

适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率

马丽娟, 侯振安^{*}, 闵伟, 段锦波, 侯森, 冶军

(石河子大学农学院资源与环境科学系, 石河子 832003)

摘要: 通过田间试验研究了不同灌溉水盐度和灌溉量对棉花水氮利用效率的影响。试验设置三种灌溉水盐度(电导率 EC): 0.35 (淡水)、4.61 (微咸水) 和 8.04 dS/m (咸水), 分别以 FW、BW 和 SW 表示; 两个灌溉量 405 和 540 mm, 分别以 I405、I540 表示。结果表明微咸水灌溉棉花干物质质量最高, 其次是淡水灌溉, 咸水灌溉最低。咸水灌溉棉花的氮素吸收量、产量显著降低, 但微咸水与淡水灌溉差异不显著。农田蒸散量随灌溉水量的增加而增加, 随灌溉水盐度的增加而降低。微咸水灌溉对滴灌棉花蒸散量和水分生产率影响不大, 但咸水灌溉导致蒸散量和水分生产率显著降低。¹⁵N 同位素标记试验结果表明, 三种灌溉水盐度下, 高灌量处理(540 mm) 较低灌量处理(405 mm) 棉花 ¹⁵N 回收率平均增加 7.51%, 土壤 ¹⁵N 回收率降低 13.20%, ¹⁵N 淋洗损失率增加 29.47%。不同灌溉水盐度处理棉花 ¹⁵N 回收率为 47.02%~59.86%, 微咸水灌溉棉花 ¹⁵N 回收率与淡水灌溉差异不大, 但咸水灌溉棉花 ¹⁵N 回收率较淡水和微咸水灌溉分别降低了 10.17% 和 15.23%。不同灌溉水盐度对土壤 ¹⁵N 残留率的影响较小, 为 16.75%~22.41%。¹⁵N 的淋洗损失率为 1.56%~4.71%, 表现为随灌溉水盐度的增加而显著增加, 咸水和微咸水灌溉 ¹⁵N 淋洗损失率平均较淡水灌溉分别增加了 80.53% 和 136.00%。上述结果说明适宜盐度和灌溉量的微咸水滴灌对棉花生长、产量以及水氮利用率影响不大, 但高盐度咸水灌溉会导致棉花减产, 水氮利用率显著降低。滴灌条件下, 氮素的淋洗损失也是氮肥损失的重要途径, 尤其是咸水和微咸水灌溉会加剧氮肥的淋洗损失风险。因此, 咸水微咸水灌溉条件下减少氮肥的淋洗损失是提高氮肥利用率的重要方面。

关键词: 灌溉, 氮, 盐份, 棉花, 产量, 水分利用率, ¹⁵N 回收率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.017

中图分类号: S562.06

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0130-09

马丽娟, 侯振安, 闵伟, 等. 适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 130—138.

Ma Lijuan, Hou Zhe'an, Min Wei, et al. Drip irrigation with suitable saline water improves water use efficiency for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 130—138. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着社会的发展和人口的增长, 水资源匮乏尤其是淡水资源的匮乏已成为不可忽视的重要问题, 充分合理的利用水资源已成为当前人们关注的焦点^[1]。同时, 由于工业和生活用水比例不断增加, 造成灌溉淡水资源非常短缺。微咸水一般指矿化度为 2~5 g/L 的含盐水, 在干旱区半干旱区广泛分布。据统计, 中国地下微咸水资源约为每年 200 亿 m³, 研究利用微咸水进行灌溉是解决灌溉水资源短缺的重要措施之一^[2]。国内外已进行了大量有关微咸水及咸水应用的实践^[3-4]。

新疆地处于干旱地区, 淡水资源相对紧缺, 农业用水主要依赖于地表水和浅层地下水进行灌溉, 但是, 近年来由于自然、人为等因素造成很多河流、湖泊、水库的水质恶化, 盐化现象明显, 水量不断减少, 有些地区的河流甚至出现断流现象^[5-6]。与此同时, 浅层地下水受气候、土壤、水文等因素的影响多为矿化度较高咸水和微咸水。因此, 在新疆发展咸水和微咸水灌溉, 提高水资源利用率有着非常重要的意义。棉花属于耐盐能力较强的一类经济作物, 在新疆广泛种植, 尤其是“九五”期间, 膜下滴灌技术在新疆棉花生产中的推广应用, 使得棉花的种植面积迅速扩大。有研究表明应用咸水进行灌溉时, 滴灌是较好的灌溉方式, 可降低盐分对作物生长的影响, 减少灌溉水量^[7-8]。近年来, 国内外学者对于咸水灌溉对土壤质量和作物生长与产量的影响、土壤盐分分布、灌溉制度优化、土壤改良等方面开展了大量研究^[9-12], 但对于咸水滴灌农田氮肥去向和作物水氮利用效率的研究还很薄弱。

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

收稿日期: 2012-12-13 修订日期: 2013-06-22

基金项目: 国家 973 计划项目 (2009CB825101-5); 国家自然科学基金资助项目 (30960210)

作者简介: 马丽娟 (1990—), 女, 主要研究方向为干旱区水土资源利用。石河子 石河子大学农学院资源与环境科学系, 832003。Email: mlj123651@163.com

※通信作者: 侯振安 (1972—), 男, 教授, 从事绿洲农业资源高效利用研究。石河子 石河子大学农学院资源与环境科学系, 832003。

Email: hzaty1@163.com

灌溉水盐度对棉花水、氮利用效率的影响, 为干旱半干旱地区咸水微咸水资源合理利用和滴灌棉花水氮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进行, 土壤类型为灌溉灰漠土, 质地为壤土, 有机质 16.82 g/kg, 全氮 1.06 g/kg, 速效磷 25.88 mg/kg, 速效钾 252 mg/kg。供试作物: 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, 试验中灌溉水盐度(电导率, EC)设 3 个水平, 分别为 0.35、4.61 和 8.04 dS/m(分别代表淡水、微咸水和咸水 3 种灌溉水类型, 以下分别以 FW、BW、SW 表示); 灌溉水量设两个水平, 为 405 和 540 mm(以下分以 I405 和 I540 表示)。

