

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.010

# 滴灌精准施肥装置棉田施氮配肥能力研究\*

陈剑<sup>1</sup> 张泽<sup>1</sup> John A Yunger<sup>2</sup> 吕新<sup>1</sup> 田敏<sup>1</sup> 侯振安<sup>1</sup>

(1. 石河子大学农学院, 石河子 832000; 2. 伊利诺伊州长州立大学生物系, 芝加哥 60466)

**摘要:** 在 SPAD 营养诊断氮素施肥模型基础上, 确定滴灌棉花不同生育期的最佳施氮量; 结合单次灌溉时间、轮灌区面积的相关研究, 确定不同规格配肥盘的配肥时间。通过对比配肥盘单位时间配肥量与施肥量之间的关系, 确定滴灌精准施肥装置的施氮配肥能力。结果表明: 滴灌棉田单位时间施肥量只与单井出水量  $Q$  和特定棉花生育时期的施氮量  $N_d$  有关。该装置 100、200、300 g 3 个规格配肥盘无论在任何单井出水量情况下, 都无法满足棉花全生育期追施氮肥的需要, 400 g 与 500 g 规格的配肥盘也只能满足特定单井出水量条件下的棉花追氮任务, 并在此基础上对装置的优化与改进进行了阐述。

**关键词:** 滴灌棉田 精准施肥装置 配肥 单位时间施氮量

**中图分类号:** S224.22; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0062-07

## 引言

滴灌变量控制精准施肥装置是应用在滴灌农田可精确控制施肥量与施肥时间, 并能提高注肥均匀度的施肥装置。近几年国外重点对滴灌施肥系统的开发<sup>[1]</sup>与设施农业小范围施肥控制<sup>[2]</sup>领域进行了深入的研究, 国内研究多集中在农田施入基肥的变量施肥机械<sup>[3]</sup>。而当前用于农田滴灌的追肥施肥装置依然沿用着施肥时间与施肥量不可控, 且注肥均匀度较低的压差式施肥罐。滴灌施肥装置的研究大多只是分析了注肥均匀度与注肥时间之间的关系<sup>[4]</sup>, 变量施肥技术研究也主要集中在基肥撒施方面<sup>[5]</sup>。而对于农田滴灌精准追肥装置方面的研究鲜有报道。

棉花是新疆的优势特色产业, 种植面积约占全国的 1/3, 产量占全国 50% 以上, 是我国最大的优质商品棉生产基地。它具有经济价值高、生育期长、需水、需肥量大等特点, 其中滴灌棉田 80% 以上的氮肥依靠滴灌系统施入农田<sup>[6]</sup>。为实现棉田滴灌施肥量、施肥时间的精确可控, 提高施肥装置注肥均匀度, 需依据棉田实际施肥需要设置不同的配肥模式。本文以自主研发的滴灌精准施肥装置为研究对象, 通过明确基于 SPAD 营养诊断的滴灌棉花不同生育时期最佳施氮量、单次灌水时间与轮灌区面积, 研究

精准施肥装置不同规格配肥盘单次施肥时间, 确定滴灌精准施肥装置在不同灌溉条件与棉花不同生育时期的配肥能力。

## 1 滴灌精准施肥装置工作原理与参数

### 1.1 滴灌精准施肥装置工作原理

滴灌精准施肥装置是一套与滴灌首部施肥管路相连接, 并由自控系统向滴灌首部定时定量配入不同种类与质量固体可溶肥料的装置。该设备主要由配肥装置<sup>[7]</sup>(图 1)、活塞密闭式施肥装置<sup>[8]</sup>(图 2) 两部分组成(图 3)。装置配肥是通过步进电动机驱动配肥盘料仓从肥料箱接入肥料后旋转 180°(图 4), 将配肥盘料仓里的肥料通过下料管漏入活塞密闭式施肥罐内(图 2), 再由直线电动机驱动活塞密封施肥罐的下料口, 最后开启施肥罐进水口电磁阀, 并利用滴灌首部压差完成施肥。

### 1.2 装置施肥相关参数

**肥料箱:** 肥料箱总容积为 400 L, 中间有一隔板, 可实现 2 个配肥盘施用一种肥料, 也可均分成 2 个肥料箱分别施入不同肥料。

**料仓规格:** 试验设计了 6 种不同容积的配肥盘料仓, 分别为 100、200、300、400、500、600 g。

**配肥盘角速度:** 通过对 110BYG350B-130 型三

收稿日期: 2014-01-29 修回日期: 2014-08-06

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD41B02)、国家农业成果转化资金资助项目(2013G4108001)和师市科技型中小企业科研项目计划资助项目(2014QY13)

