

文章编号: 1672-3317(2023)01-0080-07

不同水质滴灌与施氮措施下土壤盐分及关键离子变化研究

陈昊^{1,2}, 王军^{2*}, 马超², 胡海珠¹, 李久生²

(1.内蒙古大学, 呼和浩特 010021; 2.中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要:【目的】探明不同滴灌水质和施氮量对土壤盐分及关键离子变化的影响。【方法】基于棉花盆栽试验, 设置3个施氮水平, 分别为: F1 (255 kg/hm²)、F2 (315 kg/hm²) 和 F3 (375 kg/hm²); 3个滴灌水质, 分别为: Q1 (矿化度为 1.27 g/L), Q2 (矿化度为 3.03 g/L) 和 Q3 (矿化度为 4.90 g/L), 分析不同滴灌水质与施氮水平下的土壤盐分及关键离子的响应差异。【结果】棉花生育末期, 微咸水与咸水滴灌下的土壤总盐量与 Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度分别相比地下水滴灌高 14%~78%、42%~197%与 58%~253%; 土壤钠吸附比 (SAR) 与可交换性钠百分比 (ESP) 相比地下水滴灌提高了 5%~109%与 48%~90%; 较高施氮量 (315、375 kg/hm²) 下的土壤总盐量、Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度相比低施氮量 (255 kg/hm²) 降低了 11%~70%、6%~42%与 21%~138%, 土壤 SAR 与 ESP 分别降低了 5%~27%与 3%~19%。【结论】土壤盐分总量随着滴灌水质矿化度的增加而增加, 适宜的施氮量 (315 kg/hm²) 能够降低土壤盐分总量和关键离子量, 缓解土壤盐碱化。

关键词: 滴灌; 微咸水; 土壤盐碱化; 离子; 水肥一体化

中图分类号: S278

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022396

OSID:



陈昊, 王军, 马超, 等. 不同水质滴灌与施氮措施下土壤盐分及关键离子变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 80-86.

CHEN Hao, WANG Jun, MA Chao, et al. The Combined Effect of Drip Irrigation Quality and Nitrogen Fertilization on Soil Salinity and Na⁺ and Ca²⁺ Concentration in Soil Water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 80-86.

0 引言

【研究意义】水资源短缺是制约中国西北干旱区农业可持续发展的关键因素。近年来, 滴灌技术因其节水、增产和增效的优势^[1], 在我国西北地区得到了大面积推广应用, 成为缓解干旱区水资源短缺的重要途径。另一方面, 西北干旱区地下微咸水资源丰富, 合理利用微咸水资源已成为缓解该地区水资源短缺的有效措施。然而, 不合理的微咸水灌溉极易导致土壤盐碱化^[2]。因此, 有必要重点分析干旱区微咸水不同灌溉与施肥措施对土壤盐分的影响。

【研究进展】微咸水灌溉后的土壤盐分水平取决于微咸水矿化度。张刘东等^[3]认为, 灌溉水矿化度越高, 土壤盐分累积量则越大。Wei 等^[4]研究表明, 矿化度为 2.0 g/L 的微咸水灌溉可以缓解土壤盐渍化, 而 3.5~5.0 g/L 的微咸水灌溉则会增加土壤盐分累积量。同时, 微咸水中的盐分会影响土壤微生物活性^[5], 进而影响作物对氮素的转化和吸收。适当的微咸水灌溉和施肥管理措施能够促进作物生长, 且不增加

土壤含盐量^[6]。侯森等^[7]发现, 微咸水灌溉条件下增施氮肥可以降低盐分对棉花生长的胁迫程度。Zhang 等^[8]发现, 盐分胁迫下增施氮肥可以提高棉花产量和氮素利用效率。邵志远等^[9]研究表明, 适当增施氮肥可降低土壤盐分累积量。Che 等^[10]研究表明, 微咸水灌溉条件下, 棉花蕾期和花铃期施氮量为 255 kg/hm² 和 375 kg/hm² 能够有效降低根区土壤盐分累积量。然而, Min 等^[11]认为, 增施氮肥可以促进作物的蒸腾作用, 从而增加土壤水分流失, 导致根区可溶性盐的淋洗量减少, 上层土壤盐分发生累积。

【切入点】近年来, 国内外学者围绕微咸水灌溉施肥措施对土壤盐分与作物生长的影响开展了大量研究。然而, 灌溉水质与施氮量之间的交互作用机制尚不清楚, 微咸水灌溉条件下的施氮水平对土壤盐分变化的影响尚存在争议。同时, 旱区土壤和水质的时空变异性进一步增加了微咸水灌溉下土壤盐分演变的复杂性和不确定性。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究基于控制性棉花盆栽试验, 研究不同滴灌水质与施氮量对土壤盐分总量、关键离子量、钠吸附比 (SAR)、可交换钠百分比 (ESP) 的影响, 进而确定适宜的灌溉水质与施氮量, 为我国干旱区微咸水灌溉的水肥科学管理提供技术支撑。

收稿日期: 2022-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52179055, 51790513); 中国水科院基本业务费专项 (ID110145B0022021); 科技兴蒙专项 (NMKJXM202105)

作者简介: 陈昊 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1255741795@qq.com

通信作者: 王军 (1984-), 男, 正高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: junwangcau@iwhr.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

