

# 滴灌施肥量对棉花生长、养分吸收及产量的影响

王海东<sup>1</sup>, 张富仓<sup>1</sup>, 吴立峰<sup>1</sup>, 周建伟<sup>2</sup>,  
向友珍<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 方栋平<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 2012年以新陆早33号棉花为供试作物, 利用田间小区试验研究了大田膜下滴灌施肥条件下, 不同滴灌施肥量对棉花植株氮、磷、钾养分的吸收、干物质积累及籽棉产量的影响。设置了5个N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O施肥水平150-60-30、200-80-40、250-100-50、300-120-60 kg·hm<sup>-2</sup>和350-140-70 kg·hm<sup>-2</sup>(分别记为F1、F2、F3、F4和F5), 灌水量为100% ET<sub>c</sub>(作物蒸发蒸腾量)。结果表明: 在新疆膜下滴灌条件下, 棉花干物质积累与氮、磷、钾养分吸收和吸收速率均随着滴灌施肥量的增加呈增大的趋势, 施肥量达到F4时, 棉花的干物质积累和氮、磷、钾的吸收和吸收速率最大; 随着施肥量的增加, 棉花产量有增加的趋势, 但当施肥量大于F3, 棉花产量随施肥量的增加(F3, F4, F5)无显著性差异; F3施肥水平下的氮肥农学效率、磷肥农学效率、钾肥农学效率和肥料偏生产力显著大于F4与F5施肥水平。从节肥和生态可持续发展角度来看, F3施肥水平, 即250-100-50 kg·hm<sup>-2</sup>(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)为最佳滴灌施肥量。

**关键词:** 棉花; 滴灌施肥; 氮磷钾累积量; 干物质质量; 籽棉产量

**中图分类号:** S562.062 **文献标志码:** A

## Dosage effects of dripping fertilization on cotton growth, nutrient uptake and yield

WANG Hai-dong<sup>1</sup>, ZHANG Fu-cang<sup>1</sup>, WU Li-feng<sup>1</sup>, ZHOU Jian-wei<sup>2</sup>,  
XIANG You-zhen<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, FANG Dong-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area, Ministry of

Education, Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water and Soil Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** The cotton species, XinLuzao 33, was tested through field plot experiments at the Water-saving Irrigation Station of Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science in 2012. The effects of fertilization levels were evaluated on the uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium by cotton, dry matter accumulation and yield under mulched drip fertigation. There were five fertilization levels of N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O (150-60-30, 200-80-40, 250-100-50, 300-120-60, 350-140-70 kg·hm<sup>-2</sup>, as F1, F2, F3, F4 and F5, respectively) and the irrigation level was set as 100% ET<sub>c</sub>(the crop evapotranspiration). Results showed that the dry matter accumulation, the uptakes of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O and their uptake rates were elevated with the increase of fertilizer amounts, which reached maximum values at the F4 level. Cotton yield had a tendency to become increased with escalation of fertilizer amount, but there were no significant differences between F3, F4 and F5. The AEN, AEP, AEK and PEP at the F3 level were significantly larger than those at the F4 and F5 levels. In terms of fertilizer saving and ecological sustainable development, the F3 level with N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O of 250-100-50 kg·hm<sup>-2</sup> was suggested be the optimal fertilization application. This study could provide valuable information for improving the management of cotton under mulched drip fertigation in Xinjiang.

**Keywords:** cotton; fertigation; nitrogen; phosphorus and potassium accumulation amount; dry matter; yield

收稿日期: 2014-10-05

基金项目: 国家“十二五”863计划项目课题(2011AA100504); 教育部高等学校创新引智计划项目(B12007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130204110030)

作者简介: 王海东(1988—), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wanghdq@126.com。

通信作者: 张富仓(1962—), 男, 陕西武功人, 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。

新疆位居内陆,是典型的干旱半干旱地区,降雨量较少,日照时间充足,丰富的光热资源使其成为了我国最大的商品棉生产基地。棉花作为我国重要的经济作物,已是农民增收的主要来源之一,更是新疆一个重要的支柱产业,在棉花生长过程中,施肥是影响其产量的一个重要因素,但不合理的施肥特别是过量施肥会造成资源浪费,污染环境,并且导致棉花生长不协调,贪青晚熟,品质和产量下降,在实际生产过程中如何科学合理地施肥已成为促进棉花达到优质、高产的关键性技术因素<sup>[1-4]</sup>。