作者简介: 陈剑, 博士生, 主要从事变量控制精准施肥装置研究, E-mail: 123392738@qq.com

通讯作者: 吕新, 教授, 博士生导师, 主要从事作物信息技术与精准农业研究, E-mail: lxshz@126.com

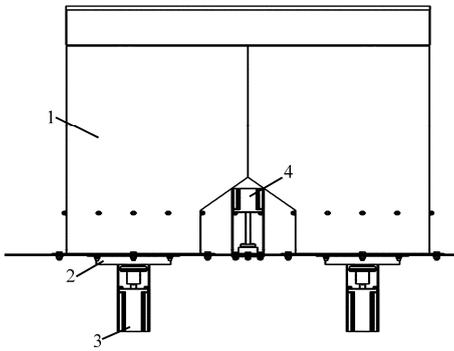


图 1 滴灌变量控制精准施肥装置主要构造

Fig. 1 Main structure of drip variable control precision fertilizing device

1. 肥料箱 2. 配肥盘 3. 步进电动机 4. 直线电动机

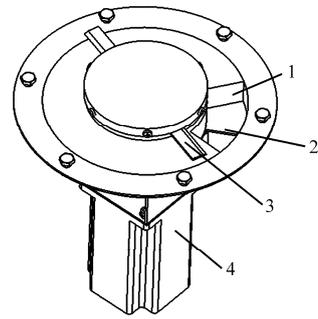


图 4 配肥系统构造

Fig. 4 Fertilizer distribution system configuration

1. 配肥盘料仓 2. 下料口 3. 搅肥盘 4. 步进电动机

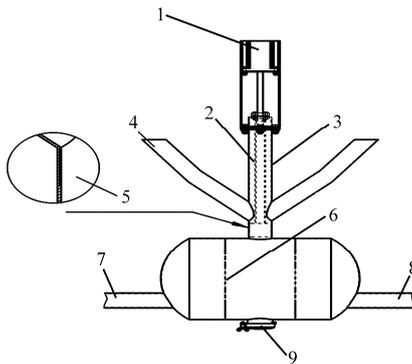


图 2 活塞密闭式施肥设备构造

Fig. 2 Pistons closed fertilizer equipment construction

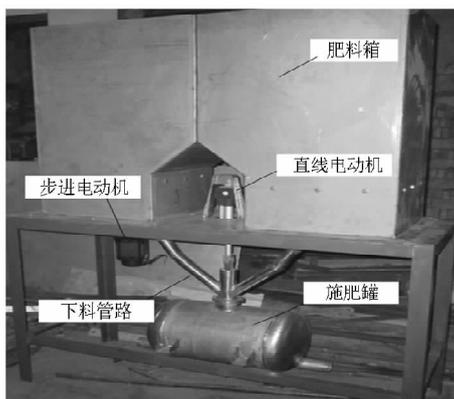
1. 直线电动机 2. 活塞 3. 活塞腔 4. 下料管路 5. 进气口  
6. 过滤网 7. 进水口 8. 出水口 9. 排杂阀

图 3 滴灌精准施肥装置实物图

Fig. 3 Drip precision fertilizing device physical map

相步进电动机驱动器进行调试, 设置配肥盘角速度为  $0.5\pi$  rad/s, 即配肥盘旋转  $180^\circ$  耗时 2.0 s。

活塞升、降时间: L 型铝合金直线电动机驱动的活塞行程为 200 mm, 荷载行程 80 mm, 空载行程 120 mm; 荷载速度 23 mm/s, 空载速度 25 mm/s, 活塞升、降时间为 8.3 s。

过滤网目数: 为过滤固体尿素中的杂质以及避免尿素颗粒未完全溶解便冲入滴灌首部, 在活塞式施肥罐内部出水端加装 100 目的过滤网。

## 2 装置配肥试验

### 2.1 装置配肥盘料仓容积规格分析

配肥盘料仓容积越大, 所需的施肥时间就越短, 也可以满足较大轮灌区的施肥需求。但较大的配肥盘料仓容积有 2 个缺点: ①无法实现更加精确的配肥, 如 500 g 整数倍配肥就没有以 100 g 整数倍配肥的精确度高。②活塞密封施肥罐时, 活塞头进入施肥罐占用水的体积为 380.1 mL, 使得单次配肥所占用水量增加。

