

长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N₂O 排放的影响

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:通过田间试验研究了咸水微咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质及 N₂O 排放的影响。试验设置 3 种灌溉水, 盐度(电导率, EC)分别为 0.35、4.61、8.04 dS·m⁻¹(分别代表淡水、微咸水和咸水);同时,设置 0、360 kg·hm⁻²(360 kg·hm⁻² 为当地棉田推荐氮肥用量)2 个施氮水平。结果表明:灌溉第一年,微咸水处理的棉花产量最高,分别较淡水和咸水处理高出了 6.50%和 22.46%;随灌溉年限的增加,棉花产量随灌溉水盐度的增加而显著降低,咸水灌溉显著抑制棉花产量。土壤含水量、电导率、铵态氮含量随灌溉水盐度的增加而增加,土壤 pH、全氮、有机质、硝态氮含量则随灌溉水盐度的增加而减小;咸水和微咸水灌溉显著抑制土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性,施用氮肥可提高酶活性;土壤 N₂O 排放通量随灌溉水盐度的增加显著降低,施氮肥促进了土壤 N₂O 的排放,土壤 N₂O 排放通量与土壤有机质、铵态氮、硝态氮、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关,而与土壤 pH、电导率和全氮无相关性。

关键词:咸水;滴灌;氮肥;棉花产量;土壤理化性质;N₂O 排放通量

中图分类号:S275.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1583-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.017

Effects of Drip Irrigation with Saline Water on Cotton Yield, Soil Physical and Chemical Properties, and Soil N₂O Emission

ZHANG Wen, ZHOU Guang-wei, MIN Wei, MA Li-juan, HOU Zhen-an*

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

Abstract: This field study was conducted to investigate the effects of irrigation water salinity and N application rates on cotton yield, soil physical and chemical properties, and soil N₂O emission. The experiment included three levels of irrigation water salinity: 0.35, 4.61, and 8.14 dS·m⁻¹, referred as fresh water, brackish water, and saline water, respectively. The N application rates were 0 and 360 kg·hm⁻² (a commonly used rate by local farmers). In the first year of the study, cotton yields were highest in the brackish water treatment, 6.50% higher than in the fresh water treatment and 22.46% higher than in the saline water treatment. In the subsequent years, cotton yields decreased with increasing irrigation water salinity. As irrigation water salinity increased, soil moisture, soil salinity, and soil NH₄⁺-N concentrations increased significantly, but soil pH, organic matter contents, total N concentrations, and NO₃⁻-N concentrations decreased. Irrigation with either brackish or saline water significantly reduced activities of soil nitrate reductase and nitrite reductase, whereas applying N fertilizer promoted their activities. Soil N₂O emission was significantly decreased by irrigation with salt-containing water. On the contrary, it was increased by N application. Soil N₂O emission was correlated positively with soil organic matter, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, nitrate reductase activity, and nitrite reductase activity, but negatively with soil moisture. Soil pH, soil salinity, and total soil N had no significant effects on N₂O emissions.

Keywords: saline water; drip irrigation; nitrogen fertilizer; cotton yield; soil physical and chemical properties; N₂O emission

收稿日期:2014-01-06

基金项目:国家自然科学基金(31360504)

作者简介:张 文(1990—),女,新疆人,硕士生,主要从事干旱区水氮资源高效利用。E-mail: zhangwenshu@sina.com

*通信作者:侯振安 E-mail: hzaty1@163.com

世界范围内的生活用水和工业用水增加,导致现代灌溉农业面临可用于灌溉的优质水源日益减少的问题^[1]。因此,在干旱半干旱地区应用咸水微咸水进行农田灌溉已经成为必然^[2]。咸水灌溉一方面提供了作物生长所需要的水分,另一方面也将盐分带入土壤,影响土壤的理化性质。张余良等^[3]研究结果表明微咸水灌溉导致土壤孔隙的减少,影响土壤的渗透性,短期灌溉还能破坏土壤水稳性团聚体;若长期使用很可能导致盐分在作物根系层的聚集,从而抑制作物对水分和养分的吸收,影响作物的产量^[4]。

