的水肥耦合模式。

4 结论

(1) $A_2B_2C_2$ 处理的产量最高,是 $A_2B_1C_1$ 处理产量的 1.06 倍。在相同水分和氮肥条件下,交替隔沟灌溉玉米产量分别是常规沟灌和固定隔沟灌溉的 1.05 和 1.16 倍。

(2) 交替隔沟灌溉的籽粒全氮累积量分别比常规沟灌和固定隔沟灌溉高 24 kg/hm^2 和 63 kg/hm^2 ; 中水处理的籽粒全氮累积量最大,低水处理比高水处理的高约 5 kg/hm^2 。

(3) 交替隔沟灌溉的全氮累积总量最大,常规沟灌次之,固定沟灌最小;各因素对全氮累积总量的影响由大到小依次为:沟灌方式、施氮量、灌水量。灌水量对全氮累积总量影响显著。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(6):26~32. (in Chinese)
- 3 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 CSAE, 2000, 16(1):39~43. (in Chinese)
- 4 邵光成, 刘娜, 陈磊. 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4):117~121.
Shao Guangcheng, Liu Na, Chen Lei. Character of water demand and yield of space-time deficit irrigation for hot pepper in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4):117~121. (in Chinese)
- 5 邵光成, 张娟, 陈磊, 等. 时空亏缺灌溉对温室盆栽辣椒生理生态指标的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3):96~100.

- 6 Lehrs G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield [J]. *Agron Journal*, 2000, 92 (6): 1 266 ~ 1 275.
- 7 Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn [J]. *Plant and Soil*, 1998, 199(2): 187 ~ 194.
- 8 Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands [J]. *Agronomy Journal*, 1997, 89(4): 609 ~ 612.
- 9 高明霞. 不同灌水方式下玉米根际硝态氮的分布[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
Gao Mingxia. Distribution of NO_3^- —N in maize rhizosphere soil under style of different irrigation [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004. (in Chinese)
- 10 韩艳丽, 康绍忠. 控制性分根交替灌溉对玉米养分吸收的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 5 ~ 7.
Han Yanli, Kang Shaozhong. Effects of controlled roots-divided alternative irrigation on nutrient uptake in maize [J]. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(2): 5 ~ 7. (in Chinese)
- 11 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2 025 ~ 2 032.
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Tian Yufeng, et al. Effects of alternative furrow irrigation on transport of water and nitrogen in maize root zone [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 2 025 ~ 2 032. (in Chinese)
- 12 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 19 ~ 24.
- 13 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49 ~ 60.
- 14 杜太生, 康绍忠, 张雯, 等. 不同沟灌模式对沙漠绿洲区葡萄生长和水分利用的效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 805 ~ 810.
Du Taisheng, Kang Shaozhong, Zhang Wen, et al. Effects of different furrow irrigation modes on grape growth and water use in oasis region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 805 ~ 810. (in Chinese)
- 15 李平, 齐学斌, 樊向阳, 等. 分根区交替灌溉对马铃薯水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 92 ~ 95.
Li Ping, Qi Xuebin, Fan Xiangyang, et al. Effect of alternate partial root-zone irrigation on nitrogen and water use efficiency of potato [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6): 92 ~ 95. (in Chinese)

(上接第 38 页)

- 5 Triantafyllidis G K, Kazantzis A V, Drambi E K. Fracture characteristics of torsion-bending fatigue and impact fatigue failure of two steel pins in a crawler excavator [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2009, 9(1): 23 ~ 27.
- 6 Stojan Sedmak, Aleksander Sedmak, Miodrag Arsic. An experimental verification of numerical models for the fracture and fatigue of welded structures [J]. *Material in Technology*, 2007, 41(4): 173 ~ 178.
- 7 John E Pearson, Robert Hannen, Erik Soderberg W. Development of fatigue monitoring system for a hydraulic excavator [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2004, 9(4): 221 ~ 226.
- 8 孟宪红, 柳春图. A633D 斗杆的疲劳裂纹形成寿命[J]. 应用力学学报, 2001, 18(2): 128 ~ 133.
Meng Xianhong, Liu Chuntu. The initiation life of the fatigue crack of the dipper-handle made of A633D steel [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2001, 18(2): 128 ~ 133. (in Chinese)
- 9 弯勇, 王兰省. 元宝山露天矿轮斗挖掘机斗轮驱动电机支承梁寿命评估[J]. 中国机械工程, 1998, 9(11): 48 ~ 50.
Wan Yong, Wang Lansheng. Fatigue life estimation to the counter moment beam on bucket wheel reclaimer working at Yuan Bao Shan Coalfield [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 1998, 9(11): 48 ~ 50. (in Chinese)
- 10 苏猛, 张万山. 液压挖掘机工作装置断裂分析[J]. 煤矿机械, 2006, 27(6): 975 ~ 976.
Su Meng, Zhang Wanshan. Fracture analysis of hydraulic excavator working mechanism [J]. *Coal Mine Machinery*, 2006, 27(6): 975 ~ 976. (in Chinese)
- 11 杜文靖, 崔国华, 刘小光. 液压挖掘机工作装置整体集成有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 20 ~ 24.
Du Wenjing, Cui Guohua, Liu Xiaoguang. Integration finite element analysis on whole working equipment of hydraulic excavator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 20 ~ 24. (in Chinese)
- 12 成凯, 李山辉, 刘述学, 等. 装载机工作装置的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 18 ~ 21.
Cheng Kai, Li Shanhuai, Liu Shuxue, et al. Finite element analysis of loader working equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, 32(6): 18 ~ 21. (in Chinese)