试验采用随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 共 18 个试验小区, 小区面积 54 m²。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, 用于收集土壤渗漏液。微区内氮肥使用 ¹⁵N 同位素(丰度 10%)标记尿素, 试验小区使用普通尿素。氮肥(N)用量为 360 kg/hm², 全部作追肥, 在棉花生长期分 6 次随水滴施, 初花期前开始, 吐絮期前结束。磷、钾肥在播种前一次性施入做基肥, 用量为 P₂O₅ 105 kg/hm², K₂O 60 kg/hm²。棉花种植方式为覆膜栽培, 一膜四行, 行距 30+60+30 cm, 种植密度 22.2×10⁴ 株/hm²。灌溉方式为膜下滴灌, 一膜二管, 滴头间距 40 cm, 滴头流量 2.6 L/h。各处理在棉花播种后均滴淡水 30 mm, 以保证出苗。棉花生长期共灌水 9 次, 盛蕾期开始, 吐絮初期结束。其它管理措施参照当地大田。

1.3 样品采集

试验小区内, 每次灌溉施肥前以及播种前和收获后, 采集不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)土壤样品, 测定土壤含水量; 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、蕾铃三部分, 70℃烘干 12 h, 称重; 粉碎后测定植株全氮含量; 在棉花吐絮期测定棉花产量, 最后实收计产。在微区内, 在每次灌溉后, 收集渗漏液, 测定渗漏液体积、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; 采集微区不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~

100 cm)土壤样品, 测定土壤含水量、全氮含量及 ¹⁵N 丰度。

1.4 测定指标与方法

土壤含水量采用烘干法测定, 土壤、植物及渗漏液全氮含量及 ¹⁵N 丰度由中国农科院原子能利用研究所测定。

1.5 数据处理

1) 作物水分生产率(water productivity of crop, WPC): 也称为农田水分生产率, 采用下式计算^[13]。

$$WPC=Y/ETc$$

$$ETc=I+P-L+\Delta W$$

式中, WPC 为作物水分生产率, kg/m³; Y 为作物产量, kg/hm²; ETc 为农田蒸散量, m³/hm²; I 为灌水量, m³/hm²; P 为有效降水量, m³/hm²; L 为农田水分渗漏损失量, m³/hm²; ΔW 为农田土壤净贮水量(1 m 深度)。

2) 灌溉水分生产率(water productivity of irrigation, WPI): 采用下式计算^[13]。

$$WPI=Y/Wi$$

式中, WPI 为灌溉水分生产率, kg/m³; Y 为作物产量, kg/hm²; Wi 为单位面积灌水量, m/hm²。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉对棉花干物质质量的影响

棉花盛铃期不同处理棉花各器官及总干物质积累量见表 1。总体上, 随着灌溉量的增大(由 405 mm 增加到 540 mm), 棉花茎、叶、蕾铃和总干物质质量都有所增加, 但不同灌溉水盐度间存在差异。在低灌量下(405 mm), 三种灌溉水处理(FW、BW、SW)棉花茎、叶干物质质量差异不大, 但 FW、BW 处理蕾铃和总干物质质量均显著高于 SW。FW 和 BW 处理蕾铃干物质质量较 SW 分别增加了 18.59%和 27.61%; 总干物质质量较 SW 分别增加了 14.57%和 17.15%。高灌量下(540 mm), 棉花茎、叶、蕾铃和总干物质质量都表现为 BW 处理最高, 其次是 FW 处理, SW 处理最低。BW 处理棉花总干物质质量比 FW 和 SW 处理分别增加了 9.61%和 20.17%。总体表明低盐度微咸水灌溉(4.61 dS/m)可促进棉花干物质积累, 显著增加棉花总干物质质量; 而高盐度咸水灌溉(8.04 dS/m)则会抑制棉花生长, 干物质质量显著降低。这与前人的研究结果基本一致^[14]。

2.2 咸水灌溉对棉花氮素吸收的影响

不同处理棉花各器官及整株氮素吸收量见表 2。棉花茎氮素吸收量灌溉水盐度和灌溉量影响较小, 处理间无显著差异。灌水量由 405 mm(I405)增加到 540 mm(I540), 棉花叶、蕾铃和氮素吸收

总量均有所增加。在低灌量下 (405 mm), 淡水灌溉 (FW) 棉花叶氮素吸收量显著高于微咸水灌溉 (BW) 和咸水灌溉 (SW), 而蕾铃和总氮素吸收量则表现为 FW、BW 处理显著高于 SW 处理; FW 和 BW 处理棉花氮素吸收总量较 SW 处理增加约 25%。在高灌量下 (540 mm), FW 和 BW 处理叶

氮素吸收量显著高于 SW 处理, 分别增加 20.77% 和 19.03%。蕾铃和氮素吸收总量则表现为 BW 处理最高, 其次是 FW 处理, SW 处理最低; 淡水 (FW) 和微咸水 (BW) 灌溉棉花氮素吸收总量差异不大, 均显著高于咸水处理 (SW), 分别较咸水处理 (SW) 增加 25.8% 和 32.3%。

表 1 不同处理对棉花干物质质量的影响
Table 1 Dry matter weight of cotton plant influenced by different treatments

处理 Treatment	灌溉水盐度 Water salinity	茎 Stem	叶 Leaf	蕾铃 Bud and boll	合计 Total
I405	FW	8.77bc	14.47ab	44.70bc	67.95b
	BW	8.32cd	13.06b	48.10ab	69.47b
	SW	8.40cd	13.21b	37.69d	59.30c
I540	FW	9.21b	14.50ab	44.78bc	68.49b
	BW	9.85a	15.39a	49.84a	75.07a
	SW	8.07d	13.48b	40.91cd	62.47c

注: 表格中同一列平均数后的相同字母表示差异未达到显著性水平 ($P < 0.05$)。FW, 淡水 (0.35 dS/m); BW, 微咸水 (4.61 dS/m); SW, 咸水 (8.04 dS/m); I405, 灌溉量 405 mm; I540, 灌溉量 540 mm。下同。

Note: The same letters following the data in the same column mean insignificant difference at $P < 0.05$. FW, fresh water (0.35 dS m⁻¹); BW, brackish water (4.61 dS m⁻¹); SW, saline water (8.04 dS m⁻¹). I405, 405 mm of irrigation amount; I540, 540 mm of irrigation amount. The same as below.

