

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.016

灌溉施肥对尼罗河三角洲玉米产量和水分利用率的影响*

向友珍^{1,2} 张富仓^{1,2} Mohamed A Rashad³ 强生才¹
邹海洋¹ Ahmed Ali Hassanain³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

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;

3. 苏伊士运河大学农学院, 伊斯梅里亚 41522)

摘要: 针对埃及尼罗河三角洲地区传统灌溉方式存在的水分利用效率低、产量低和农户增收困难等问题,通过田间试验探索该地区玉米种植适宜的灌溉施肥模式。大田试验于2012年和2013年在埃及苏伊士运河大学试验基地进行,共设置滴灌(D)、涌泉细流沟灌(B)、传统沟灌(F)3个灌溉方式和施无机肥(C)、液态有机肥(O)2个施肥种类,共6个处理。试验研究了水肥互作对玉米叶面积指数(LAI)、地上生物量(ADM)、产量构成要素、经济产量、水分利用效率(WUE)和经济效益的影响。结果表明:抽雄期以后,灌溉方式和施肥种类对玉米LAI和ADM的影响均有显著差异($P < 0.05$),其中OD处理的LAI和ADM均处最高水平。两种施肥条件下,D、B和F3种灌溉方式对玉米产量和WUE的影响均表现为: $B > D > F$ 。不同灌水条件下,O处理比C处理玉米产量提高18.6%~24.4%,WUE提高18.7%~23.4%。CB处理玉米的年均净效益最高,达7373元/hm²,但与CF处理差异不显著。CB处理(即涌泉细流沟灌技术与施无机肥结合)是埃及尼罗河三角洲玉米最佳种植模式。

关键词: 玉米 涌泉细流沟灌 有机肥 产量 水分利用效率 经济效益

中图分类号: S435; S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0116-11

Effects of Different Irrigation and Fertilization Strategies on Yield and Water Use Efficiency of Maize in Nile Delta

Xiang Youzhen^{1,2} Zhang Fucang^{1,2} Mohamed A Rashad³ Qiang Shengcai¹ Zou Haiyang¹
Ahmed Ali Hassanain³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, 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

3. Faculty of Agriculture, Suez Canal University, Ismailia 41522, Egypt)

Abstract: Traditional irrigation practices caused low maize water use efficiency, yield and income of local farmers in Nile Delta of Egypt. To explore the optimal irrigation and fertilization strategies, the effects of interactions between irrigation and fertilization on leaf area index (LAI), aboveground dry matter (ADM), yield component, water use efficiency (WUE), economic yield and benefit of maize were investigated. During the field experiments in two consecutive years (2012 and 2013), there were three irrigation modes (drip irrigation, bubble irrigation and traditional furrow irrigation, irrigation rates were 80%, 70% of estimated evapotranspiration and local traditional irrigation quantity, respectively) and two fertilization types (liquid organic fertilizer and chemical fertilizer). Six treatments were arranged in a randomized complete block design, with four replicates for each treatment. The results showed that

收稿日期: 2015-02-04 修回日期: 2015-04-01

* 非洲地区节水农业技术合作、开发与示范资助项目(2010DFA32790)

作者简介: 向友珍, 博士生, 讲师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: youzhenxiang@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

irrigation modes and fertilization types had significant effects on the LAI and ADM after the tasseling stage, with the largest LAI and ADM in the treatment applied liquid organic fertilizer with drip irrigation (OD). For the same fertilization type, bubble irrigation had higher impact on maize yield and WUE than drip irrigation, and then followed by traditional furrow irrigation. For three irrigation modes, liquid organic fertilizer increased maize yield by 18.6% ~ 24.4% and WUE by 18.7% ~ 23.4% compared with chemical fertilizer. The treatment applied chemical fertilizer with bubble irrigation (CB) yielded the highest average annual net benefit of 7 373 Yuan/hm², but there was no significant difference between the treatments of CB and CF (applied chemical fertilizer with traditional furrow irrigation). In general, the combination of bubble irrigation and chemical fertilizer can be recommended as the optimal irrigation and fertilization strategy for maize production in Nile Delta, which will have a broad prospect for field irrigation in Egypt.

Key words: Maize Bubble irrigation Organic fertilizer Yield Water use efficiency Economic benefits

引言

水资源安全问题是严重困扰非洲可持续发展的主要问题之一,非洲水资源量小且分布极不均衡,70% 以上的非洲国家或地区面临水资源短缺的危机。北非埃及灌溉面积大约 100 万 hm²,55% 的人口依靠农业生存,年均缺水约 200 亿 m³^[1]。长期以来,普遍使用大水淹灌和沟灌,灌溉管理粗放,导致农业用水效率低于 0.5。人口激增和经济发展促使埃及对淡水需求与日俱增,加上气候和水资源的影响,发展节水农业已成为埃及国家农业可持续发展的根本^[2]。

随着节水农业的发展,新的灌溉模式如滴灌^[3-7]、喷灌^[8-9]、管灌^[10]、涌泉灌^[11]等在许多国家和地区取得了良好的应用和发展。与传统灌溉方式相比,滴灌可以提高甜瓜的产量和品质^[12],实行短沟灌溉可以提高马铃薯的产量和水分利用效率^[13]。王勇等研究证实,与管灌相比喷灌可以有效提高玉米产量及其构成因子,当灌溉定额大于 5 430 m³/hm²时其水分利用效率(WUE)可提高 7.76%^[14]。孙景生等 在非充分灌溉技术的基础上改进地面沟灌技术,可 提高农田水分利用效率,降低成本^[15]。杨启良等和 刘小刚等通过调整沟灌方式和施肥水平,有效调控 了作物群体发育,大幅提高了水肥的生产效益^[16-17];周罕觅等通过试验研究发现 75% ET_c亏缺 灌溉是桃树在产量、水分利用效率和果实品质上最 好的灌溉量^[18];Larson 等指出无机肥料的使用是提 高作物产量,促进非洲地区农业持续发展的先决条 件,但施肥粗放管理又造成了一系列农业环境问题^[19]。因此改变埃及的传统灌溉方式,探索田间灌 溉施肥调控指标和水肥调控模式,促进水分养分利 用效率的提高,实现节水节肥增效,对埃及农业和经

济的可持续发展具有重要的理论和现实意义。本文 研究不同灌溉方式(滴灌、涌泉细流沟灌、传统的沟 灌)和不同施肥处理对玉米生长指标、产量和水分 利用效率的影响,旨在探求适宜尼罗河三角洲的水 肥管理模式,为埃及尼罗河三角洲农业发展提供借 鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点设在埃及苏伊士运河大学校区西侧的 试验基地(30°37'N,32°15'E),海拔高度约 19 m。 该地区属于地中海气候暖夏型副热带夏干气候亚 型。天气晴朗干燥,全年平均降水量大约 20 mm。 玉米生育期试验区具体气象数据见表 1。试验区土 壤类型为沙土(砂粒 64.2%、粗砂 23.6%、粉砂 10.1%、粘土 2.1%)。不同土层深度的土壤理化性 质见表 2。土壤容重采用干燥称量法,用环刀(直径 50 cm、高 50 cm)在 0 ~ 100 cm 的土层深度取土 (20 cm 一个梯度)测量。

