

不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收 和氮肥利用率的影响*

侯振安^{1,2} 李品芳^{1†} 龚江² 王艳娜²

(1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

(2 石河子大学农学院资源与环境科学系, 新疆石河子 832003)

摘要 在温室条件下应用¹⁵N 标记尿素进行了不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率影响的盆栽试验。根据滴灌灌水施肥时段的分配, 设置四种不同氮肥滴灌施肥策略。研究结果表明, 不同滴灌施肥策略显著影响棉花的干物质重和氮素吸收量, 棉花的氮素吸收量明显受到根系生长的影响, 整株氮素吸收量与根干物质重之间呈显著的正相关关系。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, 增加棉花的氮素吸收量, 减少氮肥在土壤中的残留, 提高氮肥利用率。因此, 在膜下滴灌条件下采用合适的施肥策略有助于提高肥料的利用效率。

关键词 膜下滴灌; 棉花; ¹⁵N; 滴灌施肥; 氮肥利用率

中图分类号 S145.7; S275.6 文献标识码 A

水和氮是干旱一半干旱地区影响农业生产的主要限制因素, 因此提高水和氮的利用率是农业生产的重要管理目标。肥料的施用方法是影响氮肥利用率的主要因素之一^[1]。氮是滴灌系统中最常用的大量元素, 通常很少引起堵塞问题^[2]。通过滴灌施肥, 可有效地调节施用肥料的种类、比例、数量及时期, 可将肥料施于根区, 保证根区养分的供应, 减少养分的淋失, 显著地提高肥料养分的利用率^[3,4]。关于滴灌下氮肥的施用量、频率以及水肥耦合效应等对肥料利用率的影响方面国内外学者作了大量研究, 研究对象涉及棉花、马铃薯、番茄、甘蔗等^[5~8]。

棉花是我国最重要的经济作物之一, 其生产经过多年的调整, 形成了长江流域、黄河流域和新疆棉区“三足鼎立”的格局。1996 年新疆引进滴灌技术应用于棉花生产, 并与薄膜覆盖技术相结合形成膜下滴灌技术^[9,10]。截至 2004 年, 新疆的滴灌面积已达 30 万 hm², 占全国滴灌面积的 80% 以上。由于膜下滴灌技术的推广应用, 新疆棉区棉花生产发展迅速, 棉花面积和总产均居全国之首, 已经成为我国最大的优质棉生产和出口基地^[11,12]。目前棉花生产中, 氮肥的滴灌施肥策略通常采用在一次灌水

过程中先滴约 1/3 时间的水, 然后开始滴肥液, 并且在灌水结束前 0.5 h 停止施肥, 再滴清水以冲洗管网^[13]。研究表明尿素随水滴施后容易随水分运移, 但由于土壤胶体对尿素的吸附作用, 尿素在剖面中的分布表现为滴头附近含量较高。在灌水量和施肥量相同的前提下, 施肥时段提前可以提高尿素在土壤中的运移速度, 增加尿素在土壤剖面中的分布范围, 同时可以促进尿素分子在土壤中的分解转化速度。反之, 施肥时段滞后则可以对尿素在土壤中运移分布和转化起到抑制作用^[14]。Cote 等^[15]对两种不同滴灌施肥策略下的溶质分布进行了模拟研究, 认为对于渗透性强的砂性土, 改变施肥策略, 在一次灌水过程中先滴肥液可以减少肥料的淋失, 有助于提高肥料利用率。Li 等^[16]研究了四种滴灌施肥策略下氮素在土壤中的分布, 结果表明滴灌施肥策略对土壤中硝态氮的分布影响明显, 建议采用最初用灌水施肥总时间的 1/4 灌水, 再用 1/2 时间施肥, 最后用 1/4 时间冲洗管道的运行方式, 以便将施入土壤的氮素最大限度地保留在作物根区内, 防止硝态氮淋失。上述研究表明滴灌条件下, 不同的滴灌施肥策略对于氮素养分的分布和转化具有明显的影响, 但是关于不同滴灌施肥策略下的