表 2 不同处理对棉花氮素吸收量的影响
Table 2 Nitrogen uptake of cotton influenced by different treatments

处理 Treatment	灌溉水盐度 Water salinity	灌溉水量 Irrigation amount	茎 Stem	叶 Leaf	蕾铃 Bud and boll	合计 Total
I405		FW	0.09a	0.27a	0.39b	0.75b
		BW	0.09a	0.23b	0.43ab	0.75b
		SW	0.08a	0.23b	0.29d	0.60c
I540		FW	0.10a	0.28a	0.40b	0.78a
		BW	0.08a	0.27a	0.47a	0.82a
		SW	0.07a	0.23b	0.33c	0.62c

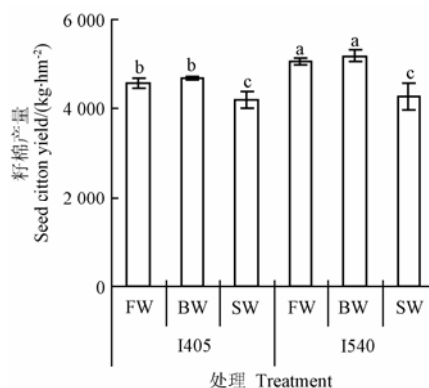
2.3 咸水灌溉对棉产量的影响

不同处理棉花籽棉产量见图 1。灌溉水盐度对棉花籽棉产量显著影响, 淡水 (FW) 和微咸水灌溉 (BW) 处理籽棉产量差异不大 ($p > 0.05$), 均显著高于咸水灌溉处理 (SW)。在 405 和 540 mm 两个灌溉量下, SW 处理籽棉产量较 FW、BW 处理分别降低 9.12%、11.32% 和 18.48%、21.71%。说明低盐度微咸水 (4.61 dS/m) 灌溉对棉花产量影响不大, 但高盐度咸水灌溉 (8.04 dS/m) 会导致棉花减产。从灌溉量来看, 在淡水 (FW) 和微咸水 (BW) 灌溉条件下, I540 处理棉花籽棉产量显著高于 I405 处理; 但咸水灌溉 (SW) 下, I540 处理棉花籽棉产量与 I405 处理差异不显著。

2.4 咸水灌溉对水分生产率的影响

不同处理对滴灌棉田蒸散量影响见图 2, 棉田蒸散量受灌溉水盐度和灌溉量影响显著, 总体表现为随着灌溉量的增加而增加, 随着灌溉水盐度的增加 (从 0.35 到 4.61 和 8.04 dS/m) 而降低。在三种灌溉盐度下, 灌溉量从 405 mm 增加到 540 mm, 蒸散量平均增加了 35.04%。低灌量下 (405 mm), SW 处理棉田蒸散量显著低于 FW 处理, 但是 FW

处理 BW 处理棉田蒸散量无显著差异; 高灌量下 (540 mm), FW 和 BW 处理农田蒸散量差异不大, 均显著高于 SW 处理, 分别高出 4.9% 和 3.3%。



注: FW, 淡水 (0.35 dS/m); BW, 微咸水 (4.61 dS/m); SW, 咸水 (8.04 dS/m); I405, 灌溉量 405 mm; I540, 灌溉量 540 mm。下同。
Note: FW, fresh water (0.35 dS m⁻¹); BW, brackish water (4.61 dS m⁻¹); SW, saline water (8.04 dS m⁻¹). I405, 405 mm of irrigation amount; I540, 540 mm of irrigation amount. The same as below.

图 1 不同处理对棉花籽棉产量的影响

Fig.1 Seed cotton yield influenced by different treatments

不同处理的作物水分生产率 (农田水分生产率) 和灌溉水分生产率见图 3。作物水分生产率和灌溉水分生产率受灌溉水盐度和灌溉量的影响显

著, 不同灌溉水盐度和灌溉量处理下作物水分生产率为 $0.70 \sim 1.02 \text{ kg/m}^3$, 平均为 0.88 kg/m^3 , 灌溉水分生产率为 $0.79 \sim 1.16 \text{ kg/m}^3$, 平均为 1.00 kg/m^3 。总体上随着灌水量的增加, 作物水分生产率和灌溉水分生产率显著降低, I540 处理作物水分生产率平均较 I405 处理降低 20.40%, 灌溉水分生产率降低 19.33%。在低灌量下 (405 mm), BW 处理作物水分利用率最高, SW 最低, FW 居中但与前二者差异均不显著; 高灌量下 (540 mm), FW 和 BW 处理作物水分利用率差异不大, 均显著高于 SW 处理, 分别较 SW 处理高 13.7% 和 18.6%。不同灌溉水盐度对棉花灌溉水分生产率的影响在两个灌溉量水平下相似, 均表现为 BW 处理灌溉水分生产率最高, 但与 FW 差异不显著, 均显著高于 SW 处理。405

和 540 mm 灌量下, FW、BW 处理灌溉水分生产率分别较 SW 增加 9.12%、11.32% 和 18.5%、21.7%。

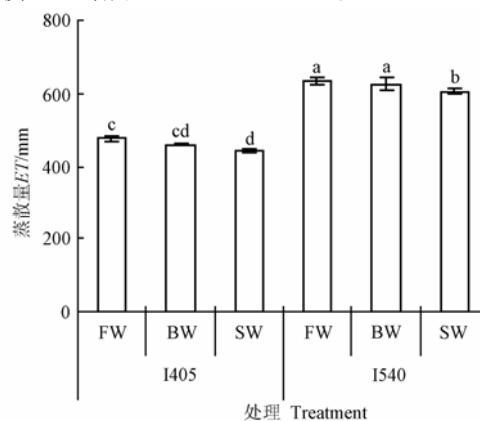


图 2 不同处理对农田蒸散量的影响

Fig.2 Evapotranspiration influenced by different treatments

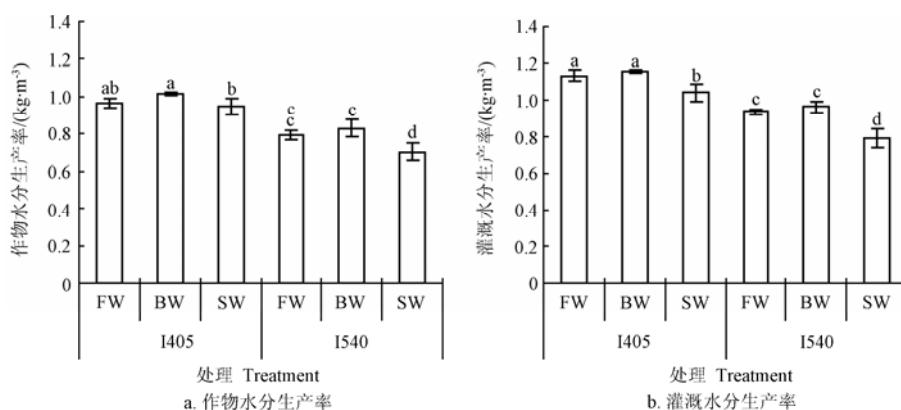


图 3 不同处理对作物水分生产率和灌溉水分生产率的影响

Fig.3 Water productivity of crop and water productivity of irrigation influenced by different treatments