#### 2.1.1 试验设计

通过研究尿素添加量与溶液体积增加量之间的关系确定配肥盘料仓最大容积规格, 设计不同质量尿素溶于水中体积增加量的试验。试验设计尿素量与溶剂(水)2 个因素, 尿素量设置 6 个水平, 分别为 100、200、300、400、500、600 g; 溶剂(水)设置 3 个水平, 分别为 1 000、1 500、2 000 mL, 水温  $10.6^\circ\text{C}$  (模拟滴灌首部灌溉水温度)。完全随机区组设计, 重复 3 次。试验结果如表 1 所示。

表 1 配肥量与溶液体积增加量

Tab. 1 Quantity of distributed fertilizer and volume of solution

配肥量 /g	溶液体积增加量/mL		
	溶剂体积 (1 000 mL)	溶剂体积 (1 500 mL)	溶剂体积 (2 000 mL)
100	74.5	73.8	72.3
200	148.2	148.9	146.5
300	225.9	227.3	224.8
400	296.4	294.9	293.5
500	366.2	362.8	363.9
600	440.5	438.9	438.5

#### 2.1.2 试验结论

配肥量与溶液体积增加量方差分析结果表明, 尿素溶液体积增加量与尿素质量呈正比例关系, 并且在同一尿素投入量条件下, 不同溶剂体积之间的溶液体积增加量差异性不显著, 说明尿素溶液的体

积增加主要是由尿素投入量决定的,而与溶剂体积无关。当配肥量为 600 g 时,溶液体积增加量大于活塞所占施肥灌的体积,故该装置配肥盘最大整数规格为 500 g。

## 2.2 装置单次施肥时间研究

### 2.2.1 不同配肥量的溶解时间试验设计

通过不同规格配肥盘分别施入 100、200、300、400、500 g 5 个水平的尿素,确保施肥罐内压力恒定在 0.05 MPa,水温为 10.6 °C,在逆止阀末端安装 WS3051B-ND 型尿素溶液浓度计,测定尿素溶液浓度。测量标准为:从活塞密闭,电磁阀开启,WS3051B-ND 型尿素溶液浓度计显示尿素浓度低于 2% 时记录注肥时长(尿素溶液浓度计监测管道内尿素溶液浓度低于 2% 为衡量固态尿素已溶解为标准),试验重复 3 次,取平均值,结果如表 2 所示。

表 2 配肥量与注肥时长对照表

Tab. 2 Comparison of distributed fertilizer quantity and fertilizing time

序号	配肥量/g	注肥时长/s
1	100	15.4
2	200	16.6
3	300	18.4
4	400	22.1
5	500	29.2

### 2.2.2 试验结论

由表 2 可知,单次配肥 100 g 时,尿素在施肥罐内经过 15.4 s 可以溶解并进入滴灌首部;尿素溶解时间随添加量的增加而延长,配肥量与尿素溶解时间之间呈二次关系: $y = 0.0001x^2 - 0.0256x + 17.26$  ( $R^2 = 0.9937$ )。该式为确定不同规格配肥量条件下的最短注肥时间提供了理论依据。

### 2.2.3 装置单次配肥固定用时计算

该装置单次施肥时间由 4 个环节组成:①步进电动机驱动配肥盘从装料口旋转 180° 到下料口所用时间  $T_1$ 。②直线电动机驱动活塞下降密封施肥罐所用时间  $T_2$ 。③根据不同配肥量的不同注肥时间  $T_3$ 。④直线电动机驱动活塞上升至起始位置所用时间  $T_4$ 。单次配肥 4 个环节中第 1、2 环节与第 4 个环节所用的时间是固定的。

$$T_0 = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1)$$

通过计算可得,装置单次配肥固定用时  $T_0$  为 18.6 s。

### 2.2.4 不同料仓规格条件下单次施肥时间计算

装置单次配肥所用时间为单次配肥固定用时与注肥时间之和。结合表 2 可计算出不同料仓规格条件下单次施肥时间(表 3)。

装置单次施肥时间为

$$T = T_0 + T_i \quad (2)$$

式中  $T$ ——装置单次施肥时间

$T_i$ ——不同配肥量注肥用时

表 3 不同料仓规格单次施肥时间

Tab. 3 Single fertilizing time of different silos

序号	配肥量/g	注肥时间/s	固定时间/s	单次施肥时间/s
1	100	15.4	18.6	34.0
2	200	16.6	18.6	35.2
3	300	18.4	18.6	37.0
4	400	22.1	18.6	40.7
5	500	29.2	18.6	47.8