棉花是一种对水肥比较敏感的经济作物,近些年来,国内的一些专家就滴灌施肥条件下棉花水肥耦合效应做了较多的研究。王海江等<sup>[5]</sup>的膜下滴灌棉花水氮耦合研究表明,在灌水量  $4\ 800\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮肥  $300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  下,棉花的干物质积累、水分利用效率和产量最大。龚江等<sup>[6-7]</sup>的膜下滴灌棉花灌水量、施氮量、密度耦合效应表明,高水、氮条件下棉花干重和产量都有所增加,但收获率有很明显的下降,过多的水肥投入并不利于棉花的增产。冯绍元等<sup>[8]</sup>的膜下滴灌棉花水肥耦合效应结果表明,对于中等肥力的棉田,在每公顷施纯氮  $300\ \text{kg}$  的范围内,随着施肥量增加皮棉产量呈增加的趋势,在每公顷施纯氮  $150 \sim 225\ \text{kg}$  区间内,其产量增加较快。侯振安等<sup>[9]</sup>在盆栽条件下通过应用<sup>15</sup>N 标记研究不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响,提出了在一次灌溉过程中先滴 1/2 时间的肥液,然后再滴 1/2 时间清水的施肥策略可显著促进棉花根系的生长,减少氮肥在土壤中的残留,增加棉花的氮素吸收量,提高氮肥利用率。李培岭等<sup>[10-11]</sup>在甘肃沙漠绿洲地区进行的不同膜下滴灌模式棉花水氮耦合效应,提出了适宜棉花生长和提高水氮利用效率的滴灌模式。在氮肥、磷肥、钾肥配施方面,谭勇等<sup>[12]</sup>认为在新疆阿克苏地区  $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 1:0.71:0.30$  时,并配合 Zn、Mn、B 微肥施用能显著促进棉花的生长发育和提高产量。李祥云等<sup>[13]</sup>在青岛做了对棉花施用不同配比氮磷钾肥的正交试验,结果表明无论是对其生物学性状还是对其单株产量和公顷产量,氮肥都是主要影响因子,影响的效果氮 > 钾 > 磷。

以上研究多偏向于盆栽,大田棉花滴灌水肥耦合效应试验的施肥主要是土施为主,较少研究滴灌施肥条件下棉花施肥量对棉花生长、产量和养分吸收的影响。本论文通过滴灌施肥试验,研究了大田棉花不同氮磷钾施肥量对棉花氮磷钾养分的吸收,干物质质量动态积累以及产量的影响,揭示棉花干物

质积累与产量、养分积累等与施肥量的关系,为棉花养分的高效利用和生产实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2012 年 5—10 月在新疆农垦科学院节水灌溉试验站 ( $44^\circ 20' \text{N}$ ,  $85^\circ 20' \text{E}$ ) 进行,该试验站位于新疆准噶尔盆地南缘石河子市境内,属于温带大陆性干旱气候,年降水量为  $125 \sim 208\ \text{mm}$ ,年蒸发量  $2\ 000\ \text{mm}$  以上,无霜期  $169\ \text{d}$ ,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温为  $3\ 570^\circ\text{C} \sim 3\ 729^\circ\text{C}$ ,地下水埋深在  $15\ \text{m}$  以下。试验区耕作层 ( $0 \sim 30\ \text{cm}$ ) 土壤为砂壤土,土壤容重为  $1.51\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,田间持水量  $32\%$  (体积含水量),土壤有机质  $18\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 值  $7.8$ ,碱解氮  $79.76\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $31.54\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $154.22\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

供试作物为新陆早 33 号,田间采用“干播湿出”方式播种,采取一膜三管六行方式,宽窄行种植,行距按  $20 - 55 - 20 - 55 - 20 - 60\ \text{cm}$  布置,株距为  $10\ \text{cm}$ ,毛管布置在两行作物中间,一条毛管控制 2 行作物。采用大田小区试验,试验设 5 个施肥 ( $\text{N}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ ) 水平,分别用 F1、F2、F3、F4、F5 表示, $\text{N} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{K}_2\text{O}$  比例均为  $1:0.4:0.2$  (见表 1)。滴灌水量按  $100\% ET_c$  计算,蒸发蒸腾量  $ET_c$  根据下式计算<sup>[14]</sup>:

$$ET_c = E_p K_{cp} \quad (1)$$

$$K_{cp} = K_p K_c \quad (2)$$

式中, $E_p$  为实测的大田  $20\ \text{cm}$  蒸发皿 (ADM7 型) 自由水面蒸发量; $K_{cp}$  为棉花不同生育阶段的蒸发皿 - 作物系数,在棉花苗期、现蕾期、开花期、吐絮期分别取  $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.7$ 、 $0.25$ ,降雨时用公式 (1) ~ (3)<sup>[14]</sup> 对蒸发量进行修正,

$$\Delta E_p = 0.4P/K_{cp} - 0.8P \quad (3)$$

式中, $P$  为降雨量 (mm)。

田间试验每两膜为一小区,各处理设置 3 个重复,共 15 个小区,小区长度为  $20\ \text{m}$ ,宽度为  $3.4\ \text{m}$ ,面积为  $68\ \text{m}^2$ 。滴灌施肥试验采用  $16\ \text{mm}$  直径的内镶式薄壁迷宫滴灌带,滴头流量为  $1.8\ \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,滴头间距为  $30\ \text{cm}$ ,每个小区前安置水表和球阀控制灌水量。施肥分 8 次进行,除灌出苗水外,每次在灌水中期随水滴施,每次施肥量 = 总施肥量/8,每次先滴  $1\ \text{h}$  左右清水,然后将施肥球阀关至一半并随水滴施肥料, $2 \sim 3\ \text{h}$  可全部施完,之后再次滴入清水直至各处理达到当次灌水量。施肥采用容量压差式施肥方

式,储存肥料容器为 13 L 的小型施肥罐,每次灌水前一天将固态肥料溶解至水中,所用肥料为尿素、磷酸二氢铵和氯化钾。播种日期为 2012 年 05 月 01 日,收获日期为 2012 年 10 月 25 日。2012 年滴灌水

