

DOI: 10. 11766/trxb201403140110

应用¹⁵N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向*

张 文 周广威 闵 伟 马丽娟 侯振安[†]

(石河子大学农学院农业资源与环境系,新疆石河子 832003)

摘 要 通过田间小区试验和微区试验相结合研究滴灌条件下不同灌溉水盐度、灌水量和施氮量对棉田土壤中氮肥去向的影响。试验设置 3 种灌溉水盐度(电导率, EC): 0.35、4.61 和 8.04 dS m⁻¹ (分别以 S_{0.35}、S_{4.61} 和 S_{8.04} 表示); 2 个灌水量: 405 和 540 mm; 同时设置 2 个施氮水平: 240、360 kg hm⁻² (360 kg hm⁻² 为当地棉田推荐氮肥用量)。结果表明: S_{0.35} 和 S_{4.61} 灌溉处理的棉花氮素吸收量和产量无显著差异, 分别较 S_{8.04} 灌溉处理高出 27.46% 和 33.65%、21.29% 和 21.63%。灌溉水盐度主要通过影响棉花单株结铃数来影响棉花产量。增加施氮量和灌水量, 棉花氮素吸收量和产量均有所增加。¹⁵N 同位素标记试验结果表明: 植物¹⁵N 回收率在 34.20%~62.51% 之间, 随灌溉水盐度的增加, 植物¹⁵N 回收率呈现先增加后减小的趋势, S_{0.35}、S_{4.61} 处理较 S_{8.04} 处理分别高出 30.70% 和 41.77%; 增加灌水量和施氮量可显著提高植物¹⁵N 回收率。土壤¹⁵N 残留率随灌溉水盐度的增加而增加, S_{4.61} 和 S_{8.04} 处理的土壤¹⁵N 残留率较 S_{0.35} 处理分别高出 3.48% 和 23.22%。施氮量由 240 kg hm⁻² 增加至 360 kg hm⁻², 土壤¹⁵N 残留率增加 9.51%。各处理¹⁵N 淋洗损失率在 0.35%~3.59% 之间, 低施氮量下, S_{0.35} 和 S_{4.61} 处理的¹⁵N 淋洗损失率无显著差异, S_{8.04} 处理的¹⁵N 淋洗损失率分别较 S_{0.35}、S_{4.61} 处理高出 1.87 倍和 0.84 倍; 高施氮量下, ¹⁵N 淋洗损失率随灌溉水盐度的增加而显著增加。增加灌水量和施氮量, ¹⁵N 淋洗损失率均显著增加。

关键词 咸水滴灌; 棉花; 干物质质量; 产量; ¹⁵N 去向

中图分类号 S562.06 **文献标识码** A

微咸水资源作为淡水的重要补充和可代替资源, 近年来得到了学者们的高度关注^[1-2]。许多专家指出, 如果灌溉得当, 微咸水资源可以代替淡水用于农业生产, 从而有效地缓解水资源短缺问题^[3-4]。新疆属于干旱地区, 年蒸发量远大于降雨量, 作物全生育期灌溉是农业得以持续发展的基本保障。因此, 微咸水资源的有效利用是缓解该地区水资源紧缺的重要途径^[5]。但长期微咸水灌溉很可能会导致盐分的表聚, 造成土壤耕层盐碱化, 影响作物生长和产量形成^[6]。

氮素是作物生长发育过程中所需的大量元素之一, 氮肥的合理施用是调控作物生长发育和产量形成的重要措施。合理的氮肥施用还可以减轻盐分给作物带来的损失, 通过施氮肥可以达到“以肥调盐”、“以肥调水”的效果, 缓解土壤盐分对植物的抑制作用^[7]。Helalia 等^[8]研究发现增加氮肥用量

可以弥补盐分对紫花苜蓿所造成的产量损失。黄增荣等^[9]研究也表明: 施氮肥和磷肥能缓解土壤盐分对菊芋的抑制作用, 增加菊芋生物产量。然而不合理的氮肥施用又可能加重土壤次生盐渍化, 增加土壤盐分对作物生长的抑制作用^[10], 从而导致作物对氮素的吸收降低, 增加了氮素的潜在淋洗损失, 可能造成地下水污染等问题^[11]。另一方面, 过量或不合理的氮肥施用也会导致氮肥当季利用率降低, 损失严重, 相当一部分氮素通过氨挥发、硝化-反硝化等途径损失掉^[12-13]。

近些年来, 国内外学者对水肥耦合效应及氮肥去向进行了大量且较为成熟的研究, 研究主要集中于利用普通水质进行灌溉, 而关于咸水灌溉农田后氮肥去向和作物氮肥利用率的研究相对较少。¹⁵N 示踪技术作为氮素研究的有效工具而被广泛用于多种作物上, 通过¹⁵N 示踪方法, 研究作物对氮肥的

* 国家自然科学基金项目(31360504)资助

[†] 通讯作者, 侯振安, 男, 新疆石河子人, 教授, 主要从事干旱区水氮资源高效利用的研究。E-mail: hzaty1@163.com

作者简介: 张 文(1990—), 女, 新疆博乐人, 硕士研究生, 主要从事干旱区水氮资源高效利用的研究。E-mail: zhangwenshu@163.com