2.5 咸水滴灌棉田的氮肥去向

不同处理滴灌棉花 ^{15}N 回收率 (氮肥利用率, NUE) 为 47.02%~59.86% (图 4a), 棉花 ^{15}N 回收率受灌溉水盐度和灌溉量的影响显著。增加灌溉量后棉花 ^{15}N 回收率有所增加, I540 处理棉花 ^{15}N 回收率较 I405 处理平均增加 7.51%。从灌溉水盐度来看, BW 处理棉花 ^{15}N 回收率最高 (平均为 57.12%), 其次是 FW 处理 (平均为 53.9%), 但二者之间差异不显著 ($p > 0.05$), SW 处理棉花 ^{15}N 回收率显著低于 FW 和 BW 处理, 平均分别降低 10.17% 和 15.23%。

不同处理土壤 ^{15}N 回收率 (土壤残留率) 见图 4b。土壤 ^{15}N 回收率受灌溉水盐度和灌溉量的影响显著, 回收率在 16.75%~22.41% 之间。总体上, 随着灌溉量的增加 (405 mm 增加到 540 mm), 土壤 ^{15}N 回收率显著降低, I540 处理较 I405 处理平均降低 13.20%。从灌溉水盐度来看, 低灌量下 (405 mm), SW 处理土壤 ^{15}N 回收率最高, BW 处理最低, FW 居中但与前二者差异均不显著; 高灌

量下 (540 mm), 不同灌溉水盐度对土壤 ^{15}N 残留率无显著影响。

不同处理土壤-作物系统 ^{15}N 总回收率为 68.99%~76.61% (图 4c)。灌水量由 405 mm 增加到 540 mm, 淡水 (FW) 和微咸水 (BW) 灌溉处理 ^{15}N 总回收率有所增加, 咸水灌溉 (SW) ^{15}N 总回收率有所降低, 但差异均未达到显著性水平 ($p > 0.05$)。低灌量下 (405 mm), FW 和 BW 处理 ^{15}N 总回收率高于 SW 处理, 但差异不显著; 高灌量下 (540 mm), SW 处理 ^{15}N 总回收率最低, BW 最高, 较 SW 增加 7.66%, 但 BW 处理 ^{15}N 总回收率与 FW 差异不显著。

从渗漏液中 ^{15}N 标记肥料的测定结果可以看出 (图 4d), 不同处理氮肥的淋洗损失率为 1.56%~4.71%。总体上, 随着灌溉水盐度和灌溉量的增加, 氮肥淋洗损失率显著增加。灌水量 540 mm 处理 (I540) ^{15}N 淋洗损失率较 450 mm 处理 (I405) 平均增加 29.47%。从灌溉水盐度来看, SW 处理 ^{15}N 淋洗损失率最高, 其次是 BW 处

理, FW 处理最低; 咸水 (SW) 和微咸水 (BW) 灌溉处理 ^{15}N 淋洗损失率平均较淡水灌溉 (FW) 分别增加了 80.53% 和 136.00%。上述结果表明, 不同处理棉田氮肥的损失率约为 23.39%~

31.01%, 其中淋洗损失率仅为 1.56%~4.71%。尽管滴灌条件下氮肥的淋洗很少, 但是灌溉水盐度对氮肥淋洗损失的影响明显, 随着灌溉水盐度的增加, 氮肥淋洗损失量显著增加。