## 2.3 配肥盘单位时间配肥量分析

不同配肥盘配肥量除以相对应的配肥盘施肥时间可得不同配肥盘在单位时间内的施氮量。如表 4 所示。

表 4 配肥盘单位时间施氮量

Tab. 4 Nitrogen application rate of fertilization disc

序号	配肥量/g	单次施肥时间/s	单位时间施氮量/(g·s <sup>-1</sup> )
1	100	34.0	2.94
2	200	35.2	5.68
3	300	37.0	8.11
4	400	40.7	9.83
5	500	47.8	10.46

根据以上分析可知,若配肥盘在单位时间内的施氮量大于等于滴灌棉田单位时间需氮量时,此规格的配肥盘就可以完成该施肥任务。

## 3 滴灌棉田单位时间施氮量

通过轮灌区面积、棉花不同生育时期最佳经济施氮量和单次灌水延续时间可计算出滴灌棉田单位时间施氮量。

### 3.1 滴灌棉田施氮量

#### 3.1.1 试验设计

试验于 2011—2013 年在新疆石河子大学农学院试验站进行,土壤质地为壤土,其中砂粒 41.52%,粘粒 21.56%,粉粒 36.92%,pH 值为 7.5,有机质质量比 17.82 g/kg,全氮质量比 1.06 g/kg,碱解氮质量比 52.38 mg/kg,速效磷质量比 25.88 mg/kg,速效钾质量比 186 mg/kg,供试棉花品种为新陆早 48 号。试验设置 5 个 N 素水平 0、135、270、305、440 kg/hm<sup>2</sup> (分别用 N0、N1、N2、N3 和 N4 表示)。播前施三料磷肥 245 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾 245 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥以尿素施入,30% 作为基肥播前施入,70% 作追肥在棉花生长期间随水滴施。其他农事管理均按大田膜下滴灌进行操作。

### 3.1.2 测定项目与方法

叶绿素值测定:选择长势均匀的 10 株棉花分别在叶片部位 1、部位 2、部位 3 (图 5) 及不同叶位倒 1、倒 2、倒 3、倒 4 叶测定 SPAD 值。棉花打顶前,采用 SPAD 仪测定功能叶片 SPAD 值(倒 4 叶),打顶后对倒 1 叶进行测定<sup>[9-10]</sup>。



图 5 测定 SPAD 值的叶片部位

Fig. 5 Site of leaf for SPAD measurement

生长状况与产量测定:在棉花各生育阶段对不同处理进行生长状况的观测。各处理选取长势均匀,具有代表性的棉花 14 株(中行、边行各 7 株)定期观测叶片数、株高、果枝数、蕾铃数及蕾铃脱落情况。各处理采取实收记产,3 个重复的平均值代表该处理实际产量水平。

干物质积累量测定:从三叶期开始,每 7 d 采集 5 株植株(隔株采样),洗净,剪去植株的根部,将植株的茎、叶、蕾、铃分开,放入 105℃ 干燥箱中杀青 30 min 后于 80℃ 干燥至恒质量,称量后放入样品袋中保存,集中测定含氮量。

植株含氮量测定:将植物样品粉碎并过 100 目筛,以 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消化,在 BUCHI-350 型全自动定氮仪上测定含氮量。

叶绿素化学测定采用丙酮-乙醇法测定。

数据处理和统计分析用 SPSS 11 进行。

### 3.1.3 棉田最佳经济产量确定

在滴灌棉田不同氮肥条件下,棉花产量以常规氮肥处理最高,用一元二次方程对棉花全生育期不同施氮量总的氮肥效应进行拟合,得出全生育期总施氮量与棉花产量的相关关系(图 6)。对图 6 中关系式求偏导,得到最高产量为 7 182.11 kg/hm<sup>2</sup>,对

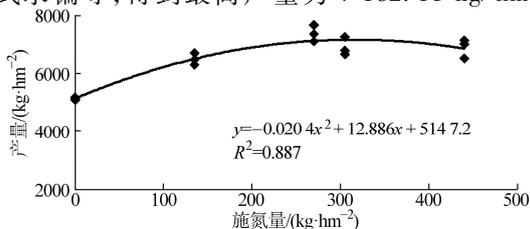


图 6 全生育期总施氮量与棉花产量相关关系

Fig. 6 Correlation of total nitrogen and yield of cotton

应的施氮量为 315.83 kg/hm<sup>2</sup>。315.83 kg/hm<sup>2</sup> 为全生育期总施氮量,可作为追氮总量的参考。

当边际产量等于尿素与棉花的单价比时,边际利润等于零,单位面积的施肥利润最大,此时的施氮量为最佳经济施氮量<sup>[11]</sup>,尿素单价  $P_x = 2.0$  元/kg,籽棉单价  $P_y = 7.5$  元/kg。