量为 445 mm,棉花生长季降雨量为 62 mm(见图 1),2012 年棉花生育期为苗期(5 月 9 日—6 月 19 日)、现蕾期(6 月 20 日—7 月 9 日)、开花期(7 月 10 日—9 月 16 日)、吐絮期(9 月 17 日—10 月 10 日)。

表 1 滴灌施肥棉花试验设计方案

Table 1 Experimental design on cotton fertigation

项目 Item	处理 Treatment				
	F1	F2	F3	F4	F5
滴灌施肥量 Fertilization amount N - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - K <sub>2</sub> O /(kg·hm <sup>-2</sup> )	150 - 60 - 30	200 - 80 - 40	250 - 100 - 50	300 - 120 - 60	350 - 140 - 70

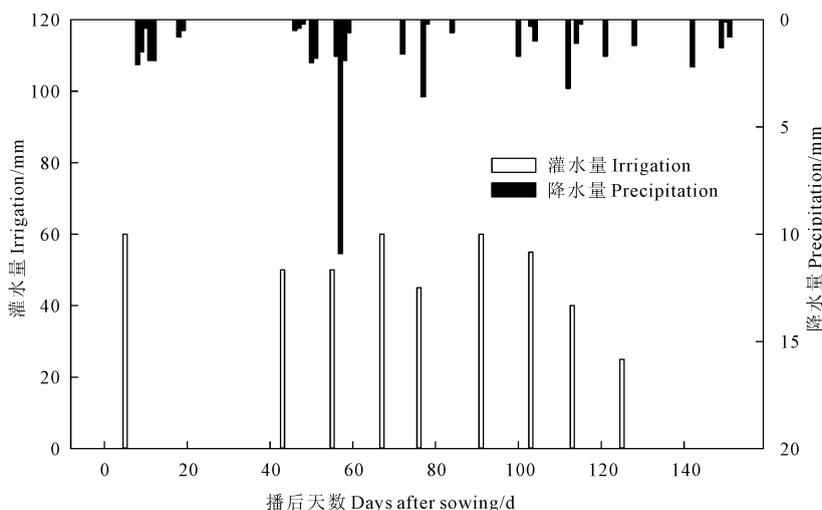


图 1 生育期内灌水量和降雨量分布情况(2012 年)

Fig.1 Irrigation amount and precipitation distribution during the cotton growth period(2012)

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 地上干物质质量 在不同生育期,每个小区随机选取 4 株有代表性棉花,重复 3 次,共计 12 株,将所取植株样棉花从茎基部与地下部分分离,去掉表面的尘土放入烘箱在 105℃ 下杀青 0.5 h,75℃ 烘干至恒质量,之后放入干燥器中冷却,用电子天平称质量。各小区干物质质量为 12 株棉花干物质质量的平均值,最后乘以种植密度换算成群体干物质质量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

1.3.2 植株氮磷钾累积量 茎、叶和蕾铃分别磨碎混匀后过 1 mm 的目筛,称取植物样 0.5 g,用硫酸-过氧化氢消煮,用 FOSS 2300 型凯氏定氮仪测定全氮含量,用钒钼黄吸光光度法测定全磷含量,用火焰分光光度计法测定全钾含量。根据测定结果计算棉花植株氮、磷、钾累积量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

1.3.3 不同生育阶段氮磷钾平均吸收速率 平均吸收速率为相邻两个生育期氮磷钾累积吸收量差值比上此阶段的天数(kg·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)。

1.3.4 籽棉产量 在小区中间 4 行,长度 5 m 区域内分 2 次(9 月 27 日和 10 月 13 日)测定棉花籽棉产量,实收计产。最后换算成群体籽棉产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

1.3.5 收获指数 收获指数(HI)计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$HI = Y / SDM \quad (4)$$

式中,SDM 为地上部干物质质量(kg·hm<sup>-2</sup>);Y 为籽棉产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

1.3.6 施肥农学效率 施肥农学效率(AEN),指单位施肥量(N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O)所增加的籽棉产量,公式<sup>[16]</sup>为:

$$AEN = \frac{Y - Y_0}{F} \quad (5)$$

式中,Y 和 Y<sub>0</sub> 分别为施氮肥和不施氮肥获得的籽棉产量;F 为肥料的投入量(kg)。

1.3.7 肥料偏生产力(Partial factor productivity, PFP) 肥料偏生产力(kg·kg<sup>-1</sup>)计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$PFP = Y / F_T \quad (6)$$

式中,F<sub>T</sub> 为投入的 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 总量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

## 1.4 数据分析

试验数据采用 Excel2010, SPSS18.0, Origin8.0 和 Sigmaplot10.0 等软件进行分析作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥量对棉花不同生育期干物质积累的影响

棉花干物质的积累是产量形成的基础,现蕾期以前气温较低,棉株对养分水分的的需求不强烈,棉株干物质积累比较缓慢。在现蕾期,除 F2 显著低于其他施肥水平以外,其余各处理之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。现蕾期以后,随着棉花对水分养分需求的增加,各处理下棉株的干物质积累量均迅速升高,在收获期达到高峰。其中,在现蕾期至盛花期阶段,干物质积累增长速度最快,在盛花期 F1、F3、F4、F5 之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),但显著高于 F2 水平。在成铃期阶段, F3、F4、F5 之间无显著性差异( $P >$