* 国家自然科学基金项目(30460062)和石河子大学骨干教师资助基金项目(NX02002)共同资助

† 通讯作者: 李品芳(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 从事水资源利用与管理研究。Tel: 010 62733442, E-mail: pili@cau.edu.cn

作者简介: 侯振安(1972-), 男, 副教授, 博士研究生, 从事绿洲农业资源高效利用研究。E-mail: hzaty1@163.com

收稿日期: 2006-04-10; 收到修改稿日期: 2006-08-14

氮肥利用率方面的研究还很少。本研究应用 ^{15}N 同位素示踪方法探讨不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响,为滴灌下氮肥的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试土壤采自新疆石河子大学农学院试验站,土壤质地为中壤土, pH 7.54, 有机质 15.27 g kg^{-1} , 全氮 1.05 g kg^{-1} , 碱解氮 54.88 mg kg^{-1} , 速效磷 19.04 mg kg^{-1} , 速效钾 194 mg kg^{-1} 。供试作物为棉花(新陆早 13 号)。

试验于 2005 年 6 月~10 月在新疆石河子大学农学院试验站温室进行。最高温度 35°C , 最低温度 23°C , 相对湿度 $55\% \sim 75\%$ 。试验使用底部密封的

大塑料桶(顶部直径 48 cm, 底部直径 40 cm, 高 55 cm), 供试土壤自然晾干, 碾碎混匀后过 2 mm 筛, 按干容重 1.2 g cm^{-3} 分层装土 50 cm。灌溉方式为滴灌, 滴灌系统主管道 32 mm, 支管 12.5 mm, 滴头流量 1.1 L h^{-1} , 滴头间距 40 cm(以色列 Netafim 公司生产)。支管平铺在桶上, 每个桶由 1 个滴头供水, 滴头固定在桶顶中心位置(图 1)。磷、钾肥在装土时一次性施入作基肥, 氮肥全部作追肥, 在试验期间随水滴施。根据灌水施肥时段的分配, 设计 4 种不同的氮肥施用策略: 1) W-N-W(先灌 1/3 时间的清水, 接着灌 1/3 时间的肥液, 最后灌 1/3 时间的清水); 2) W-N(先灌 1/2 时间的清水, 接着灌 1/2 时间的肥液); 3) N-W(先灌 1/2 时间的肥液, 接着灌 1/2 时间的清水); 4) N-N(全部灌肥液)。每个处理重复 4 次。

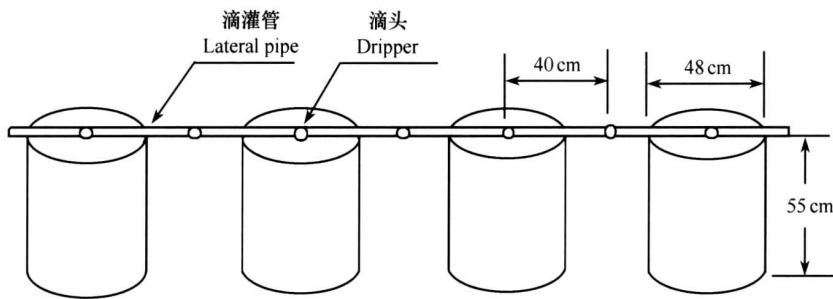


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental device

为保证出苗, 每桶在桶中心部位播种 5 粒(6 月 20 日)并在桶顶覆盖塑料薄膜(模拟膜下滴灌), 然后每桶滴水 4 L。待棉苗长到 2 片真叶时定苗(7 月 6 日), 每桶保留 1 株长势均匀的棉苗。为保证水分供应, 各处理任选 1 个重复每天称量桶重, 保持土壤水分在田间持水量的 $50\% \sim 80\%$ 。各滴灌施肥处理每次灌水量为每桶 6 L, 棉花生育期间共灌水 9 次(7 月 26 日开始, 9 月 28 日结束), 总灌水量每桶 54 L。各处理每次的灌水量通过使用量器收集每个桶相邻滴头的出流量来监测。各滴灌施肥处理氮肥使用 ^{15}N 同位素标记尿素(丰度 5%, 中国农业科学院原子能利用研究所提供), 氮肥(N)总用量为每桶 6.44 g, 分别在棉花蕾期(8 月 10 日)、初花期(8 月 23 日)和花铃期(9 月 8 日)分 3 次等量施用。灌水施肥时先按照试验设计计算出各处理的肥液用量和浓度, 将肥液贮存在塑料容器中(容积 100 L), 然后由水泵供