露天盆栽试验于 2020 年 5—10 月在新疆生产建设兵团第一师水利局水土保持试验站内 (81°11'43"E,

40°37'22"N, 海拔 1 017 m) 进行。该地区属于典型的暖温带极端大陆性干旱荒漠气候, 年平均气温为 11.3 °C, 年平均降水量为 45.7 mm, 年际蒸发量为 1 877~2 559 mm。地下水埋深为 3~5 m。研究区土壤性质如表 1 所示。

表 1 试验地土壤物理性质

Table 1 Physical properties of soil in the study plots

土层深度/cm	体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/(cm ³ cm ⁻³)	颗粒质量百分数/%			土壤质地
			<0.002 mm	0.05~0.002 mm	0.05~2.0 mm	
0~20	1.54	0.22	1.04	45.15	53.79	砂壤土
20~40	1.52	0.21	0.99	43.24	55.76	砂壤土
40~60	1.44	0.24	0.89	40.44	58.76	砂壤土

注 土壤分类基于美国农业部的土壤分类系统, 由土壤颗粒百分比确定。

1.2 试验设计

供试棉花品种为“新陆早 46 号”。采用露天控制性盆栽试验, 盆栽所用容器为外径 40 cm、高 70 cm 的 PVC 桶。在桶底铺设 5 cm 厚度的反滤层并开设 3 个直径为 1.5 cm 的圆孔, 以便排水和通气。土壤风干后过 5 mm 筛, 按平均田间土壤体积质量 (1.50 g/cm³) 在反滤层上方分层填土, 每层填土 5 cm, 共 60 cm。0~40 cm 土层土壤的初始盐分和离子量如表 2 所示。

试验考虑了灌溉水质和施氮量 2 个因素。施氮量水平包括: 低氮 (F1, 255 kg/hm²)、中氮 (F2, 315

kg/hm²)、高氮 (F3, 375 kg/hm²)。灌溉水质包括: 地下水 (Q1, 矿化度为 1.27 g/L)、微咸水 (Q2, 矿化度为 3.03 g/L) 和咸水 (Q3, 矿化度为 4.90 g/L)。同时, 设置深层地下水不施氮作为对照 (CK)。试验共计 10 个处理, 每个处理设置 10 个重复。地下水和微咸水的化学性质如表 3 所示。

表 2 试验地土壤盐分初始值

Table 2 Initial values of soil salinity in the study plots

土壤盐分量/(g kg ⁻¹)	Na ⁺ 量/(mmol L ⁻¹)	K ⁺ 量/(mmol L ⁻¹)	Mg ²⁺ 量/(mmol L ⁻¹)	Ca ²⁺ 量/(mmol L ⁻¹)
5.57	66.17	3.75	2.79	56.40

表 3 灌溉水化学特性

Table 3 Irrigation water chemical characteristics in the study area

水质	TN 量/(mg L ⁻¹)	K ⁺ 量/(mg L ⁻¹)	Na ⁺ 量/(mg L ⁻¹)	Ca ²⁺ 量/(mg L ⁻¹)	Mg ²⁺ 量/(mg L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ 量/(mg L ⁻¹)	HCO ₃ ²⁻ 量/(mg L ⁻¹)	Cl ⁻ 量/(mg L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ 量/(mg L ⁻¹)
地下水	0.356	4.92	259	83.4	34.0	<0.1	76.7	605	206
微咸水	1.79	12.6	615	141	67.5	5.30	78.1	1 190	839
咸水	0.585	20.3	1320	216	108	2.65	124	2 010	1 370

1.3 灌水与施肥

棉花生育期内灌水定额根据作物需水量确定。 ET_c 采用计算为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中: ET_c 为作物需水量 (mm/d); K_c 为参考作物系数^[12], 取值参考 Yang 等^[13]研究结果, 苗期 (0~30 d) 为 0.23, 蕾期 (31~80 d) 为 0.23~0.88, 花铃期 (81~135 d) 为 0.88, 吐絮期 (136~180 d) 为 0.88~0.45; ET_0 为参考作物需水量, 利用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算。

灌水方式为膜下滴灌, 滴头流量为 1.6 L/h。灌水间隔期为 7 d, 每次灌水量为 125% ET_c 。试验周期内共灌水 11 次; 在蕾期、花铃期和吐絮期分 3 次施氮, 施氮量分别为设计总施肥量的 30%、40% 和 30%。灌水施氮过程如图 1 所示。

1.4 土壤 SAR、ESP 与阳离子测定

在棉花蕾期、花铃期与吐絮期分别利用直径为

4 cm 的土钻采集 0~20、20~40、40~60 cm 土样, 分层测定 0~60 cm 土壤含盐量。将土样在阴凉处风干后研磨、过 2 mm 筛。取风干土 10 g, 按 1:5 的土水比加入蒸馏水 50 mL, 振荡 3 min, 浸提后利用土壤电导仪测定土壤溶液的电导率。根据 Yang 等^[13]提出的土壤电导率 ($EC_{1:5}$) 与盐分质量比之间的标定关系计算土壤含盐量。同时, 利用离子色谱仪 (881 Compact IC Pro) 测定土壤浸提液中的无机盐离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+) 量。在此基础上, 计算土壤钠吸附比 (SAR , (mmol/L)^{0.5}) 和土壤可交换性钠百分比 (ESP , %), 计算方法详见文献[14]。