0.05),但与 F1、F2 之间差异显著( $P < 0.05$ )。在进入吐絮期以后,各处理棉株的干物质积累的增长趋势均逐渐趋于缓慢,各处理之间差异比较显著( $P < 0.05$ )。

从盛花期开始,随着施肥量 F1 到 F5 的增加, F4 施肥水平下棉株的干物质积累量开始显著大于其他施肥水平,收获期干物质最大积累量达到最高,为  $15\ 821\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而 F3 施肥水平仅比 F4 减少了 9.1%。成铃期以后施肥水平 F1 的干物质积累量开始低于其他水平,在收获期干物质积累量最低,比最高干物质积累量减少了 26.67%。在收获期,不同施肥水平下棉株的干物质积累量  $F1 < F2 < F3 < F5 < F4$ ,由此可以看出,施肥量的增加有利于棉花干物质质量的积累,但过高施肥量(F5)其干物质积累有降低趋势。

表 2 施肥量对棉花各生育期干物质质量积累的影响

Table 2 Effects of fertilization levels on dry matter accumulations of cotton at different growth stages

施肥量处理 Fertilization treatments	干物质积累量 Dry matter accumulation/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )				
	现蕾期 Budding	盛花期 Flowering	成铃期 Boll stage	吐絮期 Wadding stage	收获期 Harvest
F1	1866a	7220ab	9388cd	11529f	12393f
F2	1558c	6513cd	9391cd	12783de	13772cd
F3	1708ab	7130ab	9830b	13087cd	14368bc
F4	1872a	7383a	10452ab	14937a	15821a
F5	1835a	7142ab	9997ab	14114b	14918a

注:同列数据后相同字母表示无显著差异( $P > 0.05$ ),下表同。

Note: Values within a column with the same letter indicated no significant difference ( $P > 0.05$ ), and hereinafter.

### 2.2 施肥量对棉花不同生育期氮、磷、钾吸收的影响

不同施肥量对棉花各生育期养分吸收的影响如表 3 所示。在棉花生长发育的整个过程中,各施肥处理条件下棉花氮积累量从现蕾期到收获期逐渐变大,在现蕾期, F3 处理下的氮积累量显著低于其他水平,其余各处理之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。在盛花期、成铃期,各处理之间也无显著性差异( $P > 0.05$ )。而在吐絮期及收获期,由于氮素供给不能满足作物吸收,限制了棉花植株的氮素积累量, F1 处理下的氮积累量显著低于其他处理。从整体来看,进入盛花期以后,施肥水平 F3、F4 与 F5 之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),表明过多的施肥并不能显著促进棉花植株对氮素的吸收。

与氮素积累量类似,棉花磷积累量从现蕾期到收获期也呈现逐渐增大的趋势,在现蕾期,处理 F2、F3、F4、F5 之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),但显著高于 F1 施肥水平。而在盛花期 F2 处理下的磷积累量最小,并与其余处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。在

成铃期 F4 处理下的磷积累量最大,为  $52.7\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与之比较, F1、F2、F3、F5 处理下的磷积累量分别降低了 20%、19%、6.6%、14.7%,处理 F1、F2、F5 之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。在吐絮期及收获期, F1 与 F2 处理之间差异不明显( $P > 0.05$ ),但均与其余处理之间差异显著,且 F3、F4、F5 处理之间差异不明显( $P > 0.05$ )。在棉花的生育后期,磷素积累量的增加有利于减少棉铃的脱落,增强棉株抵抗病虫害的能力,保证了棉花的产量。

棉花是喜钾作物,钾的不断累积有利于提高棉花的抗寒、抗病性,并防止其早衰。钾积累量从现蕾期到吐絮期逐渐增大,其中盛花期对于钾肥的吸收量最大,而在收获期其变化趋势不统一,其中 F1、F3、F4 处理下的钾积累量较吐絮期降低了 2.2%、1.3%、2.3%,而 F2 与 F5 处理则增加了 6.7%、1.0%。在现蕾期,各处理之间钾积累量无显著性差异( $P > 0.05$ )。在盛花期, F1 与 F2 处理之间差异不明显,但均与其余处理之间差异显著,且 F3、F4、F5

处理之间差异不明显 ( $P > 0.05$ )。成铃期, F3 处理下的钾累积量最大, 为  $277.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而在吐絮期, F4 处理下的累积量最大, 为  $326.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 且相互之间无显著差异。在收获期, F4 处理下的累积量最

大, 为  $319.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 并与 F3、F5 处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。F1 处理下的累积量最小, 为  $251.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , F2 处理次之。

表 3 施肥量对不同生育期棉花氮磷钾吸收的影响/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$

Table 3 Effects of fertilization levels on uptakes of N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{K}_2\text{O}$  in cotton during different growth periods