1.2 涌泉细流沟灌技术

涌泉细流沟灌技术是利用管道输水小细流出 水的短沟灌溉技术,是一种改进的地面沟灌技术, 水分进入沟道灌溉作物通过的不是传统的毛渠而 是细流管道,整个灌水沟的灌溉是利用垄下埋深 为 50 cm 的支管通过等间距的出水管口进行涌泉 小管出流灌溉,属于管道供水通过地面灌溉的灌 水方式。贮存灌溉水源的装置为在田间建造的重 力势达 20 kPa 的水塔。田间灌溉供水管道系统包 括主管、支管、出水毛管 3 个部分。主管是地下管 道,埋设在地边,控制整个田间灌水沟,主管的直 径为 75 mm。主管控制的每 2 条灌水沟埋设一条 管径 40 mm 的支管,支管埋设在地面以下 50 cm 深

处;在每个支管上等间距通过“T”字转换接头分流 2 个毛管出水口,分别给相邻的 2 个灌水沟供水,毛管出水流量因水头大小而异,一般在 100 L/h 以上(图 1)。

表 1 2012 年和 2013 年玉米生育期月气象因素

月份	最高气温/℃		最低气温/℃		平均气温/℃		平均相对湿度/%	
	2012 年	2013 年	2012 年	2013 年	2012 年	2013 年	2012 年	2013 年
5	32.2	32.1	20.2	21.5	26.2	27.2	49.3	50.2
6	34.4	33.4	22.7	22.3	28.8	28.5	53.5	53.1
7	38.7	39.5	24.8	25.4	31.3	31.3	59.5	60.7
8	37.5	37.7	24.2	24.8	30.5	31.7	62.3	62.4
9	33.6	34.0	22.6	23.5	27.5	28.5	60.1	60.3

表 2 试验区土壤理化性质

土层深度/ cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤体积含水率/%		pH 值	有机质质量 分数/%	电导率/ (dS·m ⁻¹)	质地
		田间持水率	凋萎含水率				
0~20	1.61	13.83	4.50	8.12	0.55	0.55	沙土
20~40	1.67	13.97	4.69	8.05	0.49	0.44	
40~60	1.71	14.95	5.12	7.92	0.45	0.41	
60~80	1.65	14.32	4.50	7.64	0.40	0.41	
80~100	1.58	13.50	4.50	7.35	0.38	0.39	

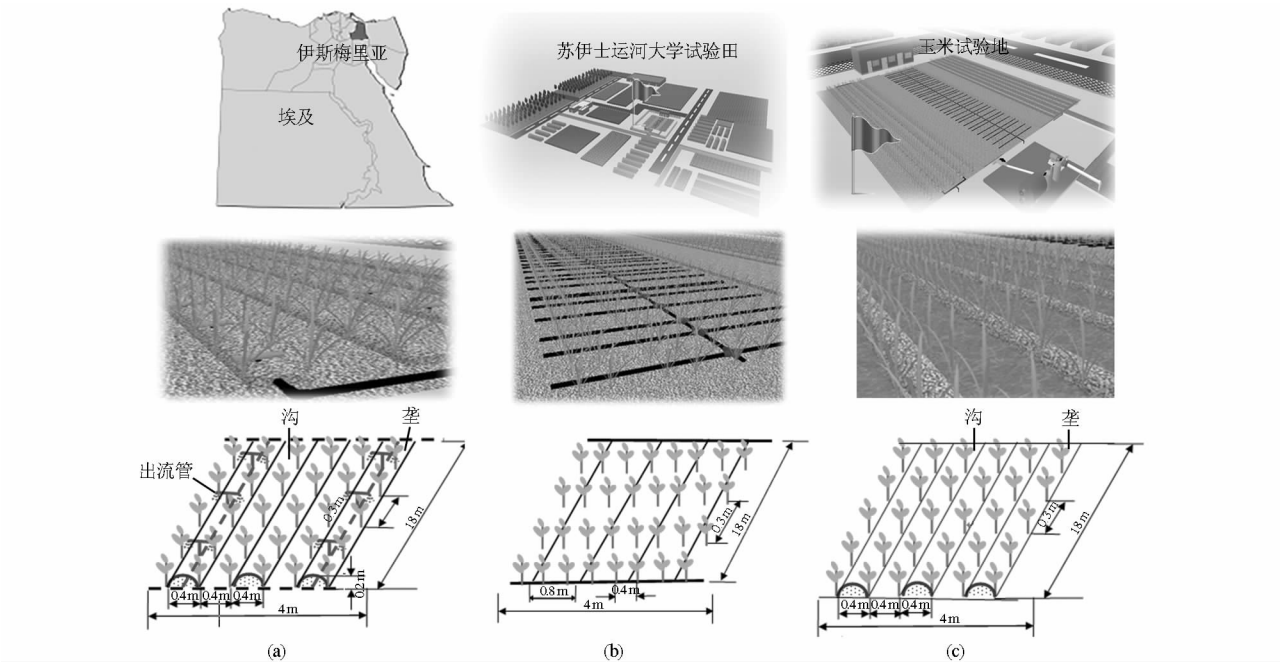


图 1 试验区概况

Fig. 1 Sketch of experiment area

(a) 涌泉细流沟灌区 (b) 滴灌区 (c) 传统沟灌区

1.3 田间试验

试验于 2012 年和 2013 年在埃及苏伊士运河大学校区西侧的试验基地进行。试验设灌溉方式和施肥种类 2 个因素,其中灌溉方式设滴灌(D)、涌泉细流沟灌(B)和传统沟灌(F)等 3 种(图 1);所施肥料分无机肥(C)和液态有机肥(O)2 种,共 6 个处理,按完全组合设计,每个处理设 4 次重复。参考 El-Hendawy 等的研究成果^[20],结合中埃两国播种经

验,本试验玉米种植密度设为 83 000 株/hm²。各试验小区长 18 m,宽 4 m,小区面积 72 m²,玉米种植行距 40 cm,株距 30 cm,滴灌小区滴灌带间距 80 cm,采用一管控制 2 行玉米;传统沟灌区和涌泉细流沟灌区垄距 40 cm,株距 30 cm,垄高 20 cm,一沟种植两行玉米。
供试材料为当地夏玉米(Gize Trihyprid 352),生育期 120 d 左右,有效积温 2 800℃,选用已包衣的

玉米种子。播种日期分别为 2012 年 5 月 28 日和 2013 年 6 月 1 日,收获日期分别为 2012 年 9 月 20 日和 2013 年 9 月 24 日。两年播种前 5 d,均在试验区灌溉 65 mm 的水泡田;播种时,均在试验区灌溉 25 mm 的保苗水,以确保玉米种子顺利出苗;播种后 7、14 d 分别灌水 25 mm 的保苗水,播种后 20 d 开始对各小区进行试验处理。