收稿日期: 2014-03-14; 收到修改稿日期: 2014-06-18

吸收、运转和代谢规律,可为合理施肥、提高肥料利用率提供科学依据^[14]。

本研究应用¹⁵N 同位素示踪方法研究咸水滴灌条件下氮肥在土壤和作物系统中的去向,探讨不同灌溉水盐度、灌溉量及施氮量对棉花氮素利用率的影响,为干旱半干旱地区咸水微咸水资源合理利用和滴灌棉田氮肥高效利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2010 年在新疆石河子大学农学院试验站(44°18'N,86°02'E)进行,试验区地处天山北麓中段,准葛尔盆地西南缘,海拔 300~400 m 左右,年均气温 6.4~7.7 °C,年降水量 125~208 mm 左右。土壤质地为壤土,砂粒 38.22%、粉粒 45.10%、黏粒

16.51%,pH 7.90、有机质 22.90 g kg⁻¹、全氮 1.10 g kg⁻¹、碱解氮 52.38 mg kg⁻¹、有效磷 15.35 mg kg⁻¹、速效钾 153 mg kg⁻¹。供试作物为棉花(新陆早 33 号)。

1.2 试验设计

本试验采用田间小区试验和微区试验相结合,试验设灌溉水盐度、灌水量和施氮量三个因素,其中,灌溉水设淡水、微咸水、咸水三个水平,盐度(电导率,EC)分别为 0.35、4.61 和 8.04 dS m⁻¹,分别以 S_{0.35}、S_{4.61}、S_{8.04} 表示;灌水量设两个水平:405 和 540 mm,分别以 I₄₀₅、I₅₄₀ 表示;氮肥用量设两个水平:240 和 360 kg hm⁻²,分别以 N₂₄₀、N₃₆₀ 表示,其中 360 kg hm⁻²为当地大田推荐氮肥用量。试验中灌溉水的盐化处理采用在淡水中加入 NaCl 和 CaCl₂(1:1 重量比)混合盐进行配置,以模拟含 Cl⁻、Na⁺ 和 Ca²⁺ 为主的矿化水。三种灌溉水的主要化学性质见表 1。

表 1 三种灌溉水的化学组成

Table 1 Chemical compositions of the three types of irrigation water in this study

灌溉水盐度 Water salinity (EC, dS m ⁻¹)	pH	钠吸附比 SAR	离子浓度 Ion concentration (meq L ⁻¹)						
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0.35	7.52	0.16	0.33	0.22	2.44	1.18	0.98	2.46	0.73
4.61	7.18	6.74	0.33	25.52	27.50	1.18	1.07	52.57	0.83
8.04	7.09	8.91	0.33	43.04	45.50	1.18	1.15	88.00	0.83

试验采用完全随机区组试验设计,共 12 个处理,每个处理重复 3 次,共 36 个小区。每个试验小区中间设置微区试验,使用直径 40 cm、高 100 cm 的铁桶在试验开始前一年预先埋入土中,每个微区由一个滴头固定供水,在桶底部接出流管,用于收集土壤渗液。微区内氮肥使用¹⁵N 同位素(丰度 10.25%,由上海稳定性同位素工程技术研究中心提供)标记尿素,试验小区使用普通尿素。

棉花的种植方式为覆膜栽培,一膜四行,行距配置为 30 cm + 60 cm + 30 cm,株距 10 cm,滴灌毛管铺设在 2 行作物中间,播种密度为 19.0 × 10⁴ 株 hm⁻²。灌溉方式为膜下滴灌,一膜两管,滴灌带间距 90 cm,滴头间距 40 cm。4 月 30 号播种,棉花出苗采用“干播湿出”,各处理灌淡水 30 mm。咸水灌溉处理从棉花盛蕾期(第 1 次灌水)开始,全生育期共灌水 8 次,各处理灌溉水量由水表控制。试验中氮肥全部作追肥,在棉花生长期随水滴施。磷肥(P₂O₅)用量 105 kg hm⁻²,钾肥(K₂O)用量 60

kg hm⁻²,在播种前一次性施入作基肥。其他栽培措施参照当地膜下滴灌棉田。

1.3 样品采集与测定

试验小区内,在棉花不同生长阶段定期采集棉花地上部植株样品,分为茎、叶、蕾铃 3 部分,105 °C 杀青 30 min 后于 70 °C 条件下烘干至恒重,称重,记录干物质重。烘干的植株样品经粉碎,过 0.5 mm 筛,备用。植株样品用 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,凯氏定氮仪测定植株全氮含量。棉花吐絮期测定棉花籽棉产量及产量构成因素,最后实收计产。

在微区内,在每次灌溉后,收集渗液,测定渗液体积、全氮含量及¹⁵N 丰度;在棉花吐絮初期采集地上部棉花植株样品,测定干物质质量、全氮含量及¹⁵N 丰度;采集微区土壤样品。土壤、植物及渗液全氮含量及¹⁵N 丰度由中国农科院原子能利用研究所测定。