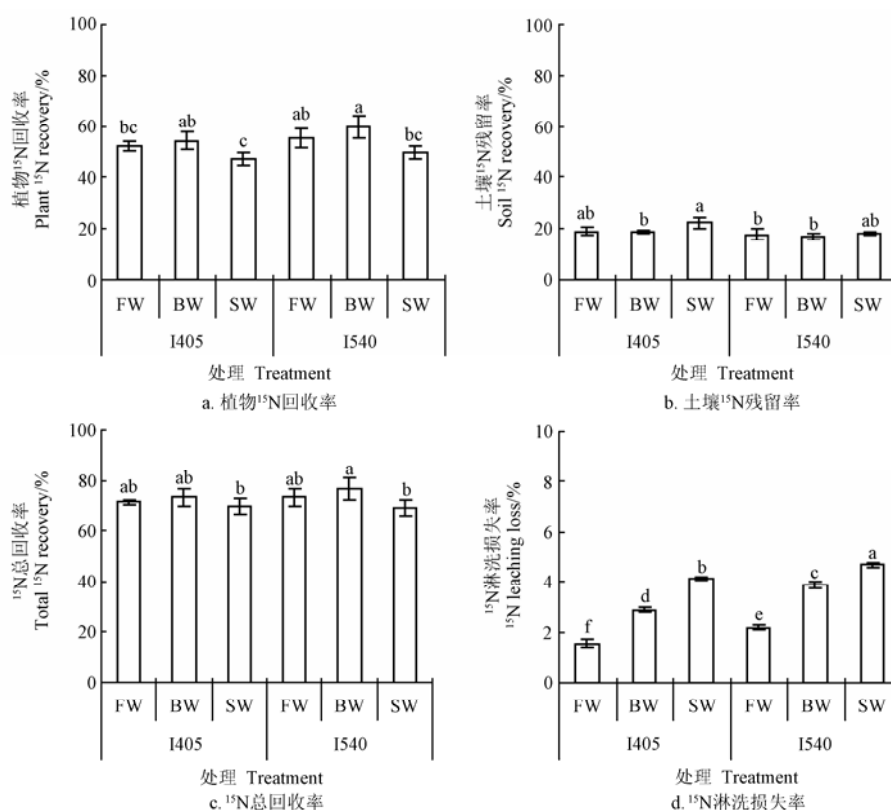


图 4 不同处理棉田氮肥的去向
Fig.4 Fate of ^{15}N in cotton field under different treatments

3 讨论

棉花生物量累积是获得高产、优质皮棉的基础。有学者认为微咸水灌溉改变了土壤物理化学特征, 会直接影响植物生长^[15]。棉花属于耐盐性作物, 在适宜棉花生长的范围内, 土壤盐分能增加棉花的干物质积累量^[14]。本研究结果也表明微咸水灌溉处理棉花干物质积累量显著高于淡水灌溉, 但咸水灌溉处理的棉花干物质积累量显著降低。氮素是植物生长必需营养元素之一, 在维持棉花生长及产量形成方面起着重要作用, 当土壤中盐分过多, 会产生竞争效应, 抑制植物对氮素的吸收^[16]。侯振安等^[17]研究认为随着土壤盐度的增加, 棉花氮素吸收量显著降低。刘志伟等^[18]研究发现随着 NaCl 含量的增加, 玉米氮积累量减少。但也有研究认为并不是所有盐度都对植物有害, 适当的盐分还会对植物吸收氮素有促进作用^[19], 不会导致产量降低。本研究中微咸水灌溉处理棉花氮素吸收量和产量最高, 但与淡水灌溉差异不显著, 均显著高于咸水灌溉处理;

这与前人研究基本一致^[20-21]。说明适度的微咸水灌溉对棉花生长和产量影响不大, 但咸水灌溉会明显抑制棉花生长, 导致减产。

蒸散量为植株蒸腾量和地表蒸发量的总和, 是水资源与水文研究中非常重要的量值, 尤其是在干旱半干旱地区^[22], 咸水中含有较高浓度的盐分离子, 具有较高的渗透压, 灌溉后土壤水势较低, 抑制了植株根系对水分的吸收; 同时, 土壤盐分影响植株的生理和生长发育, 间接影响到植株的吸水能力。有研究表明随着灌溉水盐度的增加, 带入作物根区的盐分也不断增加, 当盐分积累到一定程度就会影响作物的正常生长, 造成作物蒸腾减少^[23]。刘梅先等^[24]研究表明咸水滴灌条件下棉田蒸散量比淡水或微咸水灌溉棉田减少 8.0%, 但淡水和微咸水处理则无显著差异。本研究中, 咸水灌溉棉田蒸散量显著低于淡水处理, 但微咸水灌溉和淡水灌溉无显著差异, 说明适量的微咸水灌溉对棉田蒸散量影响不大。水分利用效率是衡量棉花用水效率的指标之一。王毅等^[25]研究认为适量微咸水滴灌有利于棉

花根系生长, 进而提高水分生产率。蒋静等^[26]研究也表明微咸水灌溉条件下, 一定的水分亏缺可以提高水分生产效率, 但随着年份的增加, 积盐达到一定水平, 水分生产效率会显著降低。本试验结果显示, 随着灌水量的增加, 水分生产率也逐渐降低; 微咸水灌溉作物水分生产率和灌溉水分生产率与淡水灌溉差异不大(低灌溉量下, 微咸水灌溉作物水分生产率略高于淡水灌溉), 但咸水灌溉水分生产率显著降低, 这与蒋静等^[26]和刘梅先等^[27]的研究一致。说明适宜盐度和灌溉量的微咸水灌溉不会导致水分生产率降低, 在一定程度上可以缓解淡水不足, 但高盐度的咸水灌溉会抑制植物生长, 导致蒸散量显著减少, 水分利用效率降低。

本研究应用 ^{15}N 同位素标记方法探讨了不同灌溉水盐度和灌溉量处理下棉田氮肥的去向, 结果表明滴灌棉田植物 ^{15}N 回收率(NUE)为 47.02%~59.86%。由于本试验中氮肥采用滴灌施肥方式, 所以氮肥利用率高于常规灌溉农田(30%~40%)^[28]; 但与 Hou 等^[29]对于滴灌条件下棉花 ^{15}N 回收率(NUE)为 34.25%~49.38%的研究结果相近。灌溉水盐度和灌溉量对棉花 ^{15}N 回收率影响显著, 高灌溉量(540 mm)较低灌溉量(405 mm)棉花 ^{15}N 回收率有所增加; 淡水和微咸水灌溉处理棉花氮肥利用率显著高于咸水灌溉, 但微咸水与淡水灌溉差异不显著。Chen 等^[30]研究也表明氮肥利用率会随着土壤盐度的增加而显著降低。因此, 微咸水灌溉对滴灌棉田氮肥利用率影响不大, 但高盐度的咸水灌溉会导致氮肥利用率降低。从土壤 ^{15}N 残留率来看, 不同处理为 16.75%~22.41%, 这与 Karlen 等^[31]研究结果(20%)基本相似。前期试验研究结果表明高盐度土壤(ECe 为 10.8 dS/m)滴灌棉田 ^{15}N 残留率显著高于中、低盐度土壤(ECe 分别为 6.3 和 2.5 dS/m)^[32], 这与本试验中 405 mm 灌溉量下灌溉水盐度对土壤 ^{15}N 残留率影响的研究结果一致; 但在 540 mm 灌溉量下, 不同灌溉水盐度对土壤 ^{15}N 残留率影响不大。可能是因为灌溉量增大导致咸水灌溉处理的 ^{15}N 肥料淋洗量增加, 所以 3 个灌溉水盐度处理间土壤 ^{15}N 残留率无明显差异。本试验研究也表明高灌溉量下土壤 ^{15}N 残留率显著减少, ^{15}N 淋洗损失率显著增加。

研究结果表明不同灌溉水盐度对滴灌棉田土壤-作物系统 ^{15}N 总回收率影响显著, 微咸水灌溉棉田显著高于咸水灌溉, 但与淡水灌溉棉田无显著差异; 土壤-作物系统 ^{15}N 总回收率变化范围为 68.99%~76.61%, 与 Wei 等^[33](75.82%)、Hou 等^[32](55.9%~61.3%)的研究结果相近, 说明不同灌溉水处理棉田土壤-作物系统 ^{15}N 的损失率约为