肥料种类 Fertilization	施肥量 Fertilization amount	现蕾期 Budding	盛花期 Flowering	成铃期 Boll stage	吐絮期 Wadding stage	收获期 Harvest
N	F1	55.9ab	116.4a	168.9a	187.3b	210.1bc
	F2	55.4abc	117.6a	185.3a	210.0ab	237.3a
	F3	52cd	121.3a	192.4a	216.8a	239.1a
	F4	56.8a	122.1a	196.7a	224.1a	254.4a
	F5	56.8a	128.4a	197a	231.2a	251.1a
$\text{P}_2\text{O}_5$	F1	21.9b	36.2a	42.4c	50.2b	55.6b
	F2	25.4a	33.5b	42.7c	51.2b	54.4b
	F3	25.6a	35.8a	49.2b	57.1a	62.7a
	F4	26.4a	38.5a	52.7a	58.5a	65.3a
	F5	24.6a	38.3a	44.9c	58.8a	61.3a
$\text{K}_2\text{O}$	F1	83.2ab	183.9b	249.4b	257.4b	251.7c
	F2	81.9ab	189.1b	251.1b	261.2b	278.7b
	F3	78.0b	203.2a	277.7a	305.1a	301.2a
	F4	83.0ab	201.4a	267.1a	326.8a	319.1a
	F5	92.1a	222.7a	258.0b	298.7ab	301.7a

### 2.3 不同施肥量对棉花各生育阶段氮、磷、钾吸收速率的影响

由图 2 可知, 在整个生育期内, 棉株对氮、磷、钾的平均吸收速率呈现慢-快-慢的增长规律。现蕾期以前氮素的吸收以营养生长为主, 吸收速率比较小, 各处理之间差异不显著。现蕾期至成铃期, 棉株地下根系与地上部分不断增大, 对养分的吸收能力不断增强, 使得氮素累积量在棉株体内快速增长, 尤其在盛花期至成铃期阶段增速趋势显著, 各处理吸收速率均达到高峰, 并且表现为  $F4 > F3 > F5 > F2 > F1$ , 各处理之间差异显著, F1 水平下的吸收速率明显低于其他水平, 同时亦表明此阶段是棉花需氮的关键时期, 应注重氮素供给。成铃期以后氮素吸收速率开始逐渐减弱, 各处理之间差异不明显。

磷素的平均吸收速率明显低于氮素的吸收速率, 但与氮素吸收类似, 在盛花期至成铃期阶段, 吸收速率达到高峰, 并且各处理之间差异显著, F3、F4 水平明显高于其他水平。

棉株对钾的吸收速率在现蕾期以前各处理之间无显著性差异, 但在现蕾期至盛花期阶段的吸收速率明显高于氮和磷, 亦在盛花期至成铃期阶段达到

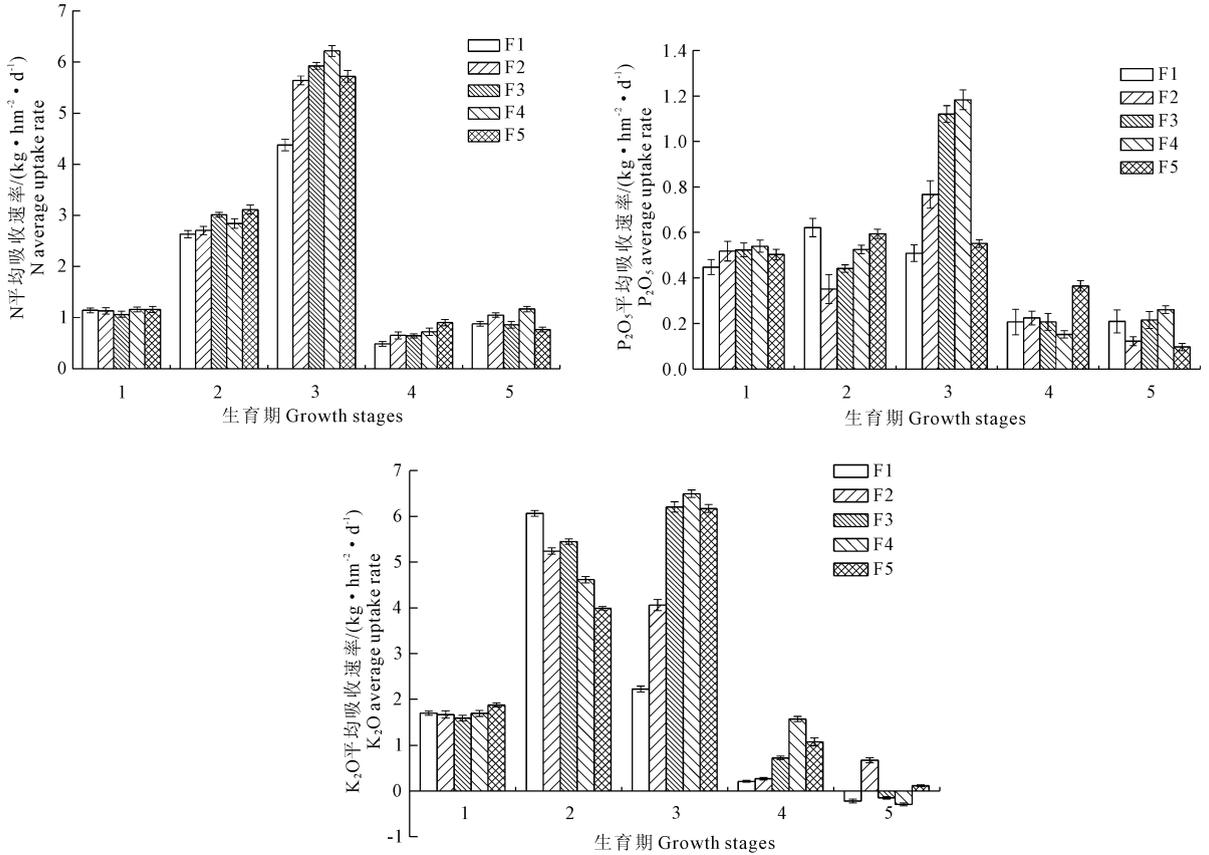
顶峰, 在此阶段各处理之间存在显著性差异。此后植株对钾的吸收速率逐渐降低, 甚至随着后期叶片的脱落, 有所下降。