本试验产量与施氮量的拟合关系式为

$$y = -0.0204x^2 + 12.886x + 5147.2 \quad (3)$$

对式(3)求导得,  $12.886 + 2 \times (-0.0204)x_1 = P_x/P_y$  时获得最佳经济施氮量。式中  $x_1$  为最佳经济施氮量。计算得最佳经济施氮量为 223.92 kg/hm<sup>2</sup>,按尿素含氮量 46% 换算为棉花全生育期总施肥量为 486.78 kg/hm<sup>2</sup>,其对应的最佳产量为 7 009.77 kg/hm<sup>2</sup>。

表 5 棉田施氮量经济效益

Tab. 5 Economic analysis of nitrogen application rate for cotton

处理	增产/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	增加收入/ (元·hm <sup>-2</sup> )	肥料增 加投入/ (元·hm <sup>-2</sup> )	增加劳 务费/ (元·hm <sup>-2</sup> )	净利润/ (元·hm <sup>-2</sup> )
N0					
N1	1 365.25	10 922.00	586.96	3 413.13	6 921.92
N2	2 253.25	18 026.00	1 173.91	5 633.13	11 218.97
N3	1 766.20	14 129.60	1 326.09	4 415.50	8 388.01
N4	1 763.45	14 107.60	1 913.04	4 408.63	7 785.94

从表 5 中可以看出尽管氮肥的施用导致肥料成本增加,棉花产量的提高导致收获时劳务成本增加,但氮肥施用后棉花生产的净利润也有所提高,并且在 N2 处理下净利润最高,为 11 218.97 元/hm<sup>2</sup>,说明合理的增施氮肥是增产、增收的好措施。

### 3.1.4 棉田不同生育期最佳施氮量研究

采用不同生育期的 SPAD 值与棉田产量拟合估算出的最高产量,推算出最适 SPAD 值和临界 SPAD 值。根据不同生育期 SPAD-产量关系函数,分别确定 4 个生育期的最适 SPAD 值、最佳施氮量、临界 SPAD 值和最高产量<sup>[12]</sup>。结果如表 6 所示。

表 6 棉花不同生育时期最佳施氮量

Tab. 6 Optimum nitrogen application rate of cotton at different growth stages

生育期	最高产量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )	最适 SPAD 值	最佳施氮量 /(kg·hm <sup>-2</sup> )
盛蕾期	7 251.27	60.75	63.03
花期	7 122.98	62.56	64.19
盛花期	7 220.23	61.97	60.09
铃期	7 178.43	59.68	62.84

从表 6 可以看出盛蕾期、花期、盛花期、铃期最佳施氮量为 63.03、64.19、60.09、62.84 kg/hm<sup>2</sup>。通过 4 次随水滴灌施入棉田<sup>[13]</sup>。

### 3.2 滴灌棉田毛灌水定额计算

最大净灌水定额<sup>[14]</sup>为

$$m_{\max} = \frac{0.1\gamma ZP\Delta\theta}{\eta} \quad (4)$$

式中  $\gamma$ ——土壤容重,取  $\gamma = 1.42 \text{ g/cm}^3$

$Z$ ——设计湿润深度,取  $Z = 0.6 \text{ m}$

$P$ ——土壤湿润比,取  $P = 60\%$

$\Delta\theta$ ——土壤含水率上下限差,取  $\Delta\theta = 0.75$

$\eta$ ——设计灌溉水利用系数, $\eta = 0.9$ <sup>[15]</sup>

经计算,最大净灌水定额  $m_{\max} = 42.6 \text{ mm}$ 。

毛灌水定额计算公式为  $m_p = m_{\max}/\eta$ ,计算得棉花毛灌水定额  $m_p = 47.3 \text{ mm}$ 。

### 3.3 滴灌棉田一次灌水延续时间分析

单次灌水时间  $t$  表示为<sup>[16]</sup>

$$t = \frac{m_p L_e L}{q_d} \quad (5)$$

式中  $t$ ——幅宽为  $0.7 \text{ m}$  时一次灌水延续时间

$L_e$ ——幅宽,常规滴灌棉田取  $L_e = 0.7 \text{ m}$

$L$ ——滴头间距, $L = 0.3 \text{ m}$

$q_d$ ——滴头流量,取  $0.8 \sim 3.5 \text{ L/h}$

$m_p$ ——毛灌水定额,取  $47.3 \text{ mm}$

由式(5)可知,滴灌棉田单次灌水时间的长短主要取决于滴头流量  $q_d$ ,当使用小流量滴灌带,滴头流量为  $0.8 \text{ L/h}$  时,滴灌棉田单次灌水时间最长为  $12.42 \text{ h}$ ;当使用常规高流量滴灌带,滴头流量为  $3.5 \text{ L/h}$  时,滴灌棉田单次灌水时间最短为  $2.84 \text{ h}$ 。