1.5 统计分析

采用方差分析 (ANOVA) 检验灌溉水质和施氮量单因素和交互作用对土壤盐分、阳离子、 SAR 和 ESP 的影响 ($p < 0.05$)。利用 SPSS19.0 软件对数据进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 和显著性分析。

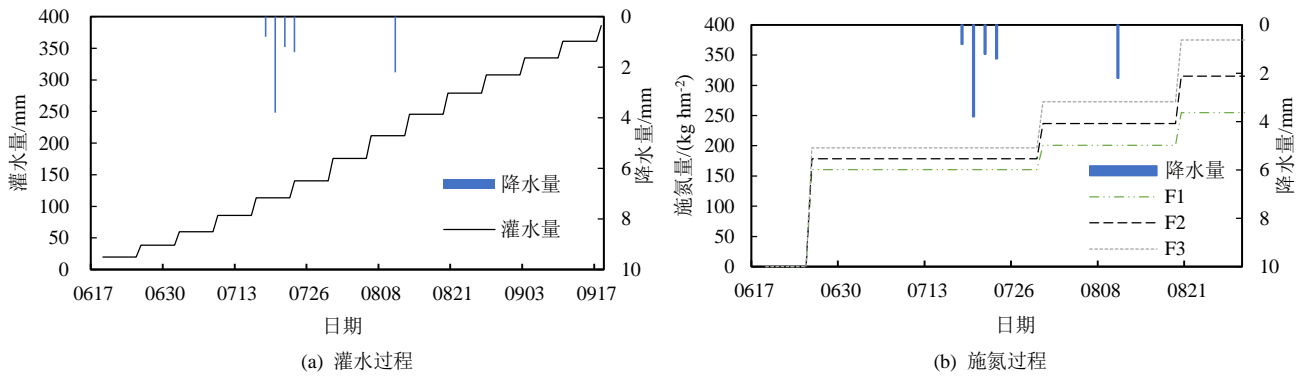


图1 灌溉和施氮过程

Fig.1 Irrigation and fertilization process

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量变化

不同处理下的棉花各生育阶段土壤含盐量变化如图2所示。全生育期内土壤含盐量呈增加趋势。棉花吐絮期地下水、微咸水和咸水灌溉下的土壤含盐量相比蕾期分别高 21.6%~38.5%、23.6%~54.0%和 24.5%~51.7%。灌溉水质对棉花全生育期土壤含盐量的影响显著(表4) ($p < 0.05$), 土壤含盐量随着灌溉水矿化度的增加而增加。棉花蕾期、花铃期、吐絮期, 微咸水与咸水灌溉下的土壤含盐量相比地下水灌溉分别高 11.1%~30.9%、11.8%~26.1%、14.2%~54.9%与 28.7%~70.5%、32.1%~63.1%、40.9%~78.2%。

表4 不同因素土壤含盐量方差分析

Table 4 Variance analysis of soil salinity during different growth stages

因子	蕾期	花铃期	吐絮期
灌溉水质	0.004(*)	0.007(*)	0.000(**)
施氮量	0.000(**)	0.005(*)	0.001(*)
灌溉水质×施氮量	0.437	0.073	0.028(*)

注 *、**分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上差异显著, 下同。

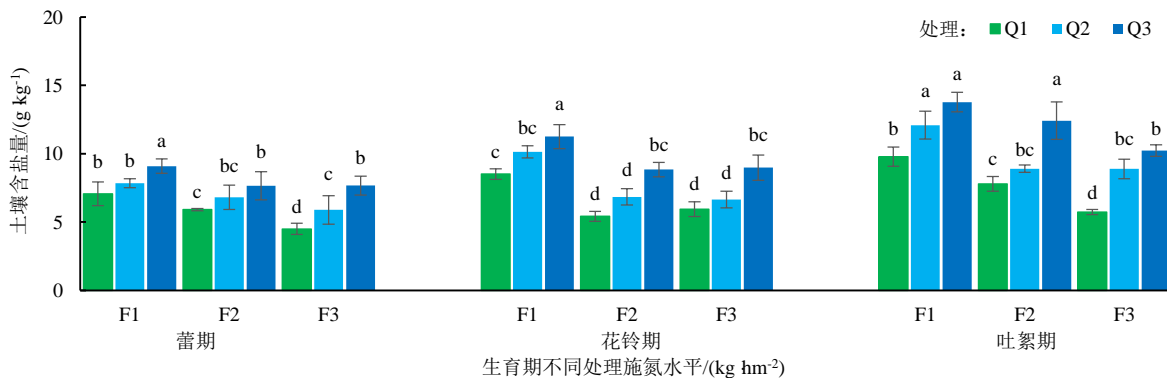


图2 棉花生育期不同处理土壤含盐量差异

Fig.2 Differences in soil salt content of different treatments during cotton fertility