灌溉水量(I)按照作物系数(K_c)和参考作物蒸发蒸腾量(ET_o)计算,计算公式为

$$I = ET_o K_c \tag{1}$$

ET_o 按照 FAO Penman - Monteith 公式^[20]计算

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{2}$$

式中 ET_o ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d
 T ——计算时段内的平均气温,℃
 Δ ——饱和水汽压-温度曲线的斜率,kPa/K
 R_n ——太阳净辐射,MJ/(m²·d)
 G ——土壤热通量,MJ/(m²·d)
 γ ——湿度计常数,kPa/K
 e_s 、 e_a ——饱和水汽压、实际水汽压,kPa
 u_2 ——离地面 2 m 高处的平均风速,m/s

气象数据来源于距离试验地大约 500 m 的伊斯梅利亚农业气象中心实验室。 K_c 是作物蒸腾量和参考作物蒸腾量的比值。依据 FAO 56^[21],当最小相对湿度(RH_{min})为 45%,平均风速为 2.0 m/s 时,玉米初期、中期和后期阶段 K_c 的推荐值(K_{crec})分别为 0.15、1.15 和 0.15,综合考虑试验区的相对湿度、日平均风速和计算时段内玉米平均株高等因素,

按照 FAO 56 的修正公式计算得出玉米初期、中期和后期阶段的 K_c 分别为 0.30、1.21 和 0.57。 K_c 修正公式为

$$K_c = K_{crec} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \tag{3}$$

式中 RH_{min} ——计算时段内每日最小相对湿度的平均值,%, $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$
 u_2 ——计算时段内 2 m 高处的日平均风速,m/s, $1 \text{ m/s} \leq u_2 \leq 6 \text{ m/s}$
 h ——计算时段内的平均株高,m, $0.1 \text{ m} \leq h < 10 \text{ m}$

试验滴灌条件下按照当地多年平均作物需水量的 80% 灌溉^[22],每隔 2 d 灌水 1 次,2012 年和 2013 年灌水总量分别为 530、540 mm(图 2)。2011 年苏伊士运河大学 Mohammed 教授在试验地进行了涌泉细流沟灌技术的预试验,试验设置了 5 个灌溉水平(100% ET_o 、90% ET_o 、80% ET_o 、70% ET_o 、60% ET_o),结果发现涌泉细流沟灌技术在压力为 20 kPa,每隔 6 d 灌 1 次水,按照当地多年平均作物需水量的 100% 和 70% 灌溉,玉米的水分利用效率有明显差异(分别为 0.92、1.1 kg/m³),但产量没有显著差异。因此本试验涌泉细流沟灌条件下按照当地多年平均作物需水量的 70% 灌溉,2012 年和 2013 年灌水总量分别为 464、472 mm。传统沟灌方式采用当地玉米灌溉制度,在玉米生长的每个生育(苗期、拔节期、抽雄期、灌浆初期、灌浆后期)进行灌溉,各次灌水量约占整个生育期总灌水量的比例为:10%、20%、25%、25% 和 20%,2012 年和 2013 年灌水总量分别为 730、740 mm。

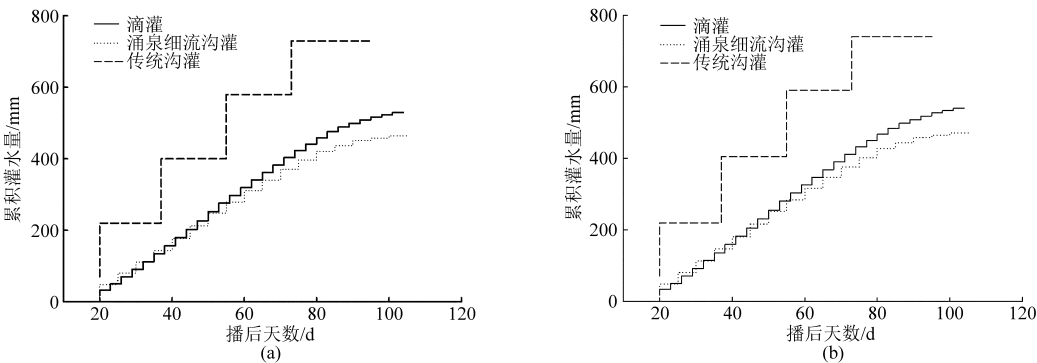


图 2 2012 年和 2013 年播种后各灌溉方式下的灌水时间和累积灌水量
Fig. 2 Irrigation depth and time for each irrigation event in 2012 and 2013
(a) 2012 年 (b) 2013 年

试验选用的氮、磷、钾肥分别是超级磷酸钙(质量分数 15.5% P₂O₅)、硫酸钾(质量分数 48% K₂O)和尿素(质量分数 46% N)。氮磷钾(N:P₂O₅:K₂O)质量比为 1:0.4:0.2,参照当地施肥水平,氮磷钾

(N-P₂O₅-K₂O)用量为 180-72-36 kg/hm²,液态有机肥为 208 L/hm²。各灌溉方式的施肥量相同:磷肥统一采用基施;滴灌条件下,钾肥在播种后 32 d 和 44 d 分 2 次均等穴施,氮肥在播种后 14、23、32、

41、50、59、68 d 分 7 次均等穴施;涌泉细流沟灌条件下,分 7 次均等穴施;沟灌条件下,钾肥在播种后 37 d 一次撒施,氮肥在播种后 14、20、37、55、73 d 分 5 次撒施。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 叶面积指数

在玉米拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期,各小区随机选 6 株,用卷尺测量玉米每片叶片的长度和宽度,计算单株叶面积和叶面积指数,叶面积指数 (Leaf area index, LAI)^[23-25] 为

$$LAI = nf/F$$

(4)

$$f_i = 0.75lb$$

(5)

式中 n ——小区玉米株数

f ——单株叶面积, cm^2

F ——小区玉米叶面积, cm^2

f_i ——单叶面积, cm^2

l ——单叶片长, cm

b ——单叶片宽, cm

0.75 为玉米叶面积的校正系数。

1.4.2 地上生物量

在不同生育期,在每个小区随机选取 6 株玉米的地面以上部分,放入干燥箱,在 105°C 下杀青 30 min, 75°C 恒温干燥至恒质量,之后放入干燥器中冷却,用电子天平称量,各小区干物质量为 6 株玉米的平均值,最后乘以种植密度换算成群体生物量 (t/hm^2)。

1.4.3 产量和构成要素

于收获期在小区中间 4 行、长度 5 m 区域内测定玉米产量,实收计产。每个小区于收获期随机选取 20 穗对玉米穗性状进行调查,调查项目包括穗长、穗粒数和百粒质量等。

1.4.4 耗水量

作物耗水量计算公式^[26]为

$$ET = P + U + I - D - R - \Delta W$$

(6)

式中 ET ——作物耗水量, mm

P ——有效降水量, mm

U ——地下水补给量, mm

I ——灌水量, mm R ——径流量, mm

D ——深层渗漏量, mm

ΔW ——试验初期和末期土壤储水量的变化量, mm

在玉米播种前和收获后,用 EC-300 型土壤水分温度电导率速测仪测定,滴灌区从滴头起,垂直滴灌管在地面 0~40 cm 水平距离每间隔 10 cm 取 4 个点,每个点以 20 cm 为梯度测定 0~100 cm 土层深度含水率;涌泉细流沟灌区和常规沟灌区从垄正中间