### 3.4 轮灌区面积分析

为保证滴灌时滴灌带在恒压状态下正常运行,故根据首部单井出水量情况来计算轮灌区大小。轮灌区内采用传统的1膜3管6行,膜宽  $2.05 \text{ m}$ ,按种植模式  $66 \text{ cm}$  棉花宽幅 +  $10 \text{ cm}$  棉花行距进行排布。轮灌区面积计算式

$$A = \frac{QL(L_m + L_s)}{Snq_d} \quad (6)$$

式中  $A$ ——轮灌区面积,  $\text{hm}^2$

$Q$ ——单井出水量,  $\text{m}^3/\text{h}$

$S$ ——土地面积,取  $10\,000 \text{ m}^2$

$L_m$ ——1膜3行滴灌带排布的膜宽,取  $2.2 \text{ m}$

$L_s$ ——1膜3行滴灌带排布的膜间距,取  $0.5 \text{ m}$

$n$ ——膜下滴灌带条数,取  $3$

通过调研得出,新疆生产建设兵团灌溉农业区域用于灌溉的水泵由于地下水水位的影响,单井出水量  $Q$  在  $180 \sim 250 \text{ m}^3/\text{h}$  之间。

由式(6)可知,单井出水量越大滴头流量越小,轮灌区面积就越大,反之越小。当单井出水量

取  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ,滴头流量取  $0.8 \text{ L/h}$  时计算的最大轮灌区面积为  $8.44 \text{ hm}^2$ ;单井出水量取  $180 \text{ m}^3/\text{h}$ ,滴头流量取  $3.5 \text{ L/h}$  时计算的最小轮灌区面积为  $1.39 \text{ hm}^2$ 。

### 3.5 轮灌区一次灌水时总施氮量计算

滴灌棉花在生长过程中主要在蕾期、花期、盛花期与铃期4个环节追施氮肥。各生育时期的最佳尿素施用量可通过3.1节得到,即蕾期  $63.03 \text{ kg/hm}^2$ 、花期  $64.19 \text{ kg/hm}^2$ 、盛花期  $60.09 \text{ kg/hm}^2$ 、铃期  $62.84 \text{ kg/hm}^2$ 。

由3.4节计算得最大轮灌区面积为  $8.44 \text{ hm}^2$ ,最小轮灌区面积为  $1.39 \text{ hm}^2$ 。由此计算棉花特定生育期的总施氮量

$$N = AN_d \quad (7)$$

式中  $N$ ——棉花特定生育期的总施氮量,  $\text{kg/hm}^2$

$N_d$ ——棉花特定生育期的施氮量,  $\text{kg/hm}^2$

因此,轮灌区面积取最大值  $8.44 \text{ hm}^2$ ,滴灌棉花花期追施尿素  $64.19 \text{ kg/hm}^2$  时,即为该装置单次施肥所要配入的最大尿素量为  $541.76 \text{ kg}$ ;轮灌区面积取最小值  $1.39 \text{ hm}^2$ ,滴灌棉花盛花期追施尿素  $60.09 \text{ kg/hm}^2$  时,即为该装置单次配入的最小尿素量,为  $83.53 \text{ kg}$ 。

### 3.6 滴灌棉田单位时间施氮量计算

已知棉花特定生育期的总施氮量  $N$ ,灌溉期一次灌水延续时间  $t$ ,则棉田单位时间施肥量为

$$F = \frac{1\,000N}{3\,600t} \quad (8)$$

式中  $F$ ——棉田单位时间施肥量,  $\text{g/s}$ 。

根据式(4)~(7)可得滴灌棉田单位时间施氮量完整计算式为

$$F = \frac{1\,000QL(L_m + L_s)N_d}{3\,600Sm_p nL_e L} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,滴灌棉田单位时间施肥量与滴灌带滴头流量大小无关。在常规滴灌棉田中滴头间距  $L$ 、地膜宽度  $L_m$ 、膜间距  $L_s$ 、土地面积  $S$ 、滴灌带条数  $n$ 、滴灌棉田最大净灌水定额  $m_{\max}$ 、相邻两条滴灌带之间的宽幅  $L_e$  都是一定的,滴灌棉田单位时间施氮量只与单井出水量  $Q$  和棉花特定生育期的施氮量  $N_d$  决定。通过对单井出水量设置4个不同梯度,可从表7中得出滴灌棉田单位时间施氮量的变化情况。