23%~31%。氮肥施入农田土壤后主要通过挥发, 淋洗, 硝化/反硝化等途径损失。一般认为氮挥发损失是北方石灰性土壤氮素损失的主要途径^[34]。Vander 等^[35]研究发现施用尿素后, 氮挥发可达 12%~46%。毛端明等^[36]认为氮肥施入旱地土壤中, 氮挥发率平均达到 47.1%。但徐万里等^[37]应用原位监测法对新疆绿洲棉田土壤氮挥发的研究结果表明土壤氮挥发损失仅占氮肥施用量的 0.18%~0.46%。董文旭等^[38]通过对华北农田土壤氮挥发原位测定研究发现氮挥发损失量占施氮量的 0.41%~5%。滴灌条件下由于氮肥(尿素)是溶解于水后随灌溉水滴入土壤, 并很快运移到下层土壤, 因此氮挥发并不强烈^[39], 氮肥的氮挥发损失率不超过 2%^[40]。有研究明膜下滴灌棉田氮肥的挥发损失率为 0.09%~0.14%^[41]。因此, 滴管条件下氮肥(尿素)随水施用, 氮挥发不是氮肥损失的主要途径。此外, 膜下滴灌农田灌水量尤其是单次灌水量较少, 因此可显著降低氮肥淋洗的风险。周和平等^[42]研究表明, 膜下滴灌可以有效的降低肥料和水分的淋洗, 有压盐保水保肥的作用。王肖娟等^[41]应用硝酸盐淋溶收集装置对氮素淋洗损失的监测结果表明滴灌棉田氮肥淋洗损失率为 1.69%~5.97%, Hanson 等^[43]对滴灌条件下氮肥淋洗损失的数值模拟结果显示氮肥淋洗损失率为 2.6%~6.8%。本研究中 ^{15}N 肥料的淋洗损失率为 1.56%~4.71%, 与上述结果基本吻合。已有研究认为硝化/反硝化损失可能是滴灌棉田氮肥损失的主要途径^[29,32]。王肖娟等^[41]通过间接估算法计算得到滴灌棉田氮肥的硝化/反硝化损失率为 15.94%~21.61%。由于滴灌是一种高频局部灌溉, 土壤湿润时间长, 导致局部的土壤通气性差; 同时, 氮肥随水施用, 也使局部土壤中无机氮(NH_4^+ 和 NO_3^-)浓度维持在较高水平, 从而加剧了氮素的硝化/反硝化损失。由于本研究未对 ^{15}N 的挥发损失和硝化/反硝化损失进行监测, 所以无法阐明不同盐度灌溉水对滴灌棉田氮肥挥发和硝化/反硝化损失的具体影响。因此, 还需要进一步开展相关研究。

综合以上分析, 尽管滴灌条件下氮肥的淋洗损失可能并不是氮肥损失的主要途径, 但是灌溉水盐度和灌溉量对氮肥淋洗损失影响显著, 总体表现为随着灌溉水盐度和灌溉量的增加, 氮肥淋洗损失量显著增加。咸水和微咸水灌溉加剧了滴灌棉田氮肥的淋洗损失, 增加了地下水的硝酸盐污染风险。其原因可能是由于咸水和微咸水灌溉导致土壤盐分积累, 一方面抑制了植物根系吸水, 降低了农田蒸散量, 使根区土壤含水量增加, 导致水分向深层土壤渗漏, 伴随着硝酸盐的淋洗发生。研究表明咸水

灌溉条件下农田蒸散量显著降低,蒸散量与土壤含水量有着明显的负相关关系^[44];根区土壤(0~1 m)水分渗漏量随着灌溉水盐度的增加而增加,硝态氮的淋洗量也显著增加^[45]。另一方面,盐分抑制了作物根系对氮素养分的吸收,导致土壤硝态氮含量增加,从而加大了硝酸盐的淋洗^[45,46]。因此,咸水灌溉条件下减少氮肥的淋洗损失也是提高氮肥利用率的重要方面。

4 结 论

适宜盐度和灌溉量的微咸水滴灌对棉花生长、产量以及水氮利用率影响不大,但高盐度咸水灌溉会导致棉花减产,水氮利用率显著降低。高灌量较低灌量棉花¹⁵N回收率增加,土壤¹⁵N回收率降低,¹⁵N淋洗损失率增加。微咸水灌溉对棉花¹⁵N回收率影响不大,但咸水灌溉显著降低棉花¹⁵N回收率。不同灌溉水盐度对土壤¹⁵N残留率的影响较小,但是¹⁵N的淋洗损失率随灌溉水盐度的增加而显著增加。滴灌条件下,氮素的淋洗损失也是氮肥损失的重要途径,尤其是咸水和微咸水灌溉会加剧氮肥的淋洗损失风险。因此,咸水微咸水滴灌条件下应控制氮肥的淋洗损失,以提高氮肥利用率,降低地下水污染风险。