2.2 土壤阳离子变化

不同处理下的棉花吐絮期土壤阳离子差异如图3所示。土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度分

别为 31.7~103.0、0.2~0.8、29.0~129.6 mmol/L 和 1.9~5.6 mmol/L, 可见土壤中主要阳离子为 Na^+ 与 Ca^{2+} 。由表5可知, 灌溉水质显著影响土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 施氮量显著影响棉花不同生育阶段的土壤含盐量 ($p < 0.05$)。由图2可知, 在棉花蕾期、花铃期与吐絮期, 地下水滴灌下的 F2 处理与 F3 处理下的土壤含盐量相比 F1 处理分别降低 19.4%、57.1%、25.4%与 56.9%、43.2%、70.4%; 微咸水滴灌条件下, F2 处理与 F3 处理下的土壤含盐量比 F1 处理分别降低 15.2%、48.2%、35.7%与 8.6%、52.5%、22.2%; 咸水滴灌条件下, F2 处理与 F3 处理下的土壤含盐量相比 F1 处理分别降低 18.7%、27.3%、11.0%与 18.4%、25.3%、24.7%。上述结果表明, 适量增施氮肥能够降低土壤含盐量。同时, 棉花吐絮期灌溉水质与施氮量的交互作用对土壤含盐量存在显著影响 ($p < 0.05$)。地下水灌溉条件下, 不同施肥处理之间的差异显著; 微咸水灌溉下, 吐絮期低施氮量 (F1) 与中、高施氮量 (F2、F3) 处理之间差异显著, 而中、高施氮量之间则无显著差异; 咸水灌溉下, 吐絮期高施氮量与中、低施氮量处理之间差异显著, 中、低施氮量之间无显著差异。地下水、微咸水和咸水灌溉条件下的适宜施氮量分别为 F3 (375 kg/hm^2)、F2 (315 kg/hm^2) 和 F3 (375 kg/hm^2)。

物质的量浓度 ($p < 0.05$)。相比地下水灌溉, 微咸水与咸水滴灌条件下的土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度分别升高 42.0%~73.6%、86.7%~186%、

1.9%~78.1% 与 129.3%~197.2%、57.6%~252.8%、15.1%~157.1%。可见, 随着灌溉水矿化度的增加, 土壤中无机阳离子物质的量浓度也随之增加。

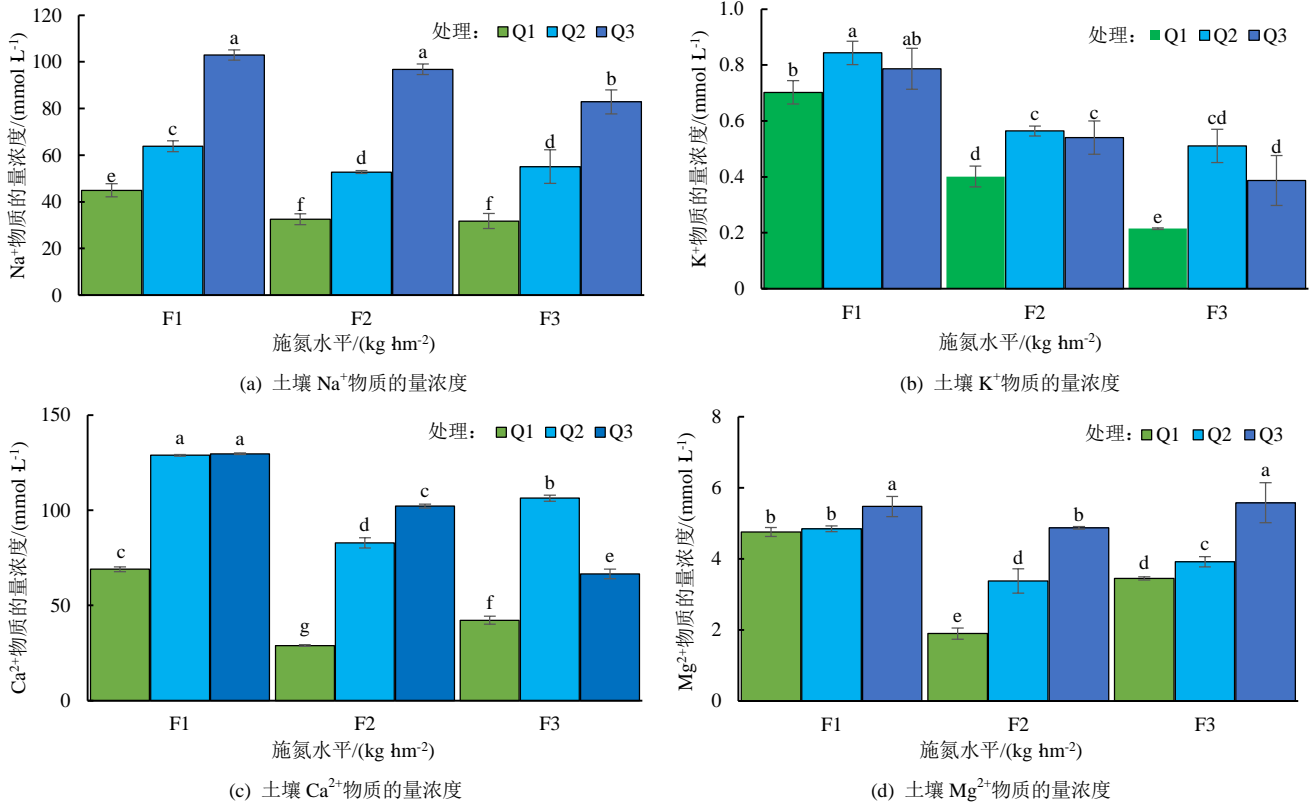


图3 棉花吐絮期根区 (0~40 cm) 土壤阳离子物质的量浓度变化

Fig.3 Changes in soil salt cation content in the root zone (0~40 cm) of cotton at the batting stages