氮素是作物生长发育过程中必需的大量元素之一,适宜的氮肥施用对所有土壤都很重要,特别是盐渍土,合理的氮肥施用可能会减轻盐分对作物生长和产量的不利影响^[5]。过量施用氮肥一方面会导致土壤理化性质的改变,如 pH 降低导致土壤酸化、有效磷以及代换性 Ca、Mg、Na 含量减少,硝态氮、铵态氮含量增加等^[6];另一方面也会带来严重的环境污染,过量氮肥会随降雨和灌溉水淋入到土壤深层,或经氨挥发、硝化反硝化作用,以氨(NH₃)和氮氧化物(NO_x)等气体形式进入到大气中^[7]。N₂O 是一种重要的温室气体,在百年尺度上单分子 N₂O 的全球增温潜能是 CO₂ 的 298 倍^[8]。大气中 N₂O 可以参与多种光化学反应,破坏大气臭氧层,进而引起全球气候变暖^[9]。土壤通过硝化和反硝化过程向大气中排放 N₂O 是全球 N 循环中最重要的生物过程,已受到国内外的广泛关注^[8-9]。目前,国内外学者对农田生态系统 N₂O 排放进行了大量的田间观测和机理性研究。这些研究主要包括以下几个方面:(1)化肥和有机肥的施用对 N₂O 排放的影响^[10];(2)种植制度或耕作方式对 N₂O 排放的影响^[11];(3)土壤理化特性对 N₂O 排放的影响^[12-13];(4)气候变化对 N₂O 排放的影响^[14]。

土壤盐分也是影响农田 N₂O 排放的重要因素之一,Strpanov 等^[15]研究发现,盐土中的反硝化主要产生 N₂O,因为这种土壤含有少量可以将 N₂O 还原为 N₂ 的细菌。Inubushi 等^[16]模拟试验研究表明,高盐度(EC>1 dS·m⁻¹)会抑制土壤硝化过程,低盐度的影响

不明显,但不同盐度(0~0.6 mol·L⁻¹ NaCl)对 N₂O 排放的影响均不显著。目前关于盐分对土壤 N₂O 排放的研究多采用室内模拟试验,不能真实反映农田的实际情况。同时,针对咸水微咸水灌溉对土壤 N₂O 排放影响的研究还很少。

本研究针对新疆干旱区咸水微咸水灌溉的必然趋势和现实问题,研究农田不同施氮水平下咸水微咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质及 N₂O 排放通量的影响,为干旱区咸水微咸水资源的合理利用以及氮素的有效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验在石河子大学农学院试验站(44°18'N,86°02'E)进行,土壤类型为灌耕灰漠土,供试作物为棉花。2009—2013 年连续进行了 5 年咸水微咸水滴灌试验,设置了 3 种灌溉水,电导率(EC)分别为 0.35(淡水)、4.61(微咸水)、8.04(咸水)dS·m⁻¹,分别以 FW、BW 和 SW 表示。三种灌溉水的化学组成见表 1。每种灌溉水处理设 0、360 kg·hm⁻² 2 个施氮水平(分别以 N0、N360 表示),其中 360 kg·hm⁻² 为当地大田推荐氮肥用量。试验采用随机区组设计,共 6 个处理,每个处理重复 3 次,共 18 个试验小区,小区面积 27 m²。

棉花种植采用覆膜栽培,一膜 4 行,行距配置为 30 cm+60 cm+30 cm,株距 10 cm,播种密度 22.2×10⁴ 株·hm⁻²。灌溉方式为膜下滴灌,一膜两管,滴灌带间距 90 cm。4 月 13 日播种,为确保出苗,各处理均在播种后滴灌淡水 45 mm。棉花生长期共灌水 9 次,自 6 月上旬开始至 8 月下旬结束,总灌溉量 450 mm。试验中氮肥(尿素)全部做追肥,在棉花生长期分 5 次等量随水滴施。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量分别为 105 kg·hm⁻² 和 60 kg·hm⁻²,全部作基肥在播种前一次性施入,其他栽培管理措施参照当地大田。

在 2013 年(试验第 5 年)进行咸水灌溉对棉花产量、土壤理化性质及 N₂O 排放的研究,并记录棉花各

表 1 三种灌溉水的化学组成

Table 1 Chemical characteristics of irrigation water used in this study

灌溉水盐度 Water salinity (EC)/ dS·m ⁻¹	pH	钠吸收比 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

生育期的出现日,其中:出苗期4月21日,现蕾期6月2日,开花期7月1日,吐絮期9月11日,最后于9月27日测定产量。同时在试验期间对各灌溉水处理的棉花土壤 N₂O 排放通量进行监测,并测定土壤相关理化性质,探讨长期咸水微咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N₂O 排放的影响。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 气体样品的采集与分析