1.4 数据处理

植物吸收氮素来自肥料的比例(NDFP%)的计算方法如下^[15-16]:

$$\text{NDFP}(\%) = (a - b) / (c - d) \times 100$$

式中, a 为施肥处理棉花植株样品的 ^{15}N 丰度(%); b 为施肥处理棉花植株样品的自然丰度(%); c 为同位素标记肥料中的 ^{15}N 丰度(%); d 为 ^{15}N 的自然丰度(%)($d = 0.365\%$)。

氮肥在土壤中的残留率(NFRS%)依据下式进行计算^[16]:

$$\text{NFRS}\% = (a - c) / (b - c) \times (N_p / N_f) \times 100$$

式中, a 为施肥处理土壤的 ^{15}N 丰度(%); b 为同位素标记肥料中的 ^{15}N 丰度(%); c 为不施肥处理土壤的 ^{15}N 丰度(%); N_p 为土壤的总氮量(g plot^{-1}); N_f 为氮肥施用总量(g plot^{-1})。

肥料氮的淋洗比例采用下式计算^[15-16]:

$$^{15}\text{N} \text{ 淋洗量}(\%) = (a - c) / (b - c) \times (N_p / N_f) \times 100$$

式中, a 为施肥处理淋洗液中的 ^{15}N 丰度(%); b 为

同位素标记肥料中的 ^{15}N 丰度(%); c 为自然条件 ^{15}N 丰度(%); N_p 为淋洗总氮量(g plot^{-1}); N_f 为氮肥施用总量(g plot^{-1})。

2 结果

2.1 咸水灌溉对棉花氮素吸收的影响

棉花茎、叶的氮素吸收量主要受施氮量和灌溉水盐度影响, 灌水量对其影响不大(表2)。施氮量由 240 kg hm^{-2} (N_{240}) 增加至 360 kg hm^{-2} (N_{360}), 棉花茎、叶氮素吸收量分别增加了 8.78% 和 5.51%。从灌溉水盐度来看, 淡水($S_{0.35}$)和微咸水($S_{4.61}$)灌溉处理的棉花茎、叶氮素吸收量无显著差异, 较咸水($S_{8.04}$)处理分别高出了 28.43%、32.05% 和 19.51%、23.93%。

表 2 不同处理对棉花植株氮素积累量的影响

Table 2 Effect of irrigation water salinity, irrigation rate, and N application rate on N accumulation in cotton

处理 Treatment			氮素吸收量 Nitrogen uptake (g plant^{-1})					
灌水量 Irrigation	施氮量 N rate	灌溉水盐度 Salinity	茎 Stem	叶 Leaf	铃 Boll	总量 Total		
I_{405}	N_{240}	$S_{0.35}$	0.09cde	0.22cd	0.36a	0.67e		
		$S_{4.61}$	0.10cde	0.23cd	0.37a	0.69cde		
		$S_{8.04}$	0.07g	0.21de	0.25c	0.54f		
	N_{360}	$S_{0.35}$	0.09cde	0.23cd	0.40a	0.73bc		
		$S_{4.61}$	0.11bcd	0.24bc	0.37a	0.72bcd		
		$S_{8.04}$	0.09de	0.21de	0.26c	0.57f		
		I_{540}	N_{240}	$S_{0.35}$	0.12a	0.24bc	0.31b	0.67de
				$S_{4.61}$	0.11bc	0.26ab	0.38a	0.75b
				$S_{8.04}$	0.08fg	0.19f	0.26c	0.53f
N_{360}	$S_{0.35}$	0.12ab	0.28a	0.36a	0.75b			
	$S_{4.61}$	0.13a	0.28a	0.40a	0.80a			
	$S_{8.04}$	0.09ef	0.20ef	0.29bc	0.57f			
两因素分析(F值) Two-way ANOVA (F value)								
施氮量 N application rate (N)			11.19**	11.06**	12.02**	40.84***		
灌溉水盐度 Water salinity (S)			44.78***	58.86***	89.87***	251.30***		
交互作用 Interaction (N × S)			4.38*	2.64 ns	1.92 ns	1.85 ns		

从施氮量来看, 低灌水量下(I_{405}), 施氮量对棉花铃的氮素吸收量影响不大; 高灌水量下(I_{540}), 施氮量由 N_{240} 增加至 N_{360} , $S_{0.35}$ 灌溉处理的棉花铃氮素吸收量增加 14.34%, $S_{4.61}$ 、 $S_{8.04}$ 灌溉处理的棉花铃氮素吸收量受施氮量影响不大。从灌水量来看, 在 N_{240} 条件下, 灌水量由 I_{405} 增加至 I_{540} , $S_{0.35}$ 处理棉花

铃的氮素吸收量降低 12.64%, $S_{4.61}$ 、 $S_{8.04}$ 无显著影响; 在 N_{360} 条件下, 灌水量对各灌溉水盐度处理的棉花铃氮素吸收量均无显著影响。

总体而言, 灌溉水盐度对棉花总氮素吸收量影响表现为 $S_{4.61}$ 处理最高, 其次为 $S_{0.35}$ 处理, $S_{8.04}$ 处理的棉花总氮素吸收量最低。随灌水量和施氮量的