应。试验期间各处理没有淋洗和渗漏发生。在棉花吐絮期(10 月 3 日)结束试验。

1.2 样品采集与分析

试验结束后, 自基部将棉花地上部分剪下, 用去离子水洗净, 分成叶、茎、蕾铃和籽棉四部分, 70°C 下烘 72 h 后称重。根系的采集用 0.5 mm 土筛结合人工手拣的方法将棉花根系从土壤中筛分出来, 挑出混杂物后用去离子水洗净, 烘干称重。同时分层采集混合土样。

土壤和植株样品的全氮含量及 ^{15}N 丰度由中国农业科学院原子能利用研究所测定。

2 结果与分析

2.1 棉花干物质重

试验结束后, 四种滴灌施肥策略处理棉花各器

官及整株的干物质重见表 1。W-N-W 和 N-W 处理的整株干物质重量显著高于 W-N 和 N-N 处理。从各器官的干物质重来看,四个处理棉花的叶和蕾铃的干物质重均无显著差异。不同处理间茎的干物质重差异显著, W-N-W 处理棉花茎的生物量最高,分别较 N-W、W-N 和 N-N 处理高 20.00%、55.24% 和 117.2%。棉花的籽棉重 N-N 处理最高,较 W-N-W 处理高 165.4%,但与 W-N 和 N-W 处理无显著性差异。棉花根系的生长明显受施肥策略影响, N-W 处理棉花根系的生物量最高,较 N-N 处理高 33.98%。

2.2 氮素吸收总量

不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收有显著的影

响(表 2)。N-W 和 W-N-W 处理氮素吸收总量显著高于 N-N 处理,整株氮素吸收量分别较 N-N 处理高 24.56% 和 19.88%。从不同处理棉花各器官的氮素吸收量来看,蕾铃和籽棉的氮素吸收量无显著差异。N-W 和 W-N 处理棉花叶的氮素吸收量显著高于 N-N 处理,但与 W-N-W 处理差异不明显。茎和根的氮素吸收量以 W-N-W 和 N-W 处理较高, N-N 处理最低。上述结果表明不同施肥策略对于棉花生殖器官氮素的吸收影响不大,但对于营养器官氮素的吸收具有显著的影响。棉花的氮素吸收量明显受到根系生长的影响,整株氮素吸收量与根干物质重之间呈显著的正相关关系($r = 0.9807^*$)。

表 1 棉花各器官及整株的干物质重

Table 1 Dry matter weight of different plant parts and of the whole plant as affected by fertigation strategy

处理 Treatment	干物质重 Dry matter weight(g)					
	叶 Leaf	茎 Stem	蕾铃 Bud and boll	籽棉 Seed cotton	根 Root	整株 Whole plant
W-N-W	60.71 a	71.69 a	40.95 a	7.53 b	11.87 ab	192.8 a
W-N	62.48 a	46.18 c	30.64 a	12.99 ab	10.82 ab	163.1 b
N-W	62.39 a	59.68 b	40.61 a	10.96 ab	13.09 a	186.7 a
N-N	52.82 a	33.01 d	32.05 a	19.24 a	9.77 b	146.9 b

注:表格中同一列有相同字母表示处理间差异未达到显著性水平($p < 0.05$)。下表同 Note: The same letters following the data in the same column mean insignificant difference at $p < 0.05$. The same in the tables below

表 2 棉花各器官及整株的氮素吸收总量

Table 2 Nitrogen content in different plant parts and in the whole plant as affected by fertigation strategy