【参 考 文 献】

- [1] 魏红国,杨鹏年,张巨松,等.咸淡水滴灌对棉花产量和品质的影响[J].新疆农业科学,2010,47(12):2344—2349. Wei Hongguo, Yang Pengnian, Zhang Jusong, et al. Influence irrigation by salt-water of and fresh-water on cotton yield and fiber quality[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(12): 2344—2349. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘静,高占义.中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J].水利水电技术,2012,43(1):101—104. Liu Jing, Gao Zhanyi. Advances in study and practice of brackish water irrigation in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(1): 101—104. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王艳娜,侯振安,龚江,等.咸水滴灌对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J].石河子大学学报:自然科学版,2007,25(2):158—162. Wang Yanna, Hou Zhenan, Gong Jiang, et al. The effect of drip irrigation with saline water to the distribution of salt and development and yield of cotton[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2007, 25(2): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李加宏,俞仁培.矿化灌溉水—土壤—作物系统中盐分迁移和循环的分室模型[J].土壤通报,1997,28(5):197—201. Li Jiahong, Yu Renpei. Mineralization of irrigation water-soil-cropping system: compartment model of salt migration and circulation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(5): 197—201. (in Chinese with English abstract)
- [5] 董新光,钟瑞森,刘丰.近50年博斯腾湖与孔雀河水盐演变过程[J].科技导报,2006,24(1):34—37. Dong Xinguang, Zhong Ruisen, Liu Feng. Differentiation of water-salt-interaction in Bostan lake and Peacock river in recent fifty years[J]. Science and Technology Review, 2006, 24(1): 34—37. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘友兆,付光辉.中国微咸水资源化若干问题研究[J].地理与地理信息科学,2004,2(20):57—60. Liu Youzhao, Fu Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 2(20): 57—60. (in Chinese with English abstract)
- [7] Oster JD. Irrigation with poor quality water[J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(3): 271—297.
- [8] 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002,21(4):73—77. Wang Quanjiu, Xu Yimin, Wang Jindong, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 73—77. (in Chinese with English abstract)
- [9] 侯振安,龚江,王艳娜,等.干旱区咸水滴灌土壤盐分的分布与积累特征[J].土壤通报,2008,39(1):18—26. Hou Zhenan, Gong Jiang, Wang Yanna, et al. Salt distribution and accumulation as affected by under-film drip irrigation with saline water in an arid region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 18—26. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王全九,孙海燕,姚新华.滴灌条件下石膏配比对盐碱土水盐运移特征影响[J].农业工程学报,2008,24(11):36—40. Wang Quanjiu, Sun Haiyan, Yao Xinhua. Effects of gypsum proportion on water and salt transport characteristics under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 36—40. (in Chinese with English abstract)
- [11] Singh R. Simulations on direct and cyclic use of saline waters for sustaining cotton-wheat in a semi-arid area of north-west India[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66: 153—162.
- [12] 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J].农业工程学报,2008,24(10):29—33. Wan Shuqin, Kang Yuehu, Wang Dan, et al. Effects of drip irrigation with saline water on tomato water use and soil salinity in semi-humid regions of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李远华,赵金河,张思菊,等.水分生产率计算方法及其应用[J].中国水利,2001,8:65—66. Li Yuanhua, Zhao Jinhe, Zhang Siju, et al. Calculation method and application of moisture productivity[J]. China Water Resources, 2001, 8: 65—66. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: some new advances. Critical Review in Plant Sciences, 2002, 21: 1—30.
- [15] Xiao Zhenhua, Prendergast B, Rengasamy P. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic conductivity[J]. Pedosphere, 1992, 2(3): 237—244.
- [16] 代建龙,董合忠,段留生.棉花盐害的控制技术及其机理[J].棉花学报,2010,22(5):486—494. Dai Jianlong, Dong Hezhong, Duan Liusheng. Technology and mechanism in control of salt injury in cotton[J]. Cotton Science, 2010, 22(5): 486—494. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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[J].土壤通报,

- 2007, 38(4): 681—686.
- Hou Zhenan, Li Pinfang, Gong Jiang, et al. Effect of different soil salinity levels and application rates of nitrogen on the growth of cotton under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 681—686. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘志伟, 黄冠华. 氯化钠不同浓度对夏玉米生长和吸氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 132—136.
- Liu Zhiwei, Huang Guanhua. Effect of different NaCl concentrations on plant growth and nitrogen uptake of summer corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 132—136. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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[J]. Agricultural Water Management, 2001, 51: 87—98.
- [20] 陈秀龙, 胡顺军, 李修仓. 膜下滴灌条件下不同矿化度对土壤水盐动态及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 7—12.
- Chen Xiulong, Hu Shunjun, Li Xiucang. Effects of irrigation with saline water on soil water-salt transport features and cotton yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [21] Leidi E O, Saiz J F. Is salinity tolerance related to Na accumulation in upland cotton (*Gossypium hirsutum*) seedlings[J]. Plant and Soil, 1997, 190: 67—75.
- [22] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 363—367.
- Wang Xinping, Li Xinrong, Kang Ersi, et al. Experiment on evapotranspiration of xerophyte communities in a revegetated desert zone[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 363—367. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王毅, 王久生, 李爱卓. 微咸水膜下滴灌对绿洲棉田土壤水盐特征的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(12): 158—162.
- Wang Yi, Wang Jiusheng, Li Aizhuo. The effects of brackish water drip irrigation on soil moisture and soil salinity in the oasis cotton fields[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(12): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘梅先, 杨劲松, 余美, 等. 膜下滴灌条件下滴头流量和水质对水分运移及蒸散规律影响研究[J]. 土壤通报, 2011, 4(26): 1330—1334.
- Liu Meixian, Yang Jinsong, Yu Mei, et al. Effects of emitter discharge rate and quality of irrigation water on the water transport and evapotranspiration under mulch drip irrigation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 4(26): 1330—1334. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王毅, 王久生, 李爱卓, 等. 微咸水膜下滴灌对绿洲棉花生长特征与产量的影响[J]. 节水灌溉, 2011(11): 25—27.
- Wang Yi, Wang Jiusheng, Li Aizhuo, et al. Influence of drip irrigation under film with brackish water on physiological characteristics and yield of oasis cotton in Xinjiang tarim basin[J]. Water Saving Irrigation, 2011(11): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [26] 蒋静, 冯绍元, 王永胜, 等. 灌溉水量和水质对土壤水盐分分布及春玉米耗水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(11): 2270—2279.
- Jiang Jing, Feng Shaoyuan, Wang Yongsheng, et al. Effect on water-salt distribution and evapotranspiration of spring maize under different water quantities and qualities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(11): 2270—2279. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28: 98—105.
- Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28: 98—105. (in Chinese with English abstract)
- [28] Rochester I J, Constable G A, Macleod D A. Cycling of fertilizer and cotton crop residue nitrogen[J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31: 97—609.
- [29] Hou Zhenan, Li Pinfang, Li Baoguo, et al. Effects of fertigation scheme on N uptake and N use efficiency in cotton[J]. Plant Soil, 2007, 290: 115—126.
- [30] Chen Weiping, Hou Zhenan, Wu Laosheng, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment[J]. Plant and Soil, 2010, 326: 61—73.
- [31] Karlen D L, Hunt P G, Matheny T A. Fertilizer ¹⁵N recovery by corn, wheat, and cotton grown with and without pre-plant tillage on Norfolk loamysand. Crop Sci, 1996, 36: 975—981.
- [32] Hou Zhenan, Chen Weiping, Xiao Li, et al. Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and ¹⁵N recovery[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96: 1483—1489.
- [33] Wei Changzhou, Ma Tengfei, Wang Xiaojuan, et al. The fate of fertilizer N applied to cotton in relation to irrigation methods and N dosage in arid area[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(3): 320—329.
- [34] Zhu Z L, Cai G X, Simpson J R, et al. Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north-central China[J]. Fertilizer Research, 1988, 18(2): 101—115.
- [35] Vander T J, Jarvis S C. Ammonia emission factors for N fertilizers applied to two contrasting grassland soils[J]. Environmental Pollution, 1997, 95(2): 205—211.
- [36] 毛端明, 向敏超, 马鄂超, 等. 新疆三种主要农田土壤尿素氮的损失研究[J]. 西北农业学报, 1993, 2(4): 34—38.
- Mao Duanming, Xiang Minchao, Ma Echao, et al. Study on lost ways of ureal nitrogen in Xinjiang three main agriculture soil[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 1993, 2(4): 34—38. (in Chinese with English abstract)
- [37] 徐万里, 汤明亮, 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]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(9): 197—201. (in Chinese with English abstract)
- [38] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 46—48.
- Dong Wenxu, Hu Chunsheng, Zhang Yuming. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 46—48. (in Chinese with English abstract)
- [39] Chua T T, Bronson K F, Booker J D, et al. In-season nitrogen status sensing in irrigated cotton[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1428—1438.
- [40] Freney J R, Simpson J R, Denmead O T, et al. Transformations and transfers of nitrogen after irrigating a cracking clay soil with a urea solution[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1985, 36: 685—694.