表5 土壤阳离子方差分析

Table 5 Variance analysis of soil cation

因子	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
灌溉水质	0.000(**)	0.050	0.000(**)	0.001(*)
施氮量	0.002(*)	0.000(**)	0.000(**)	0.008(*)
灌溉水质×施氮量	0.011(*)	0.388	0.000(**)	0.000(**)

施氮量显著影响吐絮期土壤 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度 ($p < 0.05$)。由图3可知, 4种离子物质的量浓度均随着施氮量的增加而降低。地下水滴灌条件下, 中、高施氮量 (F2、F3) 处理下的土壤 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度分别相比低施氮量 (F1) 处理降低了 37.9%、75.1%、138.4%、150.9% 与 41.5%、226.9%、63.4%、37.9%。微咸水滴灌条件下, 中、高施氮量处理下的土壤 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度分别比低施氮量处理降低 20.9%、49.5%、55.6%、43.5% 与 15.7%、65.1%、21.2%、23.7%。咸水滴灌条件下, 中、高施氮量处理下的土壤 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 物质的量浓度分别相比低施氮量处理降低了 6.3%、45.4%、26.9% 与 24.2%、103.0%、94.8%; 中施氮量处理土壤中 Mg^{2+} 物质的量浓度比低施氮量处理低 12.3%, 高施氮量处理土壤中 Mg^{2+} 物质的量浓度比低施氮量处理高 19.7%。此外, 灌溉水质与施氮量

的交互作用显著影响土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度 ($p < 0.05$)。说明在微咸水和咸水灌溉条件下, 施氮量的增加有效降低了土壤阳离子物质的量浓度。

2.3 土壤 SAR 变化情况

不同处理下的棉花不同生育阶段根区土壤 SAR 变化如表6所示。地下水滴灌条件下, 棉花吐絮期土壤 SAR 比蕾期高 59.6%~139.4%; 微咸水与咸水滴灌条件下, 棉花吐絮期土壤 SAR 比蕾期分别降低 23.6%~55.3% 与 22.3%~30.8%。

不同灌溉水质下的土壤 SAR 差异显著 ($p < 0.01$), 土壤 SAR 随着灌溉水矿化度的增加而增加。在棉花蕾期、花铃期、吐絮期, 微咸水与咸水滴灌条件下的土壤 SAR 分别相比地下水滴灌高出 136.7%~149.0%、0.8%~27.6%、4.8%~12% 与 206.8%~554%、44.9%~121.1%、57.2%~108.9%。蕾期和花铃期施氮量处理对根区土壤 SAR 影响显著 ($p < 0.05$)。棉花吐絮期, 地下水滴灌条件下的 F3 处理土壤 SAR 分别比 F1 处理和 F2 处理低 12.2% 与 27.0%; 微咸水滴灌下 F3 处理的土壤 SAR 分别相比 F1、F2 处理低 5.0% 与 8.3%; 咸水滴灌条件下 F1 处理的土壤 SAR 比 F2、F3 处理分别低 5.6% 与 10.4%。此外, 灌溉水质与施氮量的交互作用对棉花全生育期土壤 SAR 的影响达到显著水平 ($p < 0.05$)。

微咸水灌溉下,棉花蕾期高施氮量(F3)与低施氮量(F1)处理间的土壤 SAR 差异显著;咸水灌溉下,棉花吐絮期低施氮量与高施氮量之间的土壤 SAR 差异显著。

表 6 不同生育阶段土壤 SAR
Table 6 SAR at different growth stages

处理	SAR/((mmol L ⁻¹) ^{0.5})		
	蕾期	花铃期	吐絮期
F1Q1	3.95±0.43de	6.24±0.26b	7.42±0.43cd
F1Q2	9.61±0.97bc	6.43±1.05b	7.78±0.28c
F1Q3	12.21±0.25b	9.04±0.24a	12.53±0.29a
F2Q1	5.27±0.58de	5.91±0.59b	8.41±0.52c
F2Q2	12.47±4.2b	5.96±0.17b	8.03±0.18c
F2Q3	16.16±1.49a	8.62±0.76a	13.22±0.3ab
F3Q1	2.77±0.36e	4.17±0.86c	6.62±0.76d
F3Q2	6.88±0.69cd	5.32±0.41b	7.41±0.94cd
F3Q3	18.08±2.5a	9.21±0.93a	13.82±1.04a
方差分析			
Q	**(<i>p</i> =0.000)	**(<i>p</i> =0.000)	**(<i>p</i> =0.000)
F	*(<i>p</i> =0.012)	*(<i>p</i> =0.016)	NS(<i>p</i> =0.066)
F×Q	*(<i>p</i> =0.003)	*(<i>p</i> =0.047)	*(<i>p</i> =0.020)