从表7中可知,随着单井出水量  $Q$  的增大,单位时间施氮量  $F$  也在增大。

## 4 配肥盘配肥能力

通过对配肥盘单位时间施氮量与滴灌棉田单位

表 7 滴灌棉田单位时间施氮量

Tab.7 Nitrogen application rate per unit time of drip irrigated cotton

序号	单井出水量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	生育期	施肥量 $N_d$ $/(kg \cdot hm^{-2})$	单位时间施 氮量 $F/(g \cdot s^{-1})$
1	180	盛蕾期	63.03	8.57
		花期	64.19	8.72
		盛花期	60.09	8.17
		铃期	62.84	8.54
		盛蕾期	63.03	9.52
2	200	花期	64.19	9.69
		盛花期	60.09	9.07
		铃期	62.84	9.49
		盛蕾期	63.03	10.47
3	220	花期	64.19	10.66
		盛花期	60.09	9.98
		铃期	62.84	10.44
		盛蕾期	63.03	11.90
4	250	花期	64.19	12.12
		盛花期	60.09	11.34
		铃期	62.84	11.86

时间需氮量进行对比,可以获得不同规格配肥盘配肥能力上限值,见表 8。从表 8 可看出,规格为 100、200、300 g 的配肥盘无法满足滴灌棉田施氮需要,规格为 400 g 与 500 g 的配肥盘在棉花特定生育期灌溉施肥时也需要根据当地轮灌区单井出水量的大小来确定是否满足施氮肥需求。例如在盛花期一次灌水施肥时,若单井出水量超过 216.65 m<sup>3</sup>/h 时,装置就不能满足棉花在该生育期的施氮需要。

## 5 结论

(1) 单次配肥时间主要由尿素溶解时间决定,

表 8 不同规格配肥盘配肥能力上限

Tab.8 Maximum urea distribution amount for fertilization disk

序号	生育期	配肥量/g	单井出水量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	结论
1	盛蕾期	100	—	—
		200	—	—
		300	—	—
		400	206.55	$f = F$
		500	219.78	$f = F$
2	花期	100	—	—
		200	—	—
		300	—	—
		400	202.81	$f = F$
		500	215.81	$f = F$
3	盛花期	100	—	—
		200	—	—
		300	—	—
		400	216.65	$f = F$
		500	230.54	$f = F$
4	铃期	100	—	—
		200	—	—
		300	—	—
		400	207.17	$f = F$
		500	220.45	$f = F$

注:  $f$  为配肥盘单位时间施氮量。

在施肥罐内压力为 0.05 MPa、水温 10.6℃,并用 100 目过滤网防止尿素直接冲入滴灌管道情况下,装置配肥量与尿素溶解时间之间呈二次函数关系。

(2) 建立了基于 SPAD 值的膜下滴灌棉田在盛蕾期、花期、盛花期、铃期 4 个主要生育期的氮肥追施模型,确定了这 4 个生育期的最佳施氮量分别为 63.03、64.19、60.09、62.84 kg/hm<sup>2</sup>。

(3) 单位时间施氮量与滴头流量  $q_d$  无关,仅与单井出水量  $Q$  和棉花特定生育期的施氮量  $N_d$  有关。

## 参 考 文 献

- Moreira Barradas J M, Matula S, Dolezal F. A decision support system-fertigation simulator (DSS-FS) for design and optimization of sprinkler and drip irrigation systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 86: 111 - 119.
- Mohd Salih J E, Adom A H, Md Shaakaf A Y. Solar powered automated fertigation control system for *cucumis Melo* L. cultivation in green house[J]. APCBEE Procedia ICAAA 2012, 2012, 4: 79 - 87.
- 邵利敏, 王秀, 牛晓颖, 等. 基于 PLC 的变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 84 - 87. Shao Limin, Wang Xiu, Niu Xiaoying, et al. Design and experiment on PLC control system of variable rate fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 84 - 87. (in Chinese)
- 陈剑, 吕新. 滴灌棉田压差式施肥罐注肥均匀度研究与分析[J]. 节水灌溉, 2011(1): 62 - 64. Chen Jian, Lü Xin. Study on fertilization uniformity of pressure differential tank in drip irrigation cotton field[J]. Water Saving Irrigation, 2011(1): 62 - 64. (in Chinese)
- 徐万里, 汤明尧, 马正强, 等. 新疆绿洲棉花种植体系土壤氨挥发损失原位监测[J]. 西北农业学报, 2011, 20(9): 197 - 201. Xu Wanli, Tang Mingyao, Ma Zhengqiang, et al. In situ monitoring of the losing of ammonia volatilization from soil in Xinjiang oasis cotton cropping systems[J]. Northwest Agricultural Sciences, 2011, 20(9): 197 - 201. (in Chinese)
- 申孝军. 棉花滴灌节水机理与优质高效灌溉模式[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011. Shen Xiaojun. Water-saving mechanism and optimal irrigation pattern for effective water use and high-quality of cotton under drip irrigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)