- [41] 王肖娟, 危常州, 张君, 等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2751—2758.
Wang Xiaojuan, Wei Changzhou, Zhang Jun, et al. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2751—2758. (in Chinese with English abstract)
- [42] 周和平, 徐小波, 兰玉军. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J]. 节水灌溉, 2006, 4: 8—13.
Zhou Heping, Xu Xiaobo, Lan Yujun. Review of Research on Soil Water and Salt Transportation under the Condition of Drip Irrigation under Film in Xinjiang Area[J]. Water Saving Irrigation, 2006, 4: 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [43] Hanson B R, Simunek J, Hopmans J W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86: 102—113.
- [44] McCabe MF, Wood EF. Scale influence on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(4): 271—285.
- [45] 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[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(6): 662—669.
Zhu Longhui, Ma Lijuan, Liu Xiaoyu, et al. Leaching and distributions of soil water, salt and nitrate in cotton field under drip irrigation with saline water[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2011, 29(6): 662—669. (in Chinese with English abstract)
- [46] Bowman D C, Devitt D A, Miller W W. The effect of moderate salinity on nitrate leaching from bermudagrass turf: a lysimeter study[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2006, 175: 49—60.

Drip irrigation with suitable saline water improves water use efficiency for cotton

Ma Lijuan, Hou Zhen'an^{*}, Min Wei, Duan Jinbo, Hou Sen, Ye Jun

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

Abstract: The scarcity of fresh water in arid regions makes saline water a valuable alternative water source for irrigation. In this study, field experiments were conducted to investigate the effect of saline water irrigation on growth, yield and water use efficiency of cotton plants (*Gossypium hirsutum* L.), as well as plant and soil ^{15}N recovery. Three irrigation water salinity levels were designed as 0.35, 4.61 and 8.04 dS/m, representing fresh water (FW), brackish water (BW), and saline water (SW), respectively. Two irrigation amounts were set as 405 mm (I405) and 540 mm (I540) under each irrigation water salinity treatment. Overall, the dry matter weight, N uptake, and yield of cotton increased with irrigation amount increasing from 405 mm to 540 mm, but there were differences under different water salinity treatments. The highest dry matter weight of cotton was found under the BW treatment, which was 9.6% and 20.2% higher than that under the FW and SW treatments, respectively. Plant N uptake and yield under SW treatment was significantly lower than that under FW treatments, but there were no significant difference between the BW and FW treatments. The ET of cotton field increased with irrigation amount increased, but decreased with water salinity increasing from 0.35 dS/m to 4.61 dS/m, and to 8.04 dS/m. BW had the similar ET with FW, but ET was significantly reduced under SW treatment. The water productivity of cotton and the water productivity of irrigation under different treatments ranged from 0.70 to 1.02 kg/m³ and from 0.79 to 1.16 kg/m³, respectively. The water productivity of cotton and the water productivity of irrigation were significantly higher in BW and FW than the SW treatment. The result of ^{15}N Isotopes tracer experiment showed that the plant ^{15}N recovery under the I540 treatments was on average 7.51% higher than that under I405 treatments. The soil ^{15}N recovery was reduced with 13.20% and ^{15}N leaching percentage was increased with 29.47% when irrigation amount increasing from 405 mm to 540 mm. The plant ^{15}N recovery under various treatments ranged from 47.02% to 59.86% under different water salinity treatments. The plant ^{15}N recovery under the SW treatment was 10.17% and 15.23% lower than that under the FW and BW treatments, respectively. The soil ^{15}N recovery under various treatments ranged from 16.75% to 22.14% and was slightly affected by the water salinity. The total recovery of ^{15}N in plants and soils under different treatments ranged from 68.9% to 76.6% with an average of 72.2%. The total recovery of ^{15}N was higher in BW and FW than the SW treatment. The ^{15}N leaching percentage ranged from 1.56% to 4.71% for different treatments and was significantly affected by the water salinity. The ^{15}N leaching percentage was significantly higher in SW and BW than the FW treatment, representing 80.53% and 136.00% increase, respectively. Those results suggest that the yield, water use efficiency, and ^{15}N recovery of cotton are not affected by brackish water with an optimum salinity level and irrigation amount. Saline water irrigation could cause cotton yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency decreased significantly. Nitrogen leaching is one of the major ways of N loss in cotton field under drip irrigation conditions. Saline water and brackish water irrigation may increase the risk of N leaching loss from the root zone. Therefore, minimizing the N leaching loss is very important for promoting N fertilizer use efficiency in cotton field under drip irrigation with saline water.

Key words: irrigation, nitrogen, salts, cotton, yield, water use efficiency, ^{15}N recovery

(责任编辑: 曾懿婷)