增加,棉花氮素吸收量分别增加 4.06% 和 7.18%。

2.2 咸水灌溉对棉花产量的影响

棉花单株结铃数主要受施氮量和灌溉水盐度影响(表 3)。随施氮量增加,棉花单株结铃数显著增加,高施氮量(N₃₆₀)较低施氮量(N₂₄₀)处理棉花单株结铃数增加 3.85%。灌溉水盐度对棉花单株结铃数影响显著,淡水(S_{0.35})和微咸水(S_{4.61})灌溉处理棉花单株结铃数差异不大,分别较咸水(S_{8.04})灌溉处理高出 16.08% 和 19.16%。

灌溉水盐度显著影响棉花单铃重,棉花单铃重随灌溉水盐度的增加而降低,S_{4.61}和 S_{8.04}灌溉处理的棉花单铃重较 S_{0.35}处理平均分别减少 1.41% 和 4.13%。

与棉花单株结铃数类似,灌溉水盐度和施氮量对棉花籽棉产量的影响达到显著水平(表 3)。S_{8.04}灌溉处理的籽棉产量最低,S_{0.35}、S_{4.61}灌溉处理的籽棉产量差异不大,较 S_{8.04}处理分别高出 21.29% 和 21.63%。增加施氮量可显著提高籽棉产量,N₃₆₀处理较 N₂₄₀处理籽棉产量增加 4.73%。

表 3 不同处理对棉花产量及其构成因子的影响

Table 3 Yield and yield composition of cotton relative to treatment

处理 Treatment			产量及产量构成因子 Yield and yield composition			
灌水量 Irrigation	施氮量 N rate	灌溉水盐度 Salinity	单株结铃数 Number of bolls (No. plant ⁻¹)	单铃重 Boll weight (g)	籽棉产量 Yield of seed cotton(kg hm ⁻²)	
I ₄₀₅	N ₂₄₀	S _{0.35}	4.73ab	5.74ab	5 153a	
		S _{4.61}	4.84a	5.73ab	5 261a	
		S _{8.04}	3.87d	5.74ab	4 211b	
	N ₃₆₀	S _{0.35}	4.91a	5.84ab	5 451a	
		S _{4.61}	5.06a	5.82ab	5 590a	
		S _{8.04}	4.12cd	5.61b	4 388b	
	I ₅₄₀	N ₂₄₀	S _{0.35}	4.68ab	6.02a	5 351a
			S _{4.61}	4.93a	5.79ab	5 239a
			S _{8.04}	4.25cd	5.52b	4 440b
N ₃₆₀		S _{0.35}	4.95a	5.87ab	5 519a	
		S _{4.61}	4.95a	5.80ab	5 445a	
		S _{8.04}	4.36bc	5.63b	4 666b	
两因素分析(F 值) Two-way ANOVA (F value)						
施氮量 N application rate (N)			4.71 *	0.01 ns	5.42 *	
灌溉水盐度 Water salinity (S)			37.90 ***	5.49 **	54.90 ***	
交互作用 Interaction (N × S)			0.15 ns	0.15 ns	0.03 ns	

2.3 咸水灌溉棉田¹⁵N 去向

不同处理下¹⁵N 标记尿素随水滴施后氮素的去向如表 4 所示。总体上,棉花¹⁵N 回收率在 34.20%~62.51% 之间,灌溉水盐度对棉花¹⁵N 回收率的影响表现为咸水(S_{8.04})处理最低,淡水(S_{0.35})和微咸水(S_{4.61})处理之间差异不显著,分别较 S_{8.04}处理高出 30.70% 和 41.77%。增加施氮量可显著提高植物¹⁵N 回收率,高施氮量(N₃₆₀)较低施氮量(N₂₄₀)处理植物¹⁵N 回收率增加 14.61%。灌水量由 405 mm 增加至 540 mm 时,棉花¹⁵N 回收率增加 11.86%。

总体上,I₄₀₅-N₃₆₀-S_{8.04}和 I₅₄₀-N₃₆₀-S_{8.04}处理的土壤残留率最高,I₅₄₀-N₂₄₀-S_{0.35}处理的土壤残留率最低。土壤¹⁵N 残留率随灌溉水盐度的增加而增加,微咸水(S_{4.61})、咸水(S_{8.04})处理的土壤¹⁵N 残留率较淡水(S_{0.35})处理分别高出 3.48% 和 23.22%。施氮量由 240 kg hm⁻²增加至 360 kg hm⁻²,土壤¹⁵N 残留率增加 9.51%。

¹⁵N 淋洗损失率在 0.35%~3.59% 之间(表 4)。N₂₄₀处理下,淡水(S_{0.35})和微咸水(S_{4.61})处理的¹⁵N 淋洗损失率之间无显著差异,咸水(S_{8.04})处理的¹⁵N 淋洗损失率最高,分别较 S_{0.35}、S_{4.61}处理高出了 1.87

倍和 0.84 倍;高施氮量(N_{360})下, ^{15}N 淋洗损失率随灌溉水盐度的增加而显著增加。增加施氮量可显

著增加 $S_{8.04}$ 处理在 I_{540} 条件下的 ^{15}N 淋洗损失率,其他处理受施氮量影响不显著。

表 4 ^{15}N 标记肥料中氮素的去向 (占施氮量的比例 %)