- 7 石河子大学. 一种应用在滴灌上的精量控制施肥肥装置: 中国, ZL201220219942.5 [P]. 2013-01-16. Shihezi University. An application for precision control of drip fertilization fertilizer equipment: China, ZL201220219942.5 [P]. 2013-01-16. (in Chinese)
- 8 石河子大学. 一种活塞密封式滴灌施肥罐: 中国, ZL201220290280.0 [P]. 2013-01-16. Shihezi University. A kind of piston sealed cans fertigation: China, ZL201220290280.0 [P]. 2013-01-16. (in Chinese)
- 9 陈宝燕, 马兴旺, 杨涛, 等. 棉花生育时期 SPAD 值准确性与样本数的关系 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4748-4755. Chen Baoyan, Ma Xingwang, Yang Tao, et al. Research on the relationship between the accuracy of SPAD value and sample number in growing period of cotton [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(22): 4748-4755. (in Chinese)
- 10 屈卫群, 王绍华, 陈兵林, 等. 棉花主茎叶 SPAD 值与氮素营养诊断研究 [J]. 作物学报, 2007, 33(6): 1010-1017. Qu Weiqun, Wang Shaohua, Chen Binglin, et al. SPAD value of cotton leaves on main stem and nitrogen diagnosis for cotton growth [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(6): 1010-1017. (in Chinese)
- 11 关宁. 多元肥料效应函数模型研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2012. Guan Ning. Study on multi-function model fertilizer effect [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 12 潘薇薇, 危常州, 丁琼, 等. 膜下滴灌棉花氮素推荐施肥模型的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 204-210. Pan Weiwei, Wei Changzhou, Ding Qiong, et al. Nitrogenous fertilizer recommendation model for cotton under mulch-drip irrigation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 204-210. (in Chinese)
- 13 王荣栋, 曹连莆, 张旺锋. 作物高产理论与实践 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- 14 SL103—95 微灌工程技术规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- 15 王素霞. 谈大田膜下滴灌系统设计主要参数取值方法 [J]. 黑龙江科技信息, 2009(29): 57-58.
- 16 杨忠国, 邓书辉, 张伟. 膜下滴灌系统设计 [J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 96-99. Yang Zhongguo, Deng Shuhui, Zhang Wei. The design of drip irrigation system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 96-99. (in Chinese)

## Distribution and Application of Urea with Precision Fertilization Device of Drip Irrigation in Cotton Fields

Chen Jian<sup>1</sup> Zhang Ze<sup>1</sup> John A Yunger<sup>2</sup> Lü Xin<sup>1</sup> Tian Min<sup>1</sup> Hou Zhenan<sup>1</sup>

(1. Agricultural College, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Biology Department, Governors State University, Chicago 60466, USA)

**Abstract:** On the basis of SPAD model for nutrition diagnosis of nitrogen fertilization, we determined the optimal nitrogen rate at the different growth stages of cotton with drip irrigation under mulch. Combining with relevant research at a single irrigation time and acreage of round irrigated area, we defined the fertilizer time of different specifications fertilizer disc. The capacity of the device with combined application of nitrogen fertilizer was determined by comparing with distribution and application of combined fertilizer at unit time. The results showed that the rate of fertilization per unit time for the device was related to water yield from any single well and nitrogen fertilizer in the whole cotton growth period, and the device were unable to meet the needs of topdressing when it used fertilizer disc of sizes with 100 g, 200 g and 300 g. Furthermore, fertilizer disc of sizes with 400 g and 500 g could only meet topdressing nitrogen level of cotton under condition of the specific water yield from a single well. And according to our research described above, we explored the approach to optimize and improve device.

**Key words:** Drip irrigation in cotton field Precision fertilization device Distribution of fertilizers  
Nitrogen per unit time