采用静态箱-气相色谱法对棉田 N₂O 排放进行采样测定。采样箱由底座和顶箱两部分组成,底座(横截为 60 cm×60 cm)长期固定于田间小区,采样前往底座中注水以防底座与顶箱结合处漏气。箱体由不锈钢材料制成,规格 53 cm×53 cm×90 cm,顶箱外部包有薄海绵和铝箔以防止太阳照射导致箱内温度变化过大影响测定结果。箱体顶部和下部安置风扇以充分混合箱内气体,并在箱体顶部留一小孔插温度计,用于观测箱内温度变化,箱体中部安装抽气孔,采样时按 0、5、10、15、20 min 的时间间隔抽取箱内气体 50 mL。N₂O 气体浓度采用经过改装的带有有火焰离子检测器(FID)和电子捕获器(ECD)的 Agilent 4890D 气相色谱仪测定,分离柱为 Porapak Q 填充柱,柱温 60 ℃,检测温度 300 ℃,用高纯氮气作载气,每次释放通量由 5 个气样浓度值经线性回归分析得出。共采集气体 3 次,分别于 2013 年 7 月 14 日(第 2 次灌水施肥)、7 月 21 日(第 3 次灌水施肥)和 7 月 29 日(第 4 次灌水施肥)取样,时间在上午 10:00—12:00。

N₂O 排放通量(F)的计算公式^[23]为:

$$F=(H \times M \times P \times dC/dt \times 1000)/R(273+T)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; M 为 N₂O 的摩尔质量, 44 g·mol⁻¹; R 为普适气体常数, 8.314 Pa·m³·mol⁻¹·K⁻¹; T 为采样时箱内平均气温, ℃; P 为采样点大气压力,通常视为标准大气压,即 1.013×10⁵ Pa; dC/dt 为 N₂O 排放速率; H 为采样箱高度, m。

1.2.2 土壤样品的采集与分析

采集气体样品的同时,在每个采样箱附近随机选取 3 个样点(植株间),采集 0~20 cm 土壤样品,测定土壤含水量、电导率、pH、有机质、全氮、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性。

土壤含水量采用烘干法测定;电导率采用 DDS-308A 型电导率仪(上海雷磁仪器厂产)测定土水比 1:5 土壤浸提液电导率 EC_{1:5}; 土壤 pH 采用 pHS-3C 型精密 pH 计(上海虹益仪器仪表有限公司产)测定 1:2.5 土壤浸提液 pH; 土壤有机质采用重铬酸钾容量

法-外加热法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定; NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量使用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,土壤(新鲜土样)与溶液比为 1:10,浸提时间为 1 h,测定浸提液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量采用全自动间断化学分析仪测定(Smart Chem140, Analytik Jena AG)。土壤酶活性的测定参照关松荫^[24]测定土壤酶活性方法,硝酸还原酶活性采用酚二磺酸比色法测定;亚硝酸还原酶活性采用 α -萘胺比色法测定。

1.2.3 数据处理

试验数据处理和作图采用 Microsoft Excel for Windows 2003 完成,用 SPSS 11.5 软件进行方差分析和多重比较(Duncan),统计性显著性假设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 长期咸水滴灌对棉花产量的影响

棉花产量受灌溉水盐度和施氮量影响显著,不同年限各处理对棉花产量影响有所不同(表 2)。2009 年(第 1 年),BW 灌溉处理的棉花产量最高,其次是 FW 处理,SW 处理产量最低。经 1 年的灌溉处理,2010 年 FW 和 BW 处理棉花产量差异不大($P > 0.05$),均显著高于 SW 处理。2011—2013 年,棉花产量随灌溉水盐度的增加显著降低,BW 和 SW 处理较 FW 处理分别减少了 7.51% 和 18.56%、24.07% 和 36.34%、13.61% 和 27.73%。

2.2 不同处理对土壤主要理化性质的影响

土壤含水量受灌溉水盐度、施氮量及交互作用影响显著(表 3)。总体上,土壤含水量随灌溉水盐度的增加而显著增加,BW 和 SW 处理土壤含水量平均较 FW 处理分别高 8.33% 和 13.03%;增施氮肥土壤含水量显著降低;N360 处理较 N0 处理土壤含水量平均降低 6.04%。

土壤电导率随灌溉水盐度的增加显著增加,BW 和 SW 处理土壤电导率平均较 FW 处理分别增加了 2.3 倍和 4.0 倍。施氮肥后土壤电导率也有所增加,N360 处理土壤电导率较 N0 处理平均增加了 15.29%。