在棉株生长的关键时期(盛花期至成铃期), F4 水平下的棉株对氮、磷、钾的吸收速率均最高, 但与 F3 相比差异不明显。施肥量过多或者过少都限制养分的吸收速度。因此合理的施肥将有助于棉花的养分吸收, 从而达到高产。

### 2.4 不同滴灌施肥量对棉花籽棉产量、收获指数、肥料吸收利用的影响

分析不同施肥水平对棉花产量的影响(表 4), 可以得出棉花产量随着施肥量的增加而增加, 当施肥量增加到 F3 水平, 继续增加施肥量其增产效果不明显, 其中, F1 施肥水平下, 产量最低, 为  $5306 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与之相比, F2、F3、F4、F5 水平下的棉花产量分别增加了 6.13%、10.18%、11.12%、11.03%, 且在 F3、F4、F5 施肥条件下产量之间无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), F3 施肥水平下籽棉产量为  $5846 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , F4 施肥水平比其仅增大了 0.85%, 产量达到最高, 而 F5 施肥水平下的产量则比 F4 略有减少。表明适量增加施肥量对产量提高有明显的促进作用。

用,过多施肥则对产量提高无显著影响,甚至产生不利影响。



注:1:播种期~现蕾期;2:现蕾期~盛花期;3:盛花期~成铃期;4:成铃期~吐絮期;5:吐絮期~收获期  
 Note: 1: Sowing ~ budding; 2: Budding ~ flowering; 3: Flowering ~ boll stage; 4: Boll stage ~ wadding; 5: Wadding ~ harvest

图2 棉花各生育阶段氮、磷、钾平均吸收速率

Fig.2 N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O average uptake rates at different growth stages

表4 不同施肥量对籽棉产量、收获指数、氮磷钾肥农学效率及肥料偏生产力的影响

Table 4 Effects of fertilization levels on cotton yield, HI, AEN, AEP, AEK and PFP under fertigation

施肥量处理 Fertilization treatments	籽棉产量 Seed cotton yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数 HI	氮肥农学效率 AEN /(kg·kg <sup>-1</sup> )	磷肥农学效率 AEP /(kg·kg <sup>-1</sup> )	钾肥农学效率 AEK /(kg·kg <sup>-1</sup> )	肥料偏生产力 PFP /(kg·kg <sup>-1</sup> )
F1	5306c	0.43a	11.96a	29.90a	59.80a	22.11a
F2	5631b	0.41b	10.60ab	26.49b	52.98b	17.60b
F3	5846a	0.41b	9.34b	23.34c	46.68c	14.62c
F4	5896a	0.37c	7.95cd	19.87d	39.73d	12.28d
F5	5891a	0.40b	6.80e	16.99e	33.99e	10.52e

注 Note: HI - Harvest index; AEN - Agronomic efficiency of applied N; AEP - Agronomic efficiency of applied P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; AEK - Agronomic efficiency of applied K<sub>2</sub>O; PFP - Partial factor productivity.

收获指数(HI)随着施肥量的增加先减小后增大,F2、F3、F5水平之间差异不显著( $P > 0.05$ ),F4水平由于在产量相似情况下干物质累积量远大于其他水平,故其收获指数最小,与其他处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。肥料偏生产力(PFP)是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标。PFP与氮、磷、钾肥的农学效率均随着施肥量的增加呈现递减趋势,各处理之间PFP存在显著性差异( $P$

$< 0.05$ ),F5水平下最低。表明过多施肥不仅不能提高棉花的产量,还造成了肥料的浪费。

### 3 讨论与结论

施肥量是影响棉花干物质积累与产量的重要因素,增加氮肥施入量可以提高棉花的干物质质量,氮肥施入量过大容易造成棉花干物质质量和产量降低<sup>[18]</sup>。从整个生育期来看,干物质累积速率呈现慢-快-

慢的积累规律,快速生长阶段干物质累积量约占全生育期累积量的 57%<sup>[19]</sup>。而本研究也得出相似结果,不同施肥水平下各处理棉株在现蕾期以前干物质积累较慢,播种后第 50~85 天(现蕾期至成铃期),棉株生长旺盛,干物质快速累积约占 56%,此时也是产量形成的关键时期,所以该阶段应特别注重追肥配比。而且施肥量达到一定水平(F4 施肥水平),会抑制其发育,进而造成干物质累积量下降。