起,在垂直垄的方向,地面 0~40 cm 水平距离每间隔 10 cm 取 1 个点,每个点以 20 cm 为梯度测定 0~100 cm 土层深度含水率,取其平均值作为该小区的土壤含水率(%)。由于试验区地下水埋藏较深,地势平坦,且几乎无有效降水量,根据实测,生育期内 1 m 深土壤水分变化不大,且湿润深度较浅, U 、 R 和 D 均可忽略不计,则式(6)简化为

$$ET = I - \Delta W$$

(7)

1.4.5 水分利用效率(WUE)

水分利用效率(kg/m^3)计算公式^[27]为

$$WUE = Y/ET$$

(8)

式中 Y ——玉米产量, kg/hm^2

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS Statistics 18.0 统计分析软件处理试验数据,选取 Duncan 新复极差法进行多重比较,用 Origin 8.0 和 SigmaPlot 12.2 作图。

2 结果与分析

2.1 对玉米生长形态指标的影响

2.1.1 不同灌溉施肥策略对玉米叶面积指数(LAI)的影响

叶面积指数(LAI)反映的是作物群体生命活力、作物叶面数量、冠层结构变化及其环境效应,可以为植物冠层表面物质和能量交换的描述提供结构化的定量信息。2012 年和 2013 年不同灌溉施肥策略下玉米 LAI(表 3)的年际变化较小,且玉米在整个生育期内的 LAI 变化规律基本一致,表现为:拔节期以后,进入营养生长期, LAI 迅速增加,到抽雄期达到最大,进入抽雄期以后,玉米植株开始进入生殖生长期,黄叶数逐渐增多, LAI 随之逐渐减小。2012 年和 2013 年两茬试验中,不同灌溉施肥策略对玉米各生育期(拔节期、抽雄期和灌浆期)的 LAI 单因素影响和交互作用影响均为显著(除 2013 年拔节期的交互作用外)。

2012 年,与 CF 处理比较, CD 和 CB 处理下的玉米 LAI 在各生育期(拔节期、抽雄期、灌浆期)分别提高了 5.0%、10.9%、12.5% 和 7.1%、9.2%、8.3%,与 OF 处理比较, OD 和 OB 处理下玉米 LAI 在各生育期分别提高了 6.0%、10.2%、7.7% 和 7.7%、10.4%、10.2%。2013 年,与 CF 处理相比, CD 和 CB 处理下的玉米 LAI 在各生育期分别提高了 7.4%、10.5%、8.9% 和 9.4%、8.5%、5.2%,与 OF 处理比较, OD 和 OB 处理下玉米 LAI 在各生育期分别提高了 1.9%、12.5%、5.9% 和 3.4%、10.6%、3.4%。2012 年 OD 比 CD 处理下的各生育

期玉米 LAI 分别提高 5.2%、4.4% 和 2.9%，OB 比 CB 处理下的各生育期玉米 LAI 分别提高 4.7%、6.3% 和 5.8%，OF 比 CF 处理下各生育期玉米 LAI 分别提高 4.2%、5.1% 和 4.0%；2013 年 OD 比 CD 处理下的各生育期玉米 LAI 分别提高 3.8%、7.7% 和 3.0%，OB 比 CB 处理下的各生育期玉米 LAI 分别提高 3.4%、7.8% 和 4.0%，OF 比 CF 处理下各生

育期玉米 LAI 分别提高 9.4%、5.7% 和 5.9%。分析结果表明,D、B 和 F 3 种灌溉方式下,各处理玉米拔节期 LAI 由大到小依次为 B、D、F,抽雄期 D、B 灌溉方式下的 LAI 差异明显减小,由大到小依次为 D、B、F(2012 年的 O 处理除外),灌浆期 LAI 由大到小依次是 D、B、F。同比条件下,施有机肥(O)比施无机肥(C)处理下玉米 LAI 大。

表 3 2012 年和 2013 年不同处理对玉米叶面积指数的影响
Tab.3 Effects of different treatments on LAI of maize in 2012 and 2013

处理		玉米各生育期叶面积指数/(cm ² ·cm ⁻²)					
		2012 年			2013 年		
施肥种类	灌溉方式	拔节期	抽雄期	灌浆期	拔节期	抽雄期	灌浆期
C	D	2.50 ^{bc}	4.36 ^{cd}	3.41 ^{cd}	2.62 ^b	4.43 ^c	3.32 ^{ab}
	B	2.55 ^{bc}	4.29 ^{abc}	3.28 ^{bc}	2.67 ^{ab}	4.35 ^{cd}	3.21 ^{bc}
	F	2.38 ^{cd}	3.93 ^e	3.03 ^{de}	2.44 ^{bc}	4.01 ^e	3.05 ^c
O	D	2.63 ^{ab}	4.56 ^{ab}	3.51 ^{ab}	2.72 ^{ab}	4.77 ^a	3.42 ^a
	B	2.67 ^a	4.55 ^{ab}	3.47 ^a	2.76 ^a	4.69 ^{ab}	3.34 ^{ab}
	F	2.48 ^{bc}	4.13 ^{cde}	3.15 ^{cde}	2.67 ^a	4.24 ^{cd}	3.23 ^{bc}
<i>F</i> 值							
灌溉方式		7.10 [*]	6.89 [*]	4.76 [*]	3.71 [*]	3.97 [*]	9.70 ^{**}
施肥种类		19.11 ^{**}	18.41 ^{**}	9.07 [*]	9.16 [*]	11.28 ^{**}	7.57 [*]
灌溉方式×施肥种类		4.97 [*]	4.67 [*]	4.07 [*]	0.11	5.06 [*]	5.22 [*]

注:同列数值后不同字母表示差异显著($P<0.05$);*表示差异显著,**表示差异极显著,下同。

2.1.2 不同灌溉施肥策略对玉米地上生物量 (ADM)的影响

地上生物量(ADM)可以反映作物生长情况,这里 ADM 指玉米地表以上部分,包括玉米的茎、叶和穗等。2012 年和 2013 年两茬试验中不同灌溉施肥策略下玉米 ADM 见表 4,各处理间在苗期无明显差

异,自拔节期玉米进入营养生长期,其 ADM 增长迅速,灌浆期后生殖生长占主导作用,ADM 增幅变缓。不同灌溉施肥策略对玉米各生育期(拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期)的 ADM 单因素影响和交互作用影响均为显著(除 2013 年拔节期灌溉方式单因素影响和灌溉施肥的交互作用影响外)。

表 4 2012 年和 2013 年不同处理对玉米地上生物量(ADM)的影响
Tab.4 Effects of different treatments on aboveground dry mass of maize in 2012 and 2013