处理 Treatment	氮素吸收总量 Nitrogen content (g)					
	叶 Leaf	茎 Stem	蕾铃 Bud and boll	籽棉 Seed cotton	根 Root	整株 Whole plant
W-N-W	1.71 ab	0.97 a	1.03 a	0.22 a	0.17 ab	4.10 a
W-N	1.90 a	0.67 b	0.74 a	0.31 a	0.15 bc	3.78 ab
N-W	1.90 a	0.91 a	0.94 a	0.33 a	0.18 a	4.26 a
N-N	1.53 b	0.44 c	0.83 a	0.49 a	0.14 c	3.42 b

2.3 氮肥吸收比例(NDFP)

不同处理棉花各器官及整株吸收的氮素来自肥料的比例(NDFP)见表 3。总的来看, W-N 和 N-W 处理棉花整株吸收的氮素来自肥料的比例显著高于 N-N 和 W-N-W 处理,而 W-N 和 N-W 处理之间无显

著性差异。四种施肥策略下棉花蕾铃和籽棉的 NDFP 差异不显著, W-N-W 处理叶和茎的 NDFP 均显著低于 W-N、N-W 和 N-N 处理。N-W 处理根的 NDFP 最高,分别较 W-N-W、W-N 和 N-N 处理高 7.45%、6.74% 和 8.61%。

表 3 棉花各器官及整株吸收的氮素来自肥料的比例

Table 3 Percentage of N derived from fertilizer (NDF, %) in different plant parts and in the whole plant as affected by different fertigation strategy

处理 Treatment	NDF(%)					
	叶 Leaf	茎 Stem	蕾铃 Bud and boll	籽棉 Seed cotton	根 Root	整株 Whole plant
W-N-W	40.79 b	39.99 b	43.51 a	44.90 a	35.41 b	41.28 c
W-N	48.10 a	47.78 a	43.12 a	45.83 a	36.12 b	46.42 a
N-W	47.21 a	45.60 a	43.72 a	49.38 a	42.86 a	46.07 a
N-N	46.28 a	44.94 a	41.67 a	43.35 a	34.25 b	44.06 b

2.4 氮肥利用率(NUE)

四种滴灌施肥策略下棉花各器官及整株的氮肥利用率(NUE) 差异显著(表 4)。N-W 处理棉花茎的氮肥利用率显著高于 W-N 和 N-N 处理, 但与 W-N-W 处理差异不明显。四个处理棉花根的氮肥利用率与茎的氮肥利用率表现趋势相似, 同样是 N-W 处理最高, 其次是 W-N-W 处理, N-N 处理最低。棉花叶、蕾铃和籽棉的氮肥利用率, 不同处理间的差异未达到

显著性水平。从整株的氮肥利用率来看, N-W 处理最高, 分别较 W-N-W、W-N 和 N-N 处理提高了 16.08%、11.08% 和 30.51%。研究结果中各处理的氮肥利用率普遍偏低(23.35%~30.47%), 可能与本试验中氮肥施用量过大有关。四种施肥策略下棉花植株的氮素总吸收量为 3.42~4.26 g(表 2), 而试验中氮肥的施用量为 6.44 g, 远远超过了棉花的氮素需求。

表 4 植株各器官及整株的氮肥利用率

Table 4 Percentage of nitrogen use efficiency (NUE, %) in different plant parts and in the whole plant as affected by different fertigation strategy

处理 Treatment	NUE(%)					
	叶 Leaf	茎 Stem	蕾铃 Bud and boll	籽棉 Seed cotton	根 Root	整株 Whole plant
W-N-W	10.84 a	6.01 ab	6.96 a	1.51 a	0.93 b	26.25 bc
W-N	14.20 a	5.00 b	4.99 a	2.24 a	0.82 bc	27.26 b
N-W	13.95 a	6.42 a	6.38 a	2.51 a	1.21 a	30.47 a
N-N	10.90 a	3.09 c	5.35 a	3.29 a	0.72 c	23.35 c