研究表明,棉花氮、磷、钾养分的吸收与干物质积累的趋势一致,棉株对养分吸收的快增期出现在出苗后 58~97 d,此期吸收了约养分总量的 60%,是需肥量最大的时期<sup>[20]</sup>。大量研究也证实了作物含氮量与干物质积累呈线性正相关性<sup>[21]</sup>。本研究表明,棉花养分吸收量的顺序表现为钾>氮>磷,平均吸收速率亦呈现慢-快-慢趋势,现蕾期以前由于棉株根系不发达,气温低,氮、磷、钾平均吸收速率缓慢,现蕾期以后棉株对养分的吸收显著增强,但吐絮期以后由于根系的老化,叶片脱落引发光合作用的下降,气温降低等因素,养分吸收速率逐渐变慢,这与前人的研究一致。

Fritsch<sup>[22]</sup>认为,当营养生长和生殖生长部分增长非常均衡的条件下,在最高施氮量条件下可以获得最高的氮肥利用效率,反之,过量施氮会打破营养生长与生殖生长的平衡,进而导致营养生长过于旺盛,推迟棉花成熟并且降低棉花产量。李培岭<sup>[23]</sup>认为当大量氮素和灌水量都用在了营养生长需求,会导致营养生长与生殖生长不协调,表现为氮肥农学利用效率随施氮量增加呈显著下降趋势,且各种灌水水平下均如此。本试验得出肥料偏生产力、氮肥农学效率、磷肥农学效率、钾肥农学效率随施肥量升高而降低。

高产虽然是以高生物量为基础,增施氮肥可以提高棉花的生物量,但氮肥施用过多会造成棉花营养生长过旺,导致产量降低<sup>[24]</sup>。谢志良<sup>[25]</sup>等研究表明,高氮会导致棉花提早衰退,限制干物质在花铃期至吐絮期的积累,从而导致产量下降。本研究亦发现,在同样灌水量条件下,施肥量最少的水平下棉花养分和干物质累积总量亦最少,不利于产量的形成,籽棉产量仅有 5 306 kg·hm<sup>-2</sup>。而高施肥量也不能使棉株获得较高的养分积累,施肥量过多不仅没被吸收,而且造成土壤淋溶,污染环境。增强棉株吸收养分的能力与合理的施肥量有利于产量的提高。

邓忠<sup>[26]</sup>等在南疆进行的大田棉花膜下滴灌条件下水氮耦合效应研究表明,不同灌水量下,施氮量为 300 kg·hm<sup>-2</sup>时,棉花生长健壮,株型结构优化,显

著促进了干物质向生殖器官的运转,有效铃数、单铃质量和衣分增加,此时产量达到最高。周立平<sup>[27]</sup>等在北疆雨水较少地区开展了不同水氮条件对棉花产量效应的大田试验研究,得出获得最高籽棉产量 5 253 kg·hm<sup>-2</sup>的灌水量为 4 190 m<sup>2</sup>·hm<sup>-2</sup>,施氮量为 276 kg·hm<sup>-2</sup>。本研究的最佳施氮量为 250 kg·hm<sup>-2</sup>,较前人略小,这可能与采取不同的(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)配比,提高了其氮肥利用率有关。综合分析,采用 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为 250-100-50 kg·hm<sup>-2</sup>的肥料方案为该地区最佳施肥策略。

#### 参考文献:

- [1] 胡明芳,田长彦,吕昭智,等.氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(4):63-68.
- [2] 汪玲,朱靖蓉,杨涛,等.氮肥施用策略对棉花干物质积累及产量构成的影响[J].新疆农业科学,2010,47(10):1952-1957.
- [3] 徐飞鹏,李云开,任树梅,等.新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J].农业工程学报,2003,19(1):25-27.
- [4] 赵双印,林忠东,李小斌,等.不同施氮水平棉花氮磷钾养分吸收规律研究[J].新疆农业科学,2010,47(1):141-145.
- [5] 王海江,崔静,侯振安,等.膜下滴灌棉花水氮耦合对其干物质和水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2010,19(3):76-80.
- [6] 龚江,李君,侯振安,等.膜下滴灌条件水、氮、密度耦合效应对棉花产量的影响[J].新疆农业科学,2010,47(10):1943-1946.
- [7] 龚江,王海江,侯振安,等.膜下滴灌水氮耦合对棉花生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2008,27(6):51-54.
- [8] 冯绍元,王广兴.滴灌棉花水肥耦合效应的田间试验研究[J].中国农业大学学报,1998,3(6):59-62.
- [9] 侯振安,李品芳,龚江,等.不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J].土壤学报,2007,44(4):702-708.
- [10] 李培岭,张富仓,贾运岗.沙漠绿洲地区膜下滴灌棉花产量和氮素利用的水氮耦合效应[J].灌溉排水学报,2009,28(5):61-66.
- [11] 李培岭,张富仓,贾运岗.沙漠绿洲地区膜下滴灌棉花水分利用的水氮耦合效应[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):53-59.
- [12] 谭勇,张炎,文启凯,等.氮、磷和钾营养对新海 16 长绒棉产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2006,(2):34-37.
- [13] 李祥云,宋朝玉,王瑞英,等.氮磷钾不同配比对棉花生物学性状和产量的影响[J].山东农业科学,2009,(4):68-73.
- [14] 张寄阳,段爱旺,申孝军,等.基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(9):56-59,89.
- [15] 谢光辉,韩东倩,王晓玉,等.中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J].中国农业大学学报,2011,16(1):1-8.
- [16] 赵萍萍,王宏庭,郭军玲,等.氮肥用量对夏玉米产量、收益、农学效率及氮肥利用率的影响[J].山西农业科学,2010,38(11):43-46,80.