处理		玉米各生育期地上生物量/(t·hm ⁻²)									
		2012 年					2013 年				
施肥种类	灌溉方式	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期
C	D	0.10 ^b	2.82 ^c	9.61 ^c	16.86 ^c	18.05 ^{bc}	0.11 ^b	2.86 ^{cd}	9.86 ^{cd}	17.82 ^{ab}	18.11 ^{bc}
	B	0.11 ^a	2.91 ^{bc}	10.05 ^b	16.77 ^{bc}	17.87 ^b	0.12 ^a	2.99 ^{bc}	10.26 ^{bc}	17.67 ^{bc}	18.06 ^{bc}
	F	0.10 ^{ab}	2.65 ^d	9.21 ^d	16.34 ^c	17.28 ^{cd}	0.12 ^a	2.71 ^{de}	9.71 ^{de}	17.03 ^{de}	17.36 ^{de}
O	D	0.10 ^{ab}	3.02 ^{ab}	10.42 ^{ab}	17.65 ^{ab}	18.53 ^a	0.11 ^{ab}	3.11 ^{ab}	10.38 ^{ab}	18.12 ^a	18.51 ^{ab}
	B	0.11 ^a	3.06 ^{ab}	10.57 ^a	17.71 ^a	18.49 ^a	0.12 ^a	3.22 ^a	10.62 ^a	17.84 ^{ab}	18.25 ^a
	F	0.10 ^{ab}	2.88 ^{bc}	10.04 ^b	17.16 ^b	17.86 ^{bc}	0.11 ^{ab}	3.01 ^b	10.13 ^{bcd}	17.49 ^{bc}	17.95 ^{bcd}
F 值											
灌溉方式		3.11	4.21 [*]	6.26 [*]	6.57 [*]	5.61 [*]	3.57	2.94	6.17 [*]	6.75 [*]	5.94 [*]
施肥种类		0.67	9.01 [*]	9.08 [*]	25.60 ^{**}	29.70 ^{**}	0.16	8.94 [*]	6.93 [*]	9.56 ^{**}	19.15 ^{**}
灌溉方式×施肥种类		2.38	3.75 [*]	3.98 [*]	4.59 [*]	3.79 [*]	2.86	1.31	3.76 [*]	5.15 [*]	3.77 [*]

与 CF 处理相比,2012 年 CD 和 CB 处理下玉米拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期的 ADM 分别提高了 6.4%、4.3%、3.2%、4.5% 和 9.8%、9.1%、2.6%、3.4%,OD 和 OB 处理相比 OF 处理的玉米各

生育期 ADM 分别提高了 4.9%、3.8%、2.9%、3.8% 和 6.3%、5.3%、3.2%、3.5%。2013 年 CD 和 CB 处理相比 CF 处理玉米在各生育期的 ADM 分别提高了 5.5%、1.5%、4.6%、4.3% 和 10.3%、

5.7%、3.8%、4.0%，OD 和 OB 处理相较 OF 处理玉米 ADM 分别提高了 3.3%、2.5%、3.6%、3.1% 和 7.0%、4.8%、2.0%、1.7%。2012 年 OD 比 CD 处理下玉米各生育期（拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期）的 ADM 分别提高了 7.1%、8.4%、4.7% 和 2.7%，OB 比 CB 处理分别提高了 5.2%、5.2%、5.6% 和 3.5%，OF 比 CF 处理分别提高了 8.7%、9.0%、5.0% 和 3.4%；2013 年 OD 比 CD 处理下玉米各生育期的 ADM 分别提高了 8.7%、5.3%、1.7% 和 2.2%，OB 比 CB 处理分别提高了 7.7%、3.5%、1.0% 和 1.1%，OF 比 CF 处理分别提高了 11.1%、4.3%、2.7% 和 3.4%。分析结果表明，D、B 和 F3 种灌溉方式下，拔节期和抽雄期 ADM 由大到小依次是 B、D、F，灌浆期和成熟期 AMD 由大到小是 D、B、F（2012 年 O 处理除外，其为 B>D>F）；同比条件下，施有机肥（O）比施无机肥（C）的处理 ADM 要大。

2.2 不同灌溉施肥策略对产量构成要素的影响

表 5 给出了 2012 年和 2013 年玉米穗长、穗粒数和百粒质量等产量构成要素的方差分析结果。由表 5 可以看出，穗长、穗粒数和百粒质量等各要素随

灌溉施肥策略的不同而有显著差异（灌溉的单因素影响和灌溉施肥的交互作用对百粒质量的影响除外）。

2012 年，CD 比 CF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 10.3%、4.3% 和 2.6%，CB 比 CF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 23.9%、6.1% 和 4.7%，OD 比 OF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 9.5%、2.8% 和 1.6%，OB 比 OF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 26.8%、6.5% 和 2.8%。2013 年，CD 比 CF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 0.6%、2.4% 和 0.9%，CB 比 CF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 18.0%、6.6% 和 5.6%，OD 比 OF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 5.2%、2.6% 和 1.2%，OB 比 OF 处理的玉米穗长、穗粒数和百粒质量分别提高了 27.7%、5.2% 和 6.1%。分析结果表明，不同灌溉方式下，穗长、穗粒数和百粒质量的变化趋势基本一致，由大到小依次是 B、D、F，施有机肥（C）比施无机肥（O）有利于玉米产量各构成要素的提高。

表 5 2012 年和 2013 年不同处理对玉米产量及其构成要素的影响

Tab.5 Analysis of variance summary for yield components of treatments for maize in 2012 and 2013

处理		2012 年			2013 年		
施肥种类	灌溉方式	穗长/cm	穗粒数	百粒质量/g	穗长/cm	穗粒数	百粒质量/g
C	D	17.1 ^{cd}	354.8 ^{bc}	23.9 ^{ab}	16.8 ^{cd}	351.2 ^{ab}	23.5 ^{ab}
	B	19.2 ^b	361.1 ^d	24.4 ^{ab}	19.7 ^{bc}	365.6 ^b	24.6 ^b
	F	15.5 ^c	340.2 ^c	23.3 ^b	16.7 ^{de}	342.9 ^{ab}	23.3 ^{ab}
O	D	18.4 ^{ab}	371.8 ^a	25.8 ^a	18.2 ^{bc}	395.9 ^a	25.0 ^b
	B	21.3 ^a	385.2 ^{bc}	26.1 ^a	22.1 ^a	406.0 ^b	26.2 ^a
	F	16.8 ^{bc}	361.7 ^b	25.4 ^{ab}	17.3 ^d	386.0 ^{ab}	24.7 ^{ab}
F 值							
灌溉方式		7.8 [*]	11.1 ^{**}	1.2	3.8 [*]	4.5 [*]	2.1
施肥种类		31.1 ^{**}	41.3 ^{**}	10.4 [*]	18.9 ^{**}	40.0 ^{**}	6.3 [*]
灌溉方式×施肥种类		3.3 [*]	5.1 [*]	0.6	1.4 [*]	2.1 [*]	0.7