Table 4 Fate of N in ^{15}N -labeled urea (% of applied N)

处理 Treatment			氮素吸收量 Nitrogen uptake ($g\ plant^{-1}$)			
灌水量 Irrigation	施氮量 N rate	灌溉水盐度 Salinity	棉花回收率 Plant recovery (%)	土壤残留 Soil residue (%)	淋洗损失 Leaching loss (%)	其他损失 Other loss (%)
I_{405}	N_{240}	$S_{0.35}$	44.20cd	24.17d	0.59gh	32.04
		$S_{4.61}$	43.31cde	23.85d	0.83fg	32.01
		$S_{8.04}$	34.85ef	27.75b	1.47cd	35.93
	N_{360}	$S_{0.35}$	50.84bc	24.47d	0.35h	24.34
		$S_{4.61}$	54.96ab	25.59c	1.02f	18.43
		$S_{8.04}$	44.35cd	31.51a	1.75c	22.39
I_{540}	N_{240}	$S_{0.35}$	53.50ab	22.03e	0.66gh	23.81
		$S_{4.61}$	58.97ab	23.86d	1.11ef	16.06
		$S_{8.04}$	34.20f	26.02c	2.11b	37.67
	N_{360}	$S_{0.35}$	54.04ab	23.55d	0.46h	21.95
		$S_{4.61}$	62.51a	24.19d	1.36de	11.94
		$S_{8.04}$	41.61def	30.81a	3.59a	23.99
两因素分析 (F 值) Two-way ANOVA (F value)						
施氮量 N application rate (N)			19.05***	37.28***	10.84**	—
灌溉水盐度 Water salinity (S)			41.65***	100.90***	128.42***	—
交互作用 Interaction (N × S)			1.00 ns	10.60**	13.01***	—

3 讨 论

氮素是植物生长必需的大量元素之一,是棉花生长及产量形成的重要因子,土壤中盐分过多,会抑制植物对氮素的吸收,从而影响棉花产量^[17]。侯振安等^[18]认为随灌溉水盐度增加,棉花氮素吸收量和产量显著降低。但 Hoorn 等^[19]认为适当的盐分对植物的氮素吸收有促进作用。本研究结果表明,适宜盐度的微咸水处理可增加棉花氮素积累量和产量,但当盐度达到咸水灌溉水平时,棉花的氮素积累量和产量均显著降低。说明适宜盐度的微咸水灌溉对棉花生长和产量影响不大,但高盐度咸水灌溉明显抑制棉花生长,降低棉花产量。

氮肥投入量大是新疆棉花生产的重要特点之一,但是氮肥的当季利用率却很低,仅为 30%~35%,农田氮素损失率为 30%~50%,每年通过淋溶、挥发等途径损失的氮素约 $9 \times 10^6 t$ ^[20]。本研究

中不同灌溉水滴灌棉田植物 ^{15}N 回收率在 34.20%~62.51% 之间,微咸水处理的棉花 ^{15}N 回收率最高,其次为淡水,咸水处理的棉花 ^{15}N 回收率最低。马丽娟等^[21]研究结果表明微咸水灌溉棉花 ^{15}N 回收率与淡水灌溉差异不大,但咸水灌溉棉花 ^{15}N 回收率较淡水和微咸水灌溉分别降低了 10.17% 和 15.23%。上述结果说明高盐度的咸水灌溉会降低棉花 ^{15}N 回收率,这主要是因为土壤盐分对渗透势的影响和盐离子自身的毒害作用造成了作物根系对氮素的吸收量降低^[22]。

本研究中不同处理土壤 ^{15}N 残留率为 22.03%~31.31%,咸水灌溉的土壤 ^{15}N 残留率显著高于淡水和微咸水处理。可能是咸水灌溉抑制作物的生长和氮素吸收^[18],导致土壤 ^{15}N 残留率增加。随施氮量的增加,土壤 ^{15}N 残留率显著增加,肥料氮施入土壤后使肥料氮与土壤氮并存,稀释了土壤氮库,使作物从土壤中吸取氮素时减少了对土壤氮的吸收,肥料氮便可替代部分土壤氮被作物吸收^[23]。增加

灌水量,土壤¹⁵N 残留率有所减少。因为土壤水分运动是土壤溶质运移的主要制约因素,活跃的土壤水分始终是土壤氮素淋溶运移的媒介和驱动力。由于水分对氮素的淋溶作用,水量越大水分对土壤中氮元素的淋溶作用越强^[24]。