## 4 小结与讨论

本文应用 Bayes 判别分析理论,选用  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等 6 个指标作为判别因子,建立了地下水化学类型的 Bayes 判别分类模型。所建立的判别模型采用刀切法对 Bayes 判别准则的优良性进行评价,识别正确率达 82.5%。同时,以该模型对预测样本进行判别分析,输出结果正确率达 86.6%,从而验证了 Bayes 判别准则的可行性和可靠性。

与传统的分类方法相比,Bayes 判别分类法存在误判的情况,它是一种带有预测性的判别分类方法,其准确度依赖于样本的数量,在建模过程中会受样本数据代表性和准确性的影响。因此在使用判别分类法时,对样本数量和样本的代表性有一定的要求。

本研究判别模型的建立是以多矩形图解(MRD)法为前提,所以与传统分类方法相比,该模型提供的判别分类结果,具有更明晰、易懂的水化学类型信息。

该模型建立所依据的数据来自内蒙古河套灌区,所以模型适用于和河套灌区相似的北方盐渍化灌区。模型简单易操作,准确率较高,满足工程领域要求,在今后的使用过程中,随着训练样本容量的增大,其代表性和准确性不断提高,模型逐步完善,可见 Bayes 判别分类法具有较高的应用价值,为地下水化学类型评判与分类提供了新的数量化和定量化途径。

## 参考文献:

- [1] 杨天笑.对现有地下水化学分类的几点认识[J].华东地质学院学报,1995,18(1):40-42.
- [2] 李育松,胡昱欣,卞建民.模糊聚类分析在地下水化学类型分类中的应用[J].人民黄河,2013,35(7):37-39,43.
- [3] 朱学愚,钱孝星.地下水水文学[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [4] 寇文杰.基于 EXCEL 的地下水化学舒卡列夫分类方法[J].工程勘察,2013,(5):48-50.
- [5] 孙亚乔,钱会,张黎,等.银川地区地下水化学特征[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):185-189.
- [6] 周金龙.多矩形图解法及其在塔里木盆地中的应用[J].水文地质工程地质,2006,(2):4-6.
- [7] 朱海勇,陈永金,刘加珍,等.塔里木河中下游地下水化学及其演变特征分析[J].干旱区地理,2013,36(1):8-18.
- [8] 张庆利.SPSS 宝典[M].第二版.北京:电子工业出版社,2011.
- [9] 梁才.基于 Bayes 判别理论的钢筋混凝土施工质量综合评价方法[J].混凝土,2011,(5):50-52.
- [10] 梁仕华,文畅平.膨胀土判别与分类的 Bayes 判别分析法[J].力学与实践,2008,30(6):73-76.
- [11] 文畅平.岩体质量分级的 Bayes 判别分析方法[J].煤炭学报,2008,33(4):395-399.
- [12] 宫凤强,李夕兵,张伟.基于 Bayes 判别分析方法的地下工程岩爆发生及烈度分级预测[J].岩土力学,2010,31(S1):370-377.
- [13] 李彬,史海滨,闫建文,等.节水改造后盐渍化灌区区域地下水埋深与土壤水盐的关系[J].水土保持学报,2014,28(1):117-122.
- [14] 李韵珠,陆锦文,吴金绥.河北曲周盐渍土区的地下水化学特征[J].土壤学报,2001,38(3):241-352.
- [15] 马雷,钱家忠,赵卫东.基于 GIS 的地下水化学类型空间分区方法[J].煤炭学报,2012,37(3):490-494.
- [16] 虎胆·吐马尔白,杨路华,史海滨,等.地下水利用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [17] Iema A, Lombardo G P, Mauromicale G. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1):35-41.
- [18] 郑顺林,李首成,丁海萍.高强力优质棉干物质积累和分配规律的研究[J].湖北农业科学,2006,45(1):44-48.
- [19] 伍维模,郑德明,董合林.新疆棉花干物质和氮磷钾养分积累的模拟分析[J].西北农业学报,2002,11(1):92-96.
- [20] 张旺锋,李蒙春,勾玲,等.北疆高产棉花养分吸收特性的研究[J].棉花学报,1998,10(2):88-95.
- [21] 薛晓萍,郭文琦,王以琳,等.不同施氮水平下棉花生物量动态增长特征研究[J].棉花学报,2006,18(6):323-326.
- [22] FB Fritschi, BA Roberts, RL Travis, et al. Response of irrigated a-cala and pima cotton to nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 2003, 95:133-146.
- [23] 李培岭,张富仓.根系分区交替滴灌下水氮耦合对棉花氮素利用效率的影响[J].农业工程学报,2012,28(25):112-116.
- [24] 薛晓萍,王建国,郭文琦,等.氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J].生态学报,2006,26(11):3631-3640.
- [25] 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011, 17(1):160-165.
- [26] 邓忠,白丹,翟国亮,等.膜下滴灌水氮调控对新疆棉花产量及水氮利用率的影响[J].应用生态学报,2013,24(9):2525-2532.
- [27] 周立平,郭金强.水氮耦合效应对膜下滴灌棉花产量的影响[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(6):51-54.

(上接第 104 页)