2.5 氮肥去向

不同施肥策略下¹⁵N 标记尿素随水滴施后氮素的去向见表 5。W-N 和 N-N 处理氮素在土壤中的残留较多, N-W 处理的残留最少。四种施肥策略处理除 W-N 处理氮素在土壤中的残留率显著高于 N-W 处理外, 其他处理间无显著性差异。四个处理的氮素总回收率的趋势表现为: W-N>N-W>W-N-W>N-N; 而损失率则相反。但不同处理间的氮素总回收率和损失率均无显著性差异。

2.6 氮肥在土壤中的残留

收获后四个滴灌施肥策略处理不同深度土层的氮肥残留率见图 2。总的来看, 收获后氮肥在土壤表层 0~10 cm 的残留率最高(平均 7.93%), 其次是 40~50 cm(平均 7.05%) 和 30~40 cm(平均 6.73%),

10~20 cm 的残留率最低(平均 4.05%)。但不同滴灌施肥策略处理之间存在明显差异, W-N、W-N-W 和 N-W 处理 0~10 cm 的氮肥残留最多, 占氮肥残留总量的 27.22%~28.46%; 而 N-N 处理 40~50 cm 的氮肥残留最多, 占氮肥残留总量的 27.60%。

表 5 ¹⁵N 标记肥料中氮素的去向(占施氮量的比例%)

Table 5 Fate of labeled urea N (% of applied N)

处理 Treatment	棉花吸收 Plant recovery (%)	土壤残留 Recovery in soil (%)	总回收 Total recovery (%)	损失 N loss (%)
W-N-W	26.25 bc	29.66 ab	55.91 a	44.09 a
W-N	27.26 b	33.78 a	61.04 a	38.96 a
N-W	30.47 a	26.79 b	57.26 a	42.74 a
N-N	23.35 c	32.53 ab	55.88 a	44.12 a

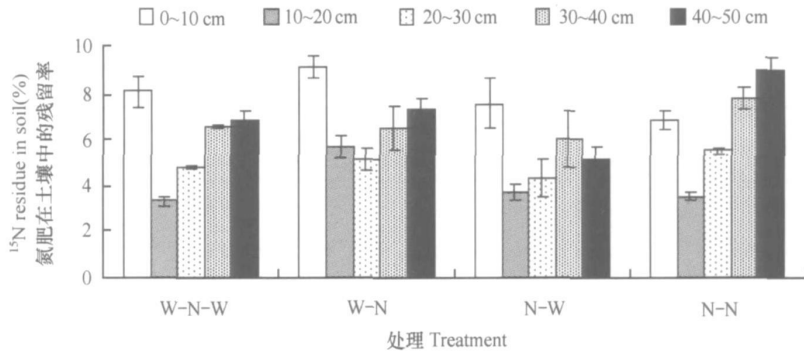


图2 收获后各处理不同深度土层中的氮肥残留率(图中误差线表示平均数的标准误 SE)

Fig 2 Residue of fertilizer ¹⁵N in soil at different depths after harvest (% of labeled fertilizer) (The vertical bars are the SE of the means)

3 讨论

一般认为在一次灌溉过程中采用先滴水,然后再滴施肥液的滴灌施肥策略可减少氮肥的淋失,有助于提高肥料利用率^[15]。本研究对这一观点提出了新的思考。不同滴灌施肥策略对棉花干物质积累和氮素吸收具有显著的影响。N-W 和 W-N-W 处理的总干物质重显著高于 W-N 和 N-N 处理。从氮素吸收总量来看, N-W 和 W-N-W 处理显著高于 N-N 处理,但与 W-N 处理差异不显著。