2.3 不同灌溉施肥策略对玉米产量和水分利用效率的影响

图 3 为不同灌溉施肥策略对玉米产量及水分利用效率（WUE）的影响。2012 年和 2013 两年试验结果表明：灌溉方式和施肥种类对玉米产量和 WUE 影响显著，且施肥种类对玉米产量和 WUE 的影响大于灌溉方式，2012 年和 2013 年施有机肥（O）处理的玉米平均产量比施无机肥（C）处理的高 19.4% 和 22.9%，2012 年和 2013 年施有机肥（O）处理的玉米平均 WUE 比施无机肥（C）处理的高 19.3% 和 22.5%。施肥种类相同的不同灌溉方式（D、B、F）

下，玉米产量和 WUE 由大到小依次为 B、D、F。两年试验的玉米产量和 WUE 结果最小值均出现在施有机肥的传统沟灌（CF）处理（2012 年和 2013 年 CF 处理的产量和 WUE 分别为 5 881、6 076 kg 和 0.73、0.75 kg/m³），最大值出现在施有机肥的涌泉细流沟灌（OB）处理（2012 年和 2013 年 OB 处理的产量和 WUE 分别为 7 424、7 822 kg 和 1.38、1.43 kg/m³）。两年试验结果年际变化表现为，2013 年不同施肥策略下各处理的玉米产量和 WUE 整体水平略高于 2012 年（2013 年的各处理产量比 2012 年提高 2.0% ~ 6.9%，WUE 比 2012 年提高 1.1% ~ 5.2%）。

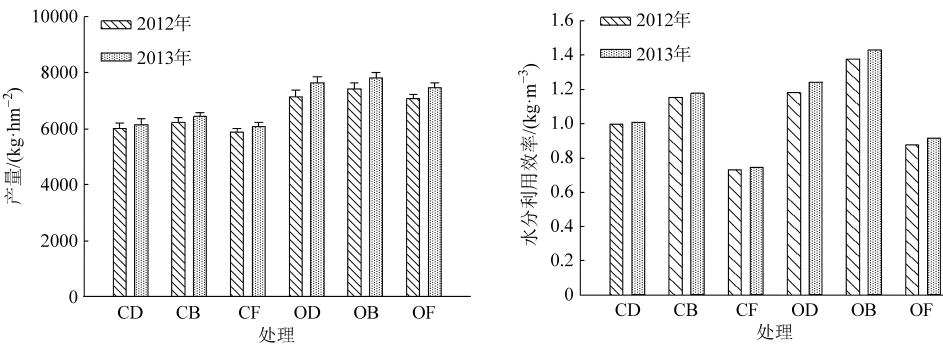


图 3 2012 年和 2013 年不同处理对玉米产量及水分利用效率的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on yields and WUE of maize in 2012 and 2013

2.4 不同灌溉施肥策略经济效益分析

经济效益分析是度量灌溉施肥策略优劣的手段,分析时要综合考虑各灌溉施肥策略给农业带来的经济效益,以及随之而来的节水效益和社会效益,本次试验具体考核指标有试验总支出、农业经济毛效益和农业净效益等(表 6),其间关系为

$$N_R = G_R - T_E \tag{7}$$

式中 N_R ——农业净效益,元/hm²
 G_R ——农业毛效益,元/hm²
 T_E ——农业总支出,元/hm²

其中,试验总支出费用包括各灌溉施肥策略的材料费(即灌溉系统管材费,第 1 年投入的布设灌溉系统管材费和人工费等所有支出费用按静态成本均摊到使用年限内的各年中,滴灌系统使用年限按 4 年计,涌泉细流沟灌系统按 7 年计),种子、农药、肥料等农化原料费,试验期间的电费,以及每年的灌溉系统维修、整地、播种、除草、施肥、打农药、收获用工等人工费;农业毛效益为玉米产量乘以玉米单价,埃及玉米单价为 1.84 元/kg;农业净效益为农业毛效益与总支出之差。

由表 6 可以看出,2012 年和 2013 年的玉米毛效益、净效益年际差异很小,各处理间差异显著。与 CF 处理相比,2012 年 CD 处理的毛效益提高 2.4%,净效益降低了 33.5%,CB 处理的毛效益、净

效益分别提高 5.8% 和 2.1%;与 OF 处理相比,2012 年 OD 处理的毛效益提高 1.1%,净效益降低了 38.8%,OB 处理毛效益、净效益分别提高 5.1% 和 1.8%。2013 年,与 CF 处理相比,CD 处理的毛效益提高 1.1%,净效益降低了 33.8%,CB 处理的毛效益和净效益提高 5.9% 和 2.4%;与 OF 处理相比,OD 处理的毛效益提高 2.4%,净效益降低了 32.2%,OB 处理毛效益、净效益提高 4.9% 和 1.8%。2012 年 OD 比 CD 处理产量提高 15.7%,净效益降低了 19.9%,OB 比 CB 处理产量提高 16.2%,净效益降低了 10.7%,OF 比 CF 处理产量提高 16.8%,净效益降低了 10.4%;2013 年 OD 比 CD 处理产量提高 19.6%,净效益降低了 1.8%,OB 比 CB 处理产量提高 17.7%,净效益降低了 4.9%,OF 比 CF 处理产量提高 18.5%,净效益降低了 4.2%。分析结果表明,施肥种类相同的 3 种灌溉(D、B、F)方式中,玉米毛效益由大到小依次是 B、D、F,净效益由大到小依次是 B、F、D。不同灌溉施肥策略下,年均毛效益最大的是 OB 处理(14 040 元/hm²),最小的是 CF 处理(11 008 元/hm²),年均净效益最大的是 CB 处理(7 373 元/hm²),最小的是 OD 处理(4 353 元/hm²)。同种灌溉方式下,施有机肥(O)处理比施无机肥(C)处理有利于提高玉米产量,但净效益降低。

表 6 2012 年和 2013 年不同处理下玉米的经济效益分析

Tab. 6 Economic benefit analysis for different treatments of maize in 2012 and 2013

元/hm²

处理		总支出				毛效益		净效益	
施肥种类	灌溉方式	材料费	农化原料费	电费	人工费	2012 年	2013 年	2012 年	2013 年
C	D	3 019	1 685	403	1 310	11 094	11 309	4 674	4 890
	B	1 007	1 685	282	1 310	11 462	11 856	7 176	7 569
	F	0	1 685	503	1 610	10 827	11 189	7 030	7 391
O	D	3 019	4 529	403	1 310	13 176	14 065	3 899	4 807
	B	1 007	4 529	342	1 310	13 672	14 408	6 483	7 220
	F	0	4 529	503	1 610	13 011	13 735	6 369	7 093