大量研究还表明,残留在土壤中的肥料氮可为后季作物利用。李世清和李生秀^[25]指出,氮肥施入土壤后,不仅对当季作物起增产作用,约 30% 以上的肥料氮残留在土壤中,供下季作物利用。连续多年施用氮肥使氮肥残效叠加,在干旱农田生态系统表现为土壤剖面硝态氮的累积量增加^[26]。这些硝态氮如果不被作物及时吸收,遇到灌水和降雨,将通过重力流和扩散作用逐渐向深层移动,造成氮素的淋洗损失^[27]。本研究结果表明灌水量和施氮量最大的咸水处理,¹⁵N 淋洗损失率最大,且随灌溉水盐度、灌水量和施氮量的增加而增加。朱龙辉等^[28]研究结果也表明随灌溉水盐度和灌水量的增加,0~1 m 土壤硝态氮淋洗量显著增加。原因可能是在微碱性条件下,硝化过程中自养硝化细菌的生长和代谢最旺盛,造成土壤中硝态氮累积^[27],同时咸水灌溉后土壤水分含量较高,为硝态氮的大量淋洗损失提供了可能。张国梁等^[29]研究发现尿素在一次使用和过度灌溉时淋失量最大,而分次使用和适度灌溉淋失量最小,灌溉量对氮素淋失的影响甚至较施肥明显。李世清和李生秀^[30]连续 6 年研究了半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失,结果表明硝态氮的淋洗量随降水量和施氮量的增加而显著增加。上述结果说明适宜的灌水量、施氮量及灌溉水盐度可减少氮素的淋溶损失,提高氮肥利用率。

本研究中氮素的淋洗损失仅为 0.45%~3.59%,可能不是氮肥损失的主要途径,除被植物吸收利用和土壤固定外,其余部分的氮素可能通过氨挥发和硝化-反硝化作用损失掉。新疆是典型的盐渍化地区,土壤含盐量是盐渍化土壤主要的土壤特性。有研究表明土壤含盐量对氨挥发速率有显著的促进作用,在土壤全盐量介于 1.7~37.9 g kg⁻¹ 的范围内,土壤氨挥发随着土壤的盐含量增加而加剧^[31]。因为随着土壤盐分增加,盐度对微生物的抑制作用加强^[32],土壤中的硝化细菌逐渐受到抑制,土壤铵态氮累积量增加,加剧了土壤的氨挥发累积量。但也有学者认为高盐度降低尿素的水解,从而减少土壤氨挥发^[33]。徐万里等^[34]应用 3 种不同氨气测定方法,通过 3 年田间试验结果表明:在现行的耕作

和管理制度下,新疆盐渍化土壤上氨挥发损失均在总施氮量的 6.25% 以下,认为氨挥发损失不是新疆现行耕作制度下氮肥损失的主要途径。

朱兆良^[35]在总结国内研究结果的基础上,对我国农田中氮肥去向进行了初步估计:作物吸收 35%、氨挥发 11%、表观硝化-反硝化 34%、淋洗损失 2%、径流损失 5%、未知部分 13%。由此可见,土壤中的硝化-反硝化损失是氮素损失的重要途径。Pathak 和 Rao^[36]研究了经绿肥改造过的盐碱土中盐碱度对氮矿化、氨挥发的影响,认为氨挥发损失在盐土中可忽略不计,大多数氮损失可能是由反硝化作用引起的,且氮损失随盐度的增加有下降趋势。李建兵和黄冠华^[37]研究盐分对土壤硝化、反硝化过程的影响发现,盐分影响了土壤微生物的活性,进而抑制土壤中氮素的硝化与反硝化,并在一定程度上降低 N₂O 等反硝化气体进入大气,有利于环境保护。由于本试验未对¹⁵N 的氨挥发和硝化反硝化损失进行监测,无法阐明咸水滴灌棉田¹⁵N 的气态损失途径。因此,还需进一步开展相关研究。

4 结 论

适宜盐度的微咸水灌溉对棉花生长、氮素利用率及产量影响不大,但高盐度咸水灌溉会抑制棉花生长,导致棉花氮素利用率下降,从而降低产量。增加灌水量和施氮量,棉花产量及氮素吸收量均显著增加。微咸水处理的植物¹⁵N 回收率最高,其次为淡水,咸水灌溉处理的植物¹⁵N 回收率最低,增加灌水量和施氮量可显著提高植物¹⁵N 回收率。土壤¹⁵N 残留率随灌溉水盐度和施氮量的增加而增加,随灌水量的增加而降低。增加灌溉水盐度、灌水量和施氮量,¹⁵N 淋洗损失率显著增加。

参 考 文 献

- [1] Fereres E, Connor D J. Sustainable water management in agriculture//Cabrera E, CoBacho R. Challenges of the new water policies for the XXI century. Lisse: Balkema AA, 2004: 157—170
- [2] Pedrero E, Mounzer O, Alarcon J J, et al. The viability of irrigating mandarin trees with saline reclaimed water in a semi-arid Mediterranean region: A preliminary assessment. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 759—768
- [3] Ould Ahmed B A, Yamamoto T, Rasiah V, et al. The impact of saline water irrigation management options in a dune sand on available soil water and its salinity. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1/3): 63—72.
- [4] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉

- 水利用效率的影响. 农业工程学报, 2007, 23(3): 30—35.
- Wan S Q, Kang Y H, Wang D, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 30—35
- [5] 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(3): 177—183
- [6] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969—973. Zhang Y L, Lu W L, Zhang W, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969—973
- [7] Ali A, Tucker T C, Thompson T L, et al. Effect salinity and mixed ammonium and nitrate nutrition on the growth and nitrogen utilization of barley. Journal of Agronomy and Crop Science, 2001, 186: 223—228
- [8] Helalia A M, Al-Trpir O A, Al-Nabulsi Y A. The influence of irrigation water salinity and fertilizer management on the yield of alfalfa (*Medicago sativa* L.). Agricultural Water Management, 1996, 31(1/2): 105—114
- [9] 黄增荣, 隆小华, 李洪燕, 等. 江苏北部滨海盐土盐肥耦合对菊芋生长和产量的影响. 土壤学报, 2010, 47(4): 709—714. Huang Z R, Long X H, Li H Y, et al. Coupling effect of salt and fertilizer application on helianthus tuberosus in soils of north Jiangsu coastal mudflat different in salt concentration (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 709—714
- [10] Ceccolo G, Senn M E, Bustos D, et al. Genetic variability for responses to short-and long-term salt stress in vegetative sunflower plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(6): 882—890
- [11] Katerji N, Mastrorilli M, Lahmer F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 1—9
- [12] Vallejo A, Skiba U M, Garcia T L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(9): 2782—2793
- [13] Abril A, Baleani D, Casado-Murillo N, et al. Effect of wheat crop fertilization on nitrogen dynamics and balance in the Humid Pampas, Argentina. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 119(1/2): 171—176
- [14] 杨声激, 陈涛, 吴晓伟, 等. 应用¹⁵N示踪技术测定作物氮素的利用率及分配研究进展. 广西农业科学, 2007, 38(3): 291—295. Yang S G, Chen T, Wu X W, et al. Advances in utilization rate and distribution of nitrogen in crops plants with ¹⁵N tracing technique (In Chinese). Guangxi Agricultural Sciences, 2007, 38(3): 291—295
- [15] Wienhold B J, Trooien T P, Reihman G A. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated com in the northern great plains. Agronomy Journal, 1995, 87(5): 842—846
- [16] Allen S C, Jose S, Nair P R, et al. Competition for ¹⁵N-labeled fertilizer in a peanut (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. Plant and Soil, 2004, 263(1): 151—164
- [17] 代建龙, 董合忠, 段留生. 棉花盐害的控制技术及其机理. 棉花学报, 2010, 22(5): 486—494. Dai J L, Dong H Z, Du-an L S. Technology and mechanism in control of salt injury in cotton (In Chinese). Cotton Science, 2010, 22(5): 486—494
- [18] 侯振安, 李品芳, 龚江, 等. 膜下滴灌条件下不同土壤盐度和施氮量对棉花生长的影响. 土壤通报, 2007, 38(4): 681—686. Hou Z A, Li P F, Gong J, et al. Effect of different soil salinity levels and application rates of nitrogen on the growth of cotton under drip irrigation (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 681—686
- [19] van Hoorn J W, Katerjib N, Hamdyc A, et al. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil. Agricultural Water Management, 2001, 51(2): 87—98
- [20] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China —Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 117—127
- [21] 马丽娟, 侯振安, 闵伟, 等. 适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率. 农业工程学报, 2013, 29(14): 130—138. Ma L J, Hou Z A, Min W, et al. Drip irrigation with suitable saline water improves water use efficiency for cotton (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 130—138
- [22] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: Some new advances. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(1): 1—30
- [23] 宇万太, 周桦, 马强, 等. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响-兼论作物氮肥利用率. 土壤学报, 2010, 47(1): 90—96. Yu W T, Zhou Y, Ma Q, et al. Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 90—96
- [24] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1339—1343. Wang Z H, Wang B, Li S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1339—1343
- [25] 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价. 中国农业科学, 2000, 33(1): 76—81. Li S Q, Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dry land agro-ecosystem (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(1): 76—81
- [26] Dinnes D L, Karlen D L, Jaynes D B, et al. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. Agronomy Journal, 2002, 94: 153—171
- [27] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83—89. Zuo H J, Zhang Q, Xu L G. Farmland nitrogen leaching losses affecting

- factors and countermeasures research (In Chinese). Environmental Pollution & Control, 2008, 30(12): 83—89.
- [28] 朱龙辉, 马丽娟, 刘小玉, 等. 咸水滴灌棉田土壤水、盐和硝态氮分布与淋洗. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(6): 661—669. Zhu L H, Ma L J, Liu X Y, et al. Leaching and distributions of soil water, salt and nitrate in cotton field under drip irrigation with saline water (In Chinese). Journal of Shihezi University: Natural Science, 2011, 29(6): 661—669
- [29] 张国梁, 张申. 农田氮素淋失研究进展. 土壤, 1998, 30(6): 291—297. Zhang G L, Zhang S. Advancement of nitrogen leaching in farmlands (In Chinese). Soils, 1998, 30(6): 291—297
- [30] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240—242. Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 240—242
- [31] 梁飞, 田长彦. 土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响. 生态学报, 2011, 31(14): 3999—4006. Liang F, Tian C Y. Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3999—4006
- [32] 王淑莹, 唐冰, 叶柳, 等. NaCl 盐度对活性污泥系统脱氮性能的影响. 北京工业大学学报, 2008, 34(6): 631—635. Wang S Y, Tang B, Ye L, et al. Influence of NaCl salinity on nitrogen removal of activated sludge system (In Chinese). Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(6): 631—635
- [33] El-Karim A H A, El-Mahi Y E, El-Tilip A M. The influence of soil type, salinity and sodicity on ammonia volatilization in soil fertilized with urea. Annals of Agricultural Science (Cairo), 2004, 49: 401—411
- [34] 徐万里, 刘骅, 张云舒, 等. 新疆盐渍化土壤上氮肥氨挥发损失特征研究//中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集(中). 北京: 中国农业大学出版社, 2008. Xu W L, Liu H, Zhang Y S, et al. Study on the characteristics of ammonia volatilization from salinized soils in Xinjiang. China Soil Science Society of the Eleventh National Congress of the members and the Seventh Cross Strait Academic Exchange of soil fertilizer (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2008
- [35] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778—783. Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778—783
- [36] Pathak H, Rao D L N. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(6): 695—702
- [37] 李建兵, 黄冠华. NaCl 对粉壤土氮挥发及硝化、反硝化的影响. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 945—948. Li J B, Huang G H. Effect of NaCl on ammonia volatilization, nitrification and denitrification in silt loam soil. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 945—948