2.4 土壤 ESP 变化

不同处理下根区(0~40 cm)土壤 ESP 差异如表 7 所示。地下水滴灌条件下,棉花吐絮期土壤 ESP 比蕾期高 53.9%~126.6%;微咸水与咸水滴灌条件下,棉花吐絮期土壤 ESP 比蕾期分别低 20.6%~44.7%与 17.8%~24.0%。灌水水质显著影响根区土壤 ESP (*p*<0.01),土壤 ESP 随着灌溉水矿化度的增加而增加。在棉花蕾期、花铃期、吐絮期,咸水滴灌下的土壤 ESP 比地下水与微咸水滴灌分别高出 17.0%~434.6%、36.0%~64.2%、51.5%~71.9%与 22.9%~127.7%、41.3%~107%、48.0%~90.2%。蕾期和花铃期,施氮量对土壤 ESP 的影响显著 (*p*<0.05)。棉花吐絮期,地下水灌溉条件下 F1、F3 处理的土壤 ESP 比 F2 处理分别低 10.6%与 19.3%;微咸水灌溉下,F1、F3 处理土壤 ESP 比 F2 处理分别低 2.8%与 7.0%;咸水灌溉下,F2、F3 处理土壤 ESP 比 F1 处理分别降低 4.4%与 7.8%。双因素方差分析结果表明,灌水水质与施氮量的交互作用对棉花全生育期土壤 ESP 产生了显著性影响 (*p*<0.05)。微咸水灌溉棉花蕾期高施氮量(F3)与低施氮量(F1)处理的土壤 ESP 差异显著;咸水灌溉吐絮期低施氮量与高施氮量之间的土壤 ESP 差异显著。这说明在微咸水滴灌下,适当增施氮肥可以降低土壤 ESP;咸水滴灌下,增施氮肥可提高土壤 ESP。

表 7 不同生育阶段土壤 ESP

Table 7 ESP during different growth stages

处理	ESP/%		
	蕾期	花铃期	吐絮期
F1Q1	5.55±0.55de	8.4±0.27b	9.99±0.56cd
F1Q2	12.59±1.1b	8.75±1.31b	10.43±0.34c
F1Q3	15.47±0.27b	11.89±0.28a	15.81±0.29b
F2Q1	7.26±0.77cd	8.09±0.73b	11.17±0.6c
F2Q2	15.53±4.32b	8.14±0.21b	10.74±0.2c
F2Q3	19.48±1.48a	11.42±0.89a	16.54±0.3ab
F3Q1	3.98±0.49e	5.83±1.14c	9.02±0.95d
F3Q2	9.34±0.86c	7.35±0.53b	9.98±1.15cd
F3Q3	21.27±2.31a	12.06±1.12a	17.15±1.07a
方差分析			
Q	**(<i>p</i> =0.000)	**(<i>p</i> =0.000)	**(<i>p</i> =0.000)
F	*(<i>p</i> =0.006)	*(<i>p</i> =0.014)	NS(<i>p</i> =0.052)
F×Q	*(<i>p</i> =0.002)	*(<i>p</i> =0.048)	*(<i>p</i> =0.023)

3 讨论

灌溉水质是决定土壤盐分水平的主要因素。本研究结果表明,土壤含盐量与离子量随着灌溉水矿化度的增加而增加,这与 Yuan 等^[15]的研究结果相同。随着灌溉水中含盐量的增加,大量阳离子进入土壤,使土壤化学性质发生改变。如 Na⁺量升高会导致土壤黏粒分散、破坏团聚体结构,降低土壤渗透性^[8],形成离子毒害并诱发盐分胁迫^[16];另一方面,二价阳离子(Ca²⁺和 Mg²⁺)能够置换出土壤胶体中所吸附的 Na⁺,促进胶体絮凝,改善土壤结构^[17]。高矿化度灌溉水质(4.90 g/L)条件下,土壤中 Na⁺量提高 129.3%~197.2%。土壤盐碱化程度(SAR 与 ESP)也随之增加,说明高矿化度水质灌溉能够显著提高土壤 SAR 与 ESP,这与邵建荣等^[18]的研究结果相同。

适当增施氮肥能够降低土壤盐分量。土壤含盐量随着施氮量的增加而降低,这与 Che^[10]和谢承陶^[19]研究结果相同。Machado 等^[20]也得出了类似结论,即适当增施氮肥可降低土壤盐分累积,不同生育期施氮量对土壤盐分的影响不同。焦会青等^[21]研究表明,施氮可促进土壤中 Na⁺/Ca²⁺的竞争置换,通过生成 CaSO₄ 沉淀在一定程度上缓解土壤盐分累积。这可能是由于适当增施氮肥降低了土壤盐分关键离子量^[22],进而降低土壤盐分。较高施氮量(315、375 kg/hm²)降低了 Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度,这可能是由于增施氮肥能够促进土壤中水稳性重团聚体的形成^[23],从而吸附游离态 Na⁺,降低土壤中关键离子量。当土壤阳离子随着施氮量的增加而减少时,土壤 SAR 与 ESP 也随之降低,进而降低土壤盐渍化程度。