研究中应用¹⁵N 同位素示踪方法,对膜下滴灌条件下不同滴灌施肥策略对棉花氮肥利用率的影响进行了分析。W-N 和 N-W 处理棉花整株吸收的氮素来自肥料的比例(NDFP)显著高于 N-N 和 W-N-W 处理,而 W-N 和 N-W 处理之间无显著性差异。不同处理棉花各器官及整株吸收的氮素来自肥料的比例为 34.25%~49.38%,略高于其他研究所报道的棉花吸收氮素来自肥料的比例(33%~40%)^[17],这可能与本研究中氮肥采用滴灌施肥有关。大量研究表明,氮肥随水滴施可有效地促进植物对氮肥的吸收^[18,19]。滴灌施肥策略对棉花氮肥利用率的影响也表现出相似的效应, N-W 处理棉花整株的氮肥利用率最高,其次是 W-N 和 W-N-W 处理, N-N 处理最低。

就¹⁵N 标记尿素随水滴施后氮素的去向来看,不同滴灌施肥策略的棉花氮肥吸收率和土壤氮肥残留率差异显著。本研究中棉花的氮肥吸收率为 23.35%~30.47%,与 Chua 等^[20]所报道的滴灌条件下棉花的氮肥吸收率为 19%~38% 基本吻合。棉花收获后, W-N 处理氮肥在土壤中的总残留率最高,其次是 N-N 和 W-N-W 处理, N-W 处理最低。从

四个滴灌施肥策略处理不同土层的氮肥残留率来看, W-N、W-N-W 和 N-W 处理 0~10 cm 的氮肥残留最多,占氮肥残留总量的 27.22%~28.46%;而 N-N 处理 40~50 cm 的氮肥残留最多,占氮肥残留总量的 27.60%。不同滴灌施肥策略的氮肥总回收率为 55.91%~61.04%,但处理间无显著差异。这就意味着本研究中肥料氮的损失率超过 40%。由于本试验中的试验装置底部是密封的,试验过程中没有淋洗和渗漏发生,所以肥料氮的损失中不包含淋洗和渗漏损失。就氮肥从作物根区的淋失风险来分析, N-N 和 W-N 处理会造成氮肥在土壤中积累,增加氮肥的淋失。相比之下, N-W 处理则有助于降低氮肥淋失的风险。本研究结果与 Cote 等^[15]的观点一致。Cote 等对不同滴灌施肥策略下溶质(硝酸盐)运移的分析认为,重力与毛管力之间的竞争控制着溶质的运动。当在一次灌溉过程中采用先滴水,然后再滴施肥液的滴灌施肥策略时,由于溶质进入的土体已经被水湿润,重力起主导作用,溶质则倾向于向下运移;而当采用先滴肥液,然后再滴水的滴灌施肥策略时,毛管力是控制溶质运动的主导作用,溶质则倾向于向滴头周围的干土区运移。因此后一种施肥策略下将会有更多的溶质被保留在滴头附近区域,降低淋失的风险,有助于提高肥料利用率。

研究表明,滴灌条件下棉花根系也主要分布在滴头附近区域,绝大部分根系分布在 0~40 cm 土层,尤其是 10~20 cm 土层的棉花根系明显多于常规灌溉^[21]。根系是作物最活跃的养分和水分吸收器官,在作物的生长发育和产量形成过程中起着非常重要的作用。主要农业措施如灌溉、施肥等都是首先影响到根系的生长、分布和功能,然后对地上部起作用进而影响到产量的高低^[22~25]。同时,根系的分布也直接影响土壤水分养分空间有效性^[26]。

根系对水分和养分的吸收, 取决于与其接触的土壤空间及根系的生理活性和吸收能力^[27]。所以作物根系和养分在土壤中的分布直接影响着作物对养分的吸收。滴灌条件下, 不同的施肥策略影响到肥料施用后养分在土壤中的分布, 同时也对作物根系的生长和分布造成影响, 进而影响作物对养分的吸收和利用。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, 增加棉花的氮素吸收量, 减少氮肥在土壤中的残留, 提高氮肥利用率。因此, 在膜下滴灌条件下采用合适的施肥策略有助于提高肥料的利用效率。