FATE OF FERTILIZER N IN SALINE WATER DRIP-IRRIGATED COTTON FIELD USING ¹⁵N TRACING METHOD

Zhang Wen Zhou Guangwei Min Wei Ma Lijuan Hou Zhenan[†]

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

Abstract Freshwater scarcity is a serious long-term hindrance to the agricultural production in arid and semi-arid regions. While the supply of brackish water is quite plenty, therefore the use of brackish water or saline water for irrigation has received considerable attention in those regions. A field experiment was carried out to study the effect of drip irrigation with saline or brackish water in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fields on fate of nitrogen in the soil relative to salinity of the water, irrigation rate, and N application rate. ¹⁵N-labeled urea was applied in the experiment field or plots to trace N movement in the soil. The experiment was designed to have three treatments ($S_{0.35}$, $S_{4.61}$, and $S_{8.04}$) in salinity of irrigation water (0.35, 4.61, and 8.14 dS m⁻¹, respectively), two levels in irrigation rate (405 mm and 540 mm), and two levels in N application rate (240 and 360 kg hm⁻², 360 kg hm⁻² is a common rate used by local farmers). The experiment shows that both cotton yield and N uptake were significantly lower in Treatment $S_{8.14}$ than those in Treatment $S_{0.35}$ and $S_{4.61}$, and there was no significant difference in either cotton yield or N uptake between Treatment $S_{0.35}$ and Treatment $S_{4.61}$. Salinity of the water affected mainly the number of cotton bolls and hence yields of the crop. Cotton yield and N uptake increased with irrigation rate and N application rate. Results of ¹⁵N tracing show that the plant ¹⁵N recovery rate ranged from 34.20% to 62.51%, and followed a curve that rose first and then declined with rising salinity of the water. Plant ¹⁵N recovery rate in Treatment $S_{4.61}$ was 30.70% higher than that in Treatment $S_{0.35}$ and 41.77% higher than that in Treatment

$S_{8.04}$. Higher irrigation rate or N application rate significantly increased plant ^{15}N recovery rate, however, higher salinity of the irrigation water decreased that. Treatment $S_{4.61}$ and Treatment $S_{8.04}$ was 4.03% and 23.88% higher, respectively, than Treatment $S_{0.35}$ in soil ^{15}N residue rate. Increase in N application rate from 240 kg hm^{-2} to 360 kg hm^{-2} increased soil ^{15}N residue rate by 9.51%. Total ^{15}N recovery rate was significant higher in Treatment $S_{4.61}$ than in Treatment $S_{0.35}$ and Treatment $S_{8.04}$. ^{15}N leaching rate in the treatments ranged from 0.35% ~ 3.59%, depending on treatment and was significantly affected by salinity of the irrigation water. When N application rate was low (240 kg hm^{-2}), ^{15}N leaching rate did not differ much between Treatment $S_{0.35}$ and Treatment $S_{8.04}$, but the rate in Treatment $S_{8.04}$ was 187% higher than that in Treatment $S_{0.35}$ and 84% higher than that in Treatment $S_{4.61}$. When N application rate was high (360 kg hm^{-2}), ^{15}N leaching rate increased significantly with salinity of the irrigation water, irrigation rate, and N application rate increased. The above-listed findings suggest that the use of brackish water in drip irrigation, if salinity of the water, irrigation rate and N application rate are all controlled to a proper level, would not affect growth, yield and N recovery of the cotton crop. But if the water is too high in salinity it would inhibit cotton growth and lower cotton yield and nitrogen use efficiency as well. In this experiment, 60.22% to 86.70% of the N fertilizer applied was recovered by the crop, 0.35% to 3.59% lost through leaching and the remaining 12% ~ 38% through ammonia volatilization, nitrification and denitrification. Therefore, a suitable “water-salt-fertilizer” management helps improve nitrogen fertilizer utilization efficiency and reduce N loss.

Key words Drip irrigation with saline water; Cotton; Dry matter weight; Yield; ^{15}N fate

(责任编辑:卢 萍)