灌水水质与施氮量之间存在交互作用,进而影响

土壤盐分量^[10]。Ould 等^[24]发现, 灌溉水质和施氮量的交互作用对土壤盐分具有显著影响。本文结果表明, 较高的施氮量 (315、375 kg/hm²) 和较低矿化度灌溉水质 (1.27、3 g/L) 组合能够显著降低土壤含盐量和 Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度, 这可能是因为适量增加施氮量能够提高土壤中的 NO₃⁻量, 缓解土壤中氯化物的影响^[25]。随着施氮量的增加, 土壤中的 NH₄⁺与 Na⁺产生竞争作用^[26], 水稳性团聚体吸附 Na⁺^[23], 降低土壤含盐量。但是, 当灌溉水矿化度过高时, 增施氮肥会导致土壤盐碱化程度加剧。咸水灌溉条件下, 高施氮量处理土壤 SAR 与 ESP 分别提高了 4.5% 和 3.7%。这可能是因为土壤盐分胁迫越大对氮素矿化和硝化过程的抑制作用越强^[27], 盐分胁迫成为主要影响因素。同时, 过量施氮会导致土壤酸化, 硝化反应产生的大量 H⁺进入土壤^[28], 进一步诱导碱性阳离子直接释放到土壤溶液中, 加速了土壤盐渍化^[15]。

4 结论

1) 土壤盐分和离子量随着灌溉水矿化度的增加而增加。棉花生育末期, 微咸水与咸水滴灌条件下土壤含盐量、Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度分别比地下水滴灌高 14.2%~78.2%、42%~197.2% 与 86.7%~252.8%; 土壤 SAR 与 ESP 分别高 4.8%~108.9% 与 48.0%~90.2%。

2) 适当增施氮肥能够降低土壤盐分与关键离子量。较高施氮量 (315、375 kg/hm²) 条件下, 土壤盐分与 Na⁺、Ca²⁺物质的量浓度分别比低施氮量 (255 kg/hm²) 处理低 8.6%~70.4% 与 6.3%~41.5%、21.2%~138.4%; 土壤 SAR 与 ESP 分别降低 5.0%~27% 与 2.8%~19.3%。

3) 综合考虑土壤盐分量、离子物质的量浓度、SAR 与 ESP, 建议咸水和微咸水滴灌条件下适宜施氮量为 315 kg/hm²。

参考文献:

[1] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effects of water and fertilizer coupling under drip irrigation on yield, quality and water and nitrogen utilization of greenhouse tomato[J]. Chinese Agricultural Science, 2015, 48(4): 713-726.

[2] REDA Abdel-aziz. Impact of treated wastewater irrigation on soil chemical properties and crop productivity[J]. International Journal of Water Resources and Arid Environments, 2015, 4(1): 30-36.

[3] 张刘东, 王庆明. 咸水非充分灌溉对土壤盐分分布的影响及 SWAP 模型模拟[J]. 节水灌溉, 2015(7): 32-35.
ZHANG Liudong, WANG Qingming. Effects of inadequate saline water irrigation on soil salinity distribution and SWAP model simulation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(7): 32-35.

[4] WEI Chenchen, LI Fahu, YANG Peiling, et al. Effects of irrigation

water salinity on soil properties, N₂O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation[J]. Water, 2019, 11(8): 1 548.

[5] KHUMOETSILE Mmolawa, DANI Or. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review[J]. Plant and Soil, 2000(1/2): 163-190.

[6] 严晔端, 李悦. 发展咸淡水混灌技术合理开发地下水资源[J]. 地下水, 2000(4): 153-156.
YAN Yeduan, LI Yue. Developing saline-freshwater mixed irrigation technology to rationally develop groundwater resources[J]. Groundwater, 2000(4): 153-156.

[7] 侯森, 侯振安, 冶军, 等. 咸水滴灌条件下棉花生长和氮素吸收对水氮的响应[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1 882-1 887.
HOU Sen, HOU Zhenan, YE Jun, et al. Response of cotton growth and nitrogen uptake to water and nitrogen under saline water drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2010, 47(9): 1 882-1 887.

[8] ZHANG Dongmei, LI Weijiang, XIN Chengsong, et al. Lint yield and nitrogen use efficiency of field-grown cotton vary with soil salinity and nitrogen application rate[J]. Field Crops Research, 2012(138): 63-70.

[9] 邵志远, 蒋静, 张毅, 等. 不同灌水和施氮处理对燕麦产量、耗水特性和土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 84-89.
SHAO Zhiyuan, JIANG Jing, ZHANG Yi, et al. Effects of different irrigation and nitrogen treatments on oat yield, water consumption characteristics and soil salinity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 84-89.

[10] CHE Zheng, WANG Jun, LI Jiusheng. Effects of water quality, irrigation amount and nitrogen applied on soil salinity and cotton production under mulched drip irrigation in arid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021(247): 106 738.

[11] MIN Wei, HOU Zhenan, MA Lijuan, et al. Effects of water salinity and application rate on water-and n-use efficiency of cotton under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land, 2013, 6(4): 454-467.

[12] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源综合卷[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004.
ZHANG Zonghu, LI Lierong. China groundwater resources comprehensive volume[M]. Beijing: China Map Publishing House, 2004.

[13] YANG Pengju, HU Hongchang, TIAN Fuqiang, et al. Crop coefficient for cotton under plastic mulch and drip irrigation based on eddy covariance observation in an arid area of northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2016(171), 21-30.