本研究使用底部密封的大塑料桶, 人为避免了肥料的淋洗和渗漏损失, 同时供试土壤为过筛后的均质土壤, 这与农田的实际条件存在很大差异。此外, 试验中的氮肥也仅使用了单一用量。因此, 还需要进一步开展不同施肥策略和氮肥用量对棉花氮肥利用率影响的田间试验研究。尽管如此, 本研究对于进一步认识和思考滴灌施肥策略提供了更多的证据, 对于滴灌施肥系统的设计、管理和操作也具有一定指导意义。

参 考 文 献

- [1] Mohammad M J, Zuraïqi S, Quasmeih W, *et al.* Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 243~ 249
- [2] Haynes R J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. *Fertilizer Research*, 1985, 6: 235~ 255
- [3] Papadopoulos I. Nitrogen fertigation of trickle irrigated potato. *Fertilizer Research*, 1988, 16: 157~ 167
- [4] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, *et al.* Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245~ 252
- [5] Singandhupe R B, Rao G N, Patil N G, *et al.* Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.). *European Journal of Agronomy*, 2003, 19: 327~ 340
- [6] Silber A, Xu G, Levkovitch I, *et al.* High fertigation frequency: The effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil*, 2003, 253: 467~ 477
- [7] Thorburn P J, Dart I K, Biggs I M, *et al.* The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *Irrigation Science*, 2003, 22: 201~ 209
- [8] 赵玲, 侯振安, 危常州, 等. 膜下滴灌棉花氮磷肥料施用效果研究. *土壤通报*, 2004, 35(3): 307~ 310. Zhao L, Hou Z A, Wei C Z, *et al.* Effect of nitrogen and phosphate fertilizer on cotton under mulch drip irrigation system (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 307~ 310
- [9] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 25~ 27. Xu F P, Li Y K, Ren S M. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1): 25~ 27
- [10] 马富裕, 周治国, 郑重, 等. 新疆棉花膜下滴灌技术的发展与完善. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(3): 202~ 208. Ma F Y, Zhou Z G, Zheng Z, *et al.* The development and improvement of drip irrigation under plastic film on cotton (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 202~ 208
- [11] 徐敏, 韩晓军, 王子胜. 新疆棉花生产膜下滴灌技术应用研究. *作物杂志*, 2005(6): 56~ 58. Xu M, Han X J, Wang Z S. Study on the application of drip irrigation under plastic film on cotton (In Chinese). *Crops*, 2005(6): 56~ 58
- [12] Wang C, Isoda A, Wang P. Growth and yield performance of some cotton cultivars in Xinjiang, China, an arid area with short growing period. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, 190: 177~ 183
- [13] 洪亮. 棉花膜下滴灌系统运行管理及常见故障排除. *中国棉花*, 2005, 32(2): 37~ 38. Hong L. System operation and malfunction eliminating of drip irrigation under plastic film on cotton (In Chinese). *China Cotton*, 2005, 32(2): 37~ 38
- [14] 侯红雨, 庞鸿宾, 齐学斌, 等. 温室滴灌条件下尿素转化转移分布规律试验研究. *灌溉排水学报*, 2003, 22(6): 18~ 22. Hou H Y, Pang H B, Qi X B, *et al.* Experimental study on the principles of urea N transformation and transportation under drip irrigation in the greenhouse (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6): 18~ 22
- [15] Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, *et al.* Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 2003, 22: 143~ 156
- [16] Li J, Zhang J, Rao M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*, 2004, 67: 89~ 104
- [17] Rochester I J, Constable G A, Macleod D A. Cycling of fertilizer and cotton crop residue nitrogen. *Australian Journal of Soil Research*, 1993, 31: 597~ 609
- [18] Quiñones A, Banuls J, Millo E P, *et al.* Effects of ¹⁵N application frequency on nitrogen uptake efficiency in citrus trees. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160: 1429~ 1434
- [19] Mohammad M J. Squash yield, nutrient content and soil fertility parameters in response to methods of fertilizer application and rates of nitrogen fertigation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68: 99~ 108
- [20] Chua T T, Bronson K F, Booker J D, *et al.* Irr season nitrogen status sensing in irrigated cotton: I. Yields and nitrogen 15 recovery. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1428~ 1438
- [21] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究. *棉花学报*, 2002, 14(4): 209~ 214. Wei C Z, Ma F Y, Lei Y W, *et al.* Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch and drip irrigation (In Chinese). *Cotton Science*, 2002, 14(4): 209~ 214
- [22] 王启现, 王璞, 杨相勇, 等. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1469~ 1475. Wang Q X, Wang P, Yang X Y, *et al.* Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.) (In Chinese)