咸水和微咸水滴灌后土壤 pH 显著降低(表 3),SW 和 BW 处理土壤 pH 较 FW 处理平均分别低了 0.20 和 0.125。增加施氮量也导致土壤 pH 有所降低,N360 处理土壤 pH 较 N0 处理平均下降了 0.043。总体上,SW 配施 N360 处理土壤 pH 值最低。

咸水微咸水滴灌和施用氮肥对土壤有机质含量影响显著(表 3)。土壤有机质含量随灌溉水盐度的增

加而显著降低,BW和SW处理土壤有机质含量较FW处理平均分别降低了5.91%和7.58%。土壤有机质随施氮量的增加而增加,N360处理土壤有机质较N0处理平均增加了11.96%。

咸水和微咸水灌溉后土壤全氮呈降低趋势,SW和BW处理土壤全氮含量较FW处理分别降低了2.33%和0.78%。增施氮肥可显著增加土壤全氮含量,N360处理土壤全氮较N0处理平均增加了1.66%。

2.3 不同处理对土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量的影响

灌溉施肥后第3d,各处理土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量见图1。施氮肥可显著增加土壤 NO_3^- -N含量,N360处理土壤 NO_3^- -N含量较N0处理高出1.96倍(图1a)。无论是否施用氮肥,土壤 NO_3^- -N含量均随灌溉水盐度的增加而降低,BW和SW处理土壤 NO_3^- -N含量较FW处理平均降低了4.65%和54.56%。

施氮肥后土壤 NH_4^+ -N含量也明显增加,N360处理土壤 NH_4^+ -N含量较N0处理增加了33.24%(图1b)。在N0条件下,SW和BW对土壤 NH_4^+ -N含量影响不大;N360条件下,SW和BW处理土壤 NH_4^+ -N含量较FW分别增加了22.63%和10.80%。

2.4 土壤硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性

土壤硝酸还原酶活性随灌溉水盐度的升高而显著降低,BW和SW处理土壤硝酸还原酶活性较FW处理平均分别降低了15.30%和35.95%(图2a)。施氮肥可显著增加土壤硝酸还原酶活性,N360处理土壤硝酸还原酶活性较N0处理提高了11.69%。

施氮肥同样显著提高了土壤亚硝酸还原酶活性,N360处理土壤亚硝酸还原酶活性较N0处理平均增加了33.75%(图2b)。咸水和微咸水滴灌显著抑制土壤亚硝酸还原酶活性。在N0条件下,SW和BW处理

表2 不同处理对棉花产量的影响

Table 2 Effects of irrigation water salinity and N application on cotton yields

处理 Treatment		棉花产量 Cotton yields/kg·hm ²				
施氮量 N rate	灌溉水盐度 Water salinity	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
N0	FW	3948d	4688b	4619bc	4382c	4613c
	BW	4252c	4675b	4313c	3683d	4160d
	SW	3139e	3232d	3810d	3266d	3403e
N360	FW	5732b	5392a	5323a	7497a	6927a
	BW	5031c	5511a	4882b	5336b	5809b
	SW	4059cd	4388c	4288c	4296c	4936c
两因素分析(F值)Two-way ANOVA(F value)						
灌溉水盐度 Water salinity		119.60***	124.84***	32.89***	79.57***	70.06***
施氮量 Nitrogen rate		213.33***	143.33***	39.00***	184.89***	275.47***
交互作用 Interaction		0.67ns	3.19ns	0.49ns	18.90***	4.86*

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

Note: Values followed by different letters within a column are significantly different at 5% level. The same below.

表3 不同处理0~20 cm土壤理化性质

Table 3 Selected physical and chemical properties of soil(0~20 cm depth) in different treatments

施氮量 N rate	灌溉水盐度 Water salinity	含水量 Water content/%	pH	电导率 EC _{1:5} /dS·m ⁻¹	有机质 OM/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹
N0	FW	16.99d	7.85a	0.24f	15.53cd	0.66ab
	BW	17.84b	7.71b	0.80d	14.74de	0.65b
	SW	18.87a	7.64bc	1.38b	14.52e	0.65b
N360	FW	15.04e	7.79a	0.32e	17.61a	0.67a
	BW	17.45c	7.68b	1.05c	16.44b	0.67a
	SW	17.96b	7.60c	1.42a	16.10bc	0.65b
两因素分析(F值)Two-way ANOVA(F value)						
灌溉水盐度 Water salinity		222.54***	39.65***	17068***	11.01**	6.70*
施氮量 Nitrogen rate		130.42***	5.65**	618.46***	60.44***	9.52**
交互作用 Interaction		23.26***	0.28ns	172.01***	0.43ns	1.97ns