注:埃及农业用水免费,总支出没有水费,只有抽水用的电费。

3 讨论

灌溉方式对作物 LAI 和 ADM 有较大的影响,滴灌作物的 LAI 和 ADM 高于传统沟灌^[28-29],改进地面沟灌方式可明显提高作物 LAI,促进作物生物量的累积和转移^[16],适当的灌水处理会提高作物光合同化能力,促进作物群体生长发育^[30],在作物生长发育过程中水分胁迫锻炼,可明显增强根系的吸水能力^[31],同时产生根源信号传输至地上部叶片,调节气孔保持最适开度,不牺牲作物光合产物积累而大量减少其奢侈蒸腾耗水^[32-33]。此外,作物 LAI 对棵间蒸发的影响明显,不同灌水方式的灌后蒸发差异明显^[34]。本研究中玉米 LAI 和 ADM 在拔节期表现出 $B > D > F$,在抽雄期、灌浆期和收获期表现为 $D > B > F$ 。试验结果表明,涌泉细流沟灌技术可促进玉米在拔节期的生长发育,而滴灌技术在抽雄期、灌浆期和收获期更有利于玉米的植株生长,且在整个生育期滴灌玉米 LAI 增长速率较大,ADM 的累积较明显,说明滴灌玉米生长较旺盛,从而表现出较强的群体生命活力。这可能是本试验区的气候条件和灌溉制度所致,试验地处于日照强烈、气温高、风速较大的尼罗河三角洲地区,该区土壤是典型的沙质土壤,涌泉细流沟灌(按 70% ET_0 灌水)和滴灌(按 80% ET_0 灌水)的灌水频次分别是 5 d 和 3 d。苗期—拔节期是玉米快速营养生长期,需要大量的水分和养分供给,涌泉细流沟灌单次灌水量大,灌后土壤湿润层深度较大,尤其是作物根系活跃层土壤含水率较高,既保证了玉米生长的水分供给,又没有如传统沟灌产生大量的深层渗漏,也没有如滴灌产生较高的相对蒸发量,优化了农田土壤水环境,促进了玉米叶片和植株体的生长,因此涌泉细流沟灌方式下玉米拔节期的 LAI 和 ADM 较大。拔节期以后玉米 LAI 增大,作物群体内部气温减小,又因受边界作物植株体的阻挡,作物群体内部风速减小,玉米的相对蒸发量减小,故滴灌方式下作物冠层对其棵间蒸发产生的抑制作用尤其明显,从而表现出其 LAI 和 ADM 增幅较其他灌溉方式明显。但本研究仅为两年试验的结果,且受研究区风、热等气候因子和土壤质地等影响,是否适宜于其他气候区和土壤质地区,有待试验验证,另外还可能受年份间差异的影响,是否适宜于其他年型,也需要进一步验证。

灌溉方式对玉米的生殖生长亦有明显的影响^[16],本研究结果是涌泉细流沟灌玉米的产量高于滴灌和传统沟灌玉米,这可能除试验区气候条件、土壤质地等因素外,还与涌泉细流沟灌的单次灌水量和单次灌水时间长短有关。涌泉细流沟灌方式下灌

水后 1~2 d 内土壤含水率较高,2 d 后随着土壤含水率的降低,玉米根系开始受水分胁迫影响,这在一定程度上抑制了作物的冗余生长,节水的同时还提高了作物光合同化能力和根系对水肥的吸收利用与传输效率,保证了作物产量的形成,使得作物产量和 WUE 增大。此外,玉米产量的提高在一定程度上与施肥种类、数量和配施方式等密切相关^[35],有机肥中营养元素以离子型态存在,有利于作物根系吸收,可显著提高玉米在拔节期、抽雄期和灌浆期的光合速率^[36],促进生育期 ADM 累积量的提升,尤其是生殖生长阶段显著提高了穗粒数和百粒质量,这是施有机肥增产的重要原因。与 2012 年试验相比,2013 年 D、B、F 灌溉方式下施有机肥(O)处理的产量分别提高 6.9%、5.4% 和 5.6%,这与刘玉涛等^[37]研究得出连年施用有机肥,可增加土壤养分含量,提高土壤供肥保水,改善土壤结构,促进玉米生长,提高产量的结论一致。

Darouich 等^[38]通过多准则分析评价了滴灌与地面灌溉的节水 and 经济效益,发现滴灌技术能否被广泛使用主要取决于当地水资源、成本、产出价格和信贷政策等。有研究表明滴灌系统往往因先期工程投资高而导致其利润率低下^[39],尤其本研究区埃及农业用水由政府补贴,农户仅需支付灌溉用水所耗电费,而其本土工业又不发达,灌溉系统所需管材几乎全部依赖进口,价格较高,所需管材较多的滴灌,更是进一步提高了成本,而玉米单价仅为 1.84 元/kg,因此滴灌系统的利润率较低。滴灌系统在非洲地区的推广应用过程中,往往因堵塞、管材易老化和不当等诸多问题而闲置,甚至荒废^[40]。在我国新疆地区,政府的技术支持和资金补贴就极大地促进了滴灌的发展和应用^[41]。本试验研究中传统沟灌虽然净效益高,但 WUE 低,与之相比,滴灌 WUE 平均提高了 35.4%,涌泉细流沟灌则平均提高了 57.6%。可见,在传统沟灌技术上改进的涌泉细流沟灌技术,既可提高作物产量和 WUE,又具有投资少、效益高等优点,在埃及现有国情和环境下的大田实际灌溉中有广阔的应用前景。另外,需要指出的是本研究进行的效益分析仅局限于经济方面的投入和效益,没有涉及生态环境和社会效益等方面的综合效益问题,仅从经济上评判一个灌溉方式的合理性尚且不足。

4 结论

(1)涌泉细流沟灌技术在生长前期可促进玉米植株营养生长,在生长后期又能有效抑制玉米植株的冗余生长,使光合产物向有利于产量形成方向运

转,使得产量和 WUE 增加。各处理产量由高到低依次是:OB、OD、OF、CB、CD、CF。OB 处理的年均产量和 WUE 最高(分别为 7 624 kg/hm² 和 1.40 kg/m³),OD 处理的产量和 WUE 次之,分别为 7 392 kg/hm² 和 1.21 kg/m³),OF 处理产量位居第 3,为 7 263 kg/hm²,WUE 位居第 3 的是 CB 处理(1.17 kg/m³)。

(2)与无机肥相比,有机肥有利于促进玉米生长,表现为全生育期 LAI 和 ADM 的显著提高,同时通过提高玉米穗粒数和百粒质量,增加玉米产量。

(3)由于埃及滴灌系统成本较高,有机肥价格较贵,农业用水免费,使得 CB 处理年均净效益最高,达 7 373 元/hm²,CF 处理次之,为 7 211 元/hm²,再其次是 OB 和 OF 处理,年均净效益最小的 2 个处理是 CD 和 OD,分别为 4 782、4 353 元/hm²。

(4)涌泉细流沟灌技术下施无机肥(即 CB 处理)种植玉米可获得最大净效益,因此涌泉细流沟灌技术为适宜于埃及尼罗河三角洲的玉米供水模式,在现有的国情和环境下的大田实际灌溉中有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 Wichelns D. Economic analysis of water allocation policies regarding Nile River water in Egypt [J]. *Agricultural Water Management*,2002,52(2):155-175.

2 Ahmed A A, Fogg G E. The impact of groundwater and agricultural expansion on the archaeological sites at Luxor Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*,2014,95:93-104.

3 Lamm F R, Stone L R, Manges H L, et al. Optimum lateral spacing for subsurface drip-irrigated corn[J]. *Transactions of the ASAE*,1997,40(4):1021-1027.

4 Sezen S M, Gencel B. Drip irrigation of corn in the Southeast Anatolia Project (GAP) area in Turkey[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002,51(4):293-300.