- nese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1 469~ 1 475
- [23] 张永清, 李华, 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响. *土壤*, 2006, 38(1): 110~ 112. Zhang Y Q, Li H, Miao G Y. Effect of fertilization depth on distribution and late senescence of root system of spring wheat (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(1): 110~ 112
- [24] Qu L Y, Quroreshi A M, Koike T. Root growth characteristics, biomass and nutrient dynamics of seedlings of two Larch species raised under different fertilization regimes. *Plant and Soil*, 2003, 255: 293~ 302
- [25] Zhuge Y P, Zhang X D, Zhang Y L, *et al.* Tomato root response to subsurface drip irrigation. *Pedosphere*, 2004, 14(2): 205~ 212
- [26] 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性. *土壤学报*, 2003, 40(5): 697~ 703. Liu K, Chen X P, Zhang F S. Winter wheat root distribution and soil water and nutrient availability (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 697~ 703
- [27] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 899~ 904. Song H X, Li S X. Effects of root growing space of maize on its absorbing characteristics (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 899~ 904

EFFECTS OF FERTIGATION STRATEGY ON NITROGEN UPTAKE BY COTTON AND USE EFFICIENCY OF N FERTILIZER

Hou Zhen'an^{1,2} Li Pinfang^{1†} Gong Jiang² Wang Yan'na²

(1 College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

(2 Department of Resources and Environmental Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract Effects of fertigation strategy on nitrogen (N) uptake by cotton and N use efficiency (NUE) were investigated through a pot experiment under greenhouse conditions. According to timing of irrigation and fertilization, four fertigation treatments were designed, nitrogen applied 1) in the beginning of the irrigation cycle (N⁻W), 2) at the end (W⁻N), 3) in the middle (W⁻N⁻W), and 4) throughout the irrigation cycle (N⁻N) in a completely randomized layout, each with four replications. Cotton was grown in plastic containers, 84 L in volume, filled with a clay loam soil and fertilized at a rate of N 6.44 g per pot as ¹⁵N labeled urea. Treatment N⁻W was significantly higher than Treatment N⁻N in total dry matter (DM) and N content, but did not differ much from Treatment W⁻N and Treatment W⁻N⁻W. Plants in Treatments W⁻N and N⁻W were found to have a significantly higher content of nitrogen derived from fertilizer (NDFE) than those in Treatments W⁻N⁻W and N⁻N. Fertigation strategy had a consistent effect on total NUE: Treatment N⁻W was the highest in total NUE, and followed by Treatments W⁻N and W⁻N⁻W, which were quite similar to each other, and Treatment N⁻N was the lowest. After harvesting, the residue of fertilizer N in soil was highest in Treatment W⁻N, and the lowest in Treatment N⁻W, but did not vary much between Treatment N⁻N and Treatment W⁻N⁻W. The difference between the four treatments in total ¹⁵N recovery was not statistically significant. From the aspect of nitrate leaching losses from the root zone, Treatments N⁻N and W⁻N may lead to an increase in soil residual nitrates and hence a higher risk of nitrate leaching. In contrast, Treatment N⁻W tends to reduce potential leaching loss of nitrate from the root zone. In this study, the fertigation strategy, Treatment N⁻W (nitrogen applied in the beginning of the irrigation cycle) increased DM accumulation, N uptake and NUE of cotton. Therefore, NUE could be enhanced by optimizing fertilization strategies with drip irrigation.

Key words Drip irrigation under film; Cotton; ¹⁵N; Fertigation; Nitrogen use efficiency