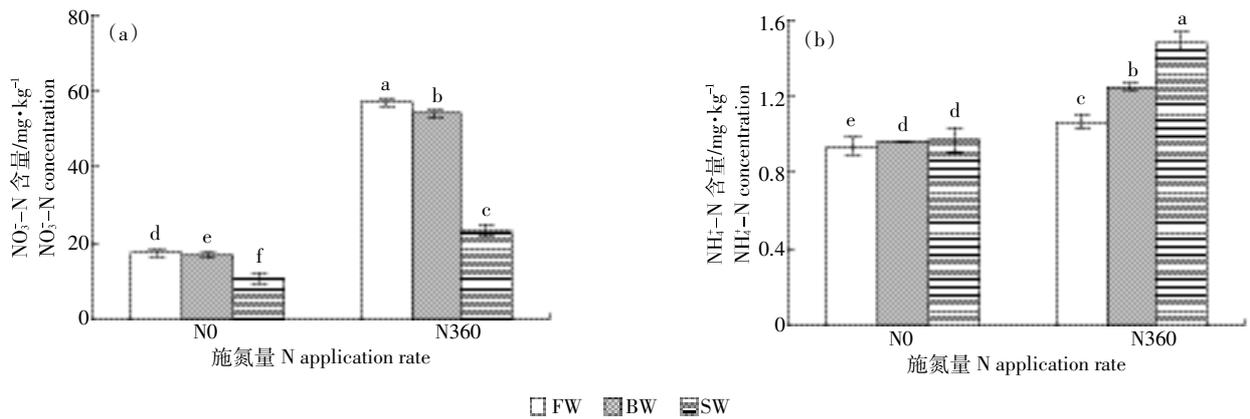


图 1 不同处理土壤 NO₃-N(a)和 NH₄⁺-N(b)含量

Figure 1 Effects of irrigation water salinity and N application on soil NO₃-N(a) and NH₄⁺-N(b) concentrations

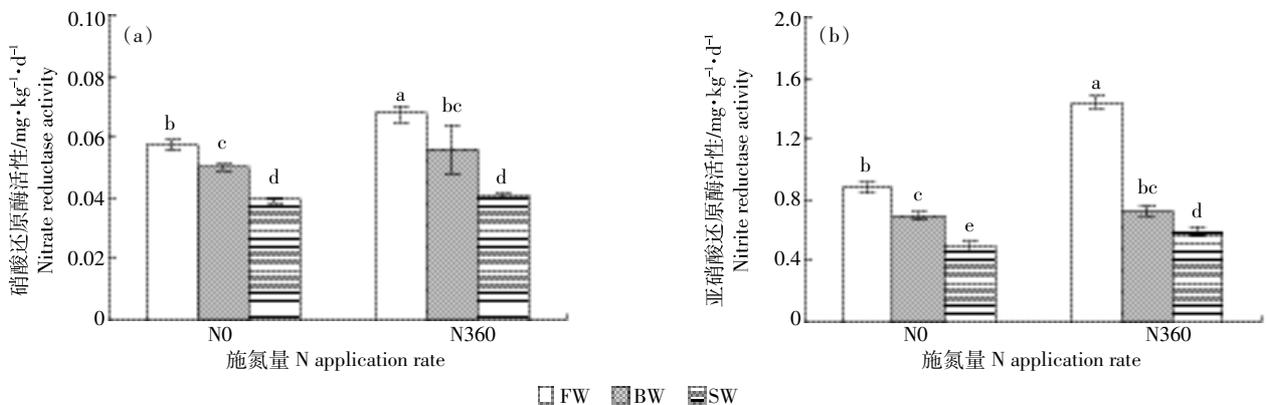


图 2 不同处理土壤硝酸还原酶(a)和亚硝酸还原酶活性(b)

Figure 2 Effects of irrigation water salinity and N application on soil nitrate reductase(a) and nitrite reductase(b) activity

土壤亚硝酸还原酶活性较 FW 处理分别降低了 20.37% 和 43.51%; 在 N360 条件下, 分别降低了 49.70% 和 59.39%。

2.5 土壤 N₂O 排放通量

灌溉施肥后第 3 d, 土壤 N₂O 排放通量在 5.62~33.47 μg·m⁻²·h⁻¹ 范围内波动(图 3)。增加施氮量土壤 N₂O 排放显著增加, N360 处理土壤 N₂O 排放通量较 NO 处理平均高出 1.92 倍。咸水和微咸水滴灌对土壤 