5 Karam F, Breidy J, Stephan C, et al. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon[J]. *Agricultural Water Management*,2003, 63(2):125-137.

6 Dağdelen N, Başal H, Yılmaz E, et al. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey[J]. *Agricultural Water Management*,2009,96(1):111-120.

7 吴立峰,张富仓,周罕觅,等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. *农业工程学报*,2014,30(20): 137-146.

Wu Lifeng, Zhang Fucang, Zhou Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. *Transactions of the CSAE*,2014,30(20):137-146. (in Chinese)

8 Al-Jamal M S, Ball S, Sammis T W. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production[J]. *Agricultural Water Management*,2001,46(3):253-266.

9 Hergert G W. Nitrate leaching through sandy soil as affected by sprinkler irrigation management[J]. *Journal of Environmental Quality*,1986,15(3):272-278.

10 吴普特,汪有科,辛小桂,等. 陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范[J]. *干旱地区农业研究*,2008,26(4):1-6.

Wu Pute, Wang Youke, Xin Xiaogui, et al. Integration and demonstration of the date micro-irrigation technology in the hilly of Shanbei[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2008,26(4):1-6. (in Chinese)

11 杨素哲,沈菊艳,黄宝全,等. 果树涌泉灌溉方式的技术应用[J]. *农业工程学报*,2005,21(增刊1):68-71.

Yang Suzhe, Shen Juyan, Huang Baoquan, et al. Technology and application of fruit tree bubbler irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*,2005,21(Supp.1):68-71. (in Chinese)

12 岳文俊,张富仓,李志军,等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 88-96.

Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(2): 88-96. (in Chinese)

13 Sammis T W. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops[J]. *Agronomy Journal*, 1980,72(5):701-704.

14 王勇,白晓玲,赵举,等. 喷灌条件下玉米地土壤水分动态与水分利用效率[J]. *农业工程学报*,2012,28(增刊1): 92-97.

Wang Yong, Bai lingxiao, Zhao Ju, et al. Dynamic variations of soil moisture and water use efficiency of maize under sprinkler irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*,2012,28(Supp.1):92-97. (in Chinese)

15 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)

16 杨启良,张富仓,刘小刚,等. 沟灌方式和氮对玉米产量与水分传导的影响[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)

17 刘小刚,张岩,程金焕,等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. *农业机械学报*,2014,45(8):160-166.

Liu Xiaogang, Zhang Yan, Cheng Jinhuan, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(8): 160-166. (in Chinese)

18 周罕觅,张富仓,李志军,等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. *农业机械学报*, 2014,45(12): 171-180.

- Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171–180. (in Chinese)
- 19 Larson B A, Frisvold G B. Fertilizers to support agricultural development in sub-Saharan Africa: what is needed and why[J]. Food Policy, 1996, 21(6): 509–525.
- 20 El-Hendawy S E, El-Lattief E A A, Ahmed M S, et al. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 836–844.
- 21 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- 22 El-Hendawy S E, Schmidhalter U. Optimal coupling combinations between irrigation frequency and rate for drip-irrigated maize grown on sandy soil[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 439–448.
- 23 Watson D J. Comparative physiological studies in the growth of field crops: I. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. Annals of Botany, 1947, 41(11): 41–76.
- 24 祁红彦, 周广胜, 许振柱. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(1): 22–26.
- Qi Hongyan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(1): 22–26. (in Chinese)
- 25 麻雪艳, 周广胜. 玉米叶面积指数动态模拟的最适野外观测资料[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1579–1585.
- Ma Xueyan, Zhou Guangsheng. Optimum field observation data for simulating maize leaf area index[J]. The Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1579–1585. (in Chinese)
- 26 Oweis T Y, Farhani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239–1248.
- 27 Eberbach P, Pala M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in the northern Syria [J]. Plant and Soil, 2005, 268(1–2): 195–208.
- 28 Adaobi U P. 不同灌水方式下依据水面蒸发量确定夏玉米适宜灌溉制度的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- 29 杜社妮, 白岗桢, 梁银丽. 灌溉方式对黄瓜生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(4): 433–439.
- Du Shen, Bai Gangshuan, Liang Yinli. Effects of irrigation methods on cucumber growth, yield and water use efficiency[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science, 2010, 36(4): 433–439. (in Chinese)
- 30 李培岭, 张富仓. 不同沟灌方式下根区水氮调控对棉花群体生理指标的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 38–45.
- Li Peiling, Zhang Fucang. Effect of root zone water and nitrogen regulation on cotton population physiological indices under different furrow irrigation patterns[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 38–45. (in Chinese)
- 31 Zegbe-Dominguez J A, Behboudian M H, Lang A, et al. Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in ‘Petopride’ processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill)[J]. Scientia Horticulturae, 2003, 98(4): 505–510.
- 32 Hu T, Kang S, Li F, 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.
- 33 胡笑涛, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 作物根系分区交替灌溉田间实施技术探索[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊1): 145–148.
- Hu Xiaotao, Kang Shaozhong, Cai Huanjie, et al. Study on field operating methods of controlled roots-divided alternate irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(Sup. 1): 145–148. (in Chinese)
- 34 汪顺生, 费良军, 高传昌, 等. 不同沟灌方式下夏玉米棵间蒸发试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 66–71.
- Wang Shunsheng, Fei Liangjun, Gao Chuanchang, et al. Soil evaporation of summer maize under different furrow irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 66–71. (in Chinese)
- 35 王曙光, 许轲, 戴其根, 等. 氮肥运筹对太湖麦区弱筋小麦宁麦9号产量与品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 65–68.
- Wang Shuguang, Xu Ke, Dai Qigen, et al. Effect of nitrogen applying methods on yield and quality of Ningmai 9 in Taihu Region [J]. Journal of Triticeae Crops, 2004, 25(5): 65–68. (in Chinese)
- 36 王晓娟, 贾志宽, 梁连友. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 419–425.
- Wang Xiaojuan, Jia Zhikuan, Liang Lianyou. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize[J]. The Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 419–425. (in Chinese)
- 37 刘玉涛. 旱地玉米施用有机肥的定位研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(2): 86–88.
- Liu Yutao. Study on the fixed position of applying organic fertilizer on maize fields of dry land [J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(2): 86–88. (in Chinese)
- 38 Darouch H M, Pedras C M G, Gonçalves J M, et al. Drip vs. surface irrigation: a comparison focussing on water saving and economic returns using multicriteria analysis applied to cotton[J]. Biosystems Engineering, 2014, 122: 74–90.
- 39 Rajak D, Manjunatha M V, Rajkumar G R, et al. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1): 30–36.
- 40 Friedlander L, Tal A, Lazarovitch N. Technical considerations affecting adoption of drip irrigation in sub-Saharan Africa[J]. Agricultural Water Management, 2013, 126: 125–132.
- 41 聂爱平. 示范推广滴灌技术应因地制宜[J]. 农业科技与信息, 2009(17): 8–9.
- Nie Aiping. Demonstration and extension of drip irrigation should be adapt to local conditions[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2009(17): 8–9. (in Chinese)