[14] WESLEY W, TANJI K. Agricultural Salinity Assessment and Management, Second Edition[M]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 2012(71): 78-79.

[15] YUAN Chengfu, FENG Shaoyuan, HUO Zailin, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2019(212): 424-432.

[16] XIONG Liming, KAREN S. Schumaker, ZHU Jiankang. Cell signaling during cold, drought, and salt stress[J]. Plant Cell, 2002, 14(Suppl): S165-S183.

[17] ZHANG Xunchang, NORTON L D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils[J]. Hydrology, 2002, 260: 194-205.

[18] 邵建荣, 张凤华, 董艳, 等. 干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 216-221.
SHAO Jianrong, ZHANG Fenghua, DONG Yan, et al. Study on the influencing factors of typical soil salinization under brackish water drip irrigation in arid areas[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2015, 33(6): 216-221.

[19] 谢承陶. 盐渍土改良原理与作物抗性[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
XIE Chengtao. Principles of saline soil improvement and crop

- resistance[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993.
- [20] MACHADO, RICARDO. Soil Salinity: Effect on vegetable crop growth. management practices to prevent and mitigate soil salinization[J]. Horticulturae, 2017, 3(2): 13.
- [21] 焦会青, 盛钰, 赵成义, 等. 基于 COMSOL 软件的绿洲盐渍化土壤中多离子耦合运移模型构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 100-107.
JIAO Huiqing, SHENG Yu, ZHAO Chengyi, et al. Construction of multi-ion coupling migration model in oasis salinization soil based on COMSOL software[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 100-107.
- [22] WANG Xiaobing, WANG Xiaoli, SHENG Haijun, et al. Excessive nitrogen fertilizer application Causes Rapid degradation of greenhouse soil in China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(2): 1 527-1 534.
- [23] DONG Xinliang, LI Mozhi, LIN Qimei, et al. Soil Na^+ concentration controls salt-affected soil organic matter components in Hetao region China[J]. Journal of Soils & Sediments: Protection, Risk Assessment, & Remediation, 2019(3): 1 120-1 129.
- [24] OULD, INOUE M, MORITANI S. Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 165-170.
- [25] POOJA Shrivastava, RAJESH Kumar. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(2): 123-131.
- [26] EDUARDO Kawakami, DERRICK Oosterhuis, JOHN Snider. Effect of salinity on cotton nitrogen uptake and assimilation of urea applied with N-(n-Butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide[J]. Summaries of Arkansas Cotton Research, 2010(589): 40-45.
- [27] NAMRATHA Reddy, CROHN David M. Effects of soil salinity and carbon availability from organic amendments on nitrous oxide emissions[J]. Geoderma, 2014(235): 363-371.
- [28] 蔡泽江, 孙楠, 王柏仁, 等. 几种施肥模式对红壤氮素形态转化和 pH 的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2 877-2 885.
CAI Zejiang, SUN Nan, WANG Bairen, et al. Effects of several fertilization modes on nitrogen transformation and pH in red soil[J]. Agricultural Sciences of China, 2012, 45(14): 2 877-2 885.

The Combined Effect of Drip Irrigation Quality and Nitrogen Fertilization on Soil Salinity and Na^+ and Ca^{2+} Concentration in Soil Water

CHEN Hao^{1,2}, WANG Jun^{2*}, MA Chao², HU Haizhu¹, LI Jiusheng²

(1. Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: 【Objective】 Drip irrigation using brackish water is a way to relieve water shortage in arid regions such as Xinjiang, but it needs a good management to reduce its detrimental consequence. The aim of this paper is to investigate the combined effect of irrigation water quality and nitrogen fertigation on changes in soil salinity and Na^+ and Ca^{2+} concentration in soil water with cotton planted. 【Method】 A pot experiment was conducted from June to October 2020 at Alaer in Xinjiang. There are three nitrogen treatments: 255 kg/hm² (F1), 315 kg/hm² (F2) and 375 kg/hm² (F3), and three irrigation water quality treatments: 1.27 g/L (Q1), 3.03 g/L(Q2), 4.90 g/L (Q3). Irrigation with groundwater was taken as the control. In each treatment, we measured soil salt content, and concentration of Na^+ and Ca^{2+} in soil water. 【Result】 Depending on nitrogen fertigation, saline water irrigation increased total soil salt content and Na^+ and Ca^{2+} concentrations by 14%~78%, 42%~197% and 58%~253%, respectively, compared to groundwater irrigation. It also increased soil sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) by 5%~109% and 48%~90%, respectively. Increasing nitrogen application to 315 kg/hm² and 375 kg/hm² reduced soil salinity and Na^+ and Ca^{2+} concentrations by 11%~70%, 6%~42% and 21%~138%, respectively, and reduced soil SAR and ESP by 5%~27% and 3%~19%, respectively, compared to the control. 【Conclusion】 Soil salinity increased with the increase in irrigation water salinity, but increasing nitrogen application to 315 kg/hm² could reduce soil salinity and Na^+ and Ca^{2+} concentrations in soil water, thereby alleviating salinity stresses.

Key words: drip irrigation; brackish water; soil salinization; ions; fertigation

责任编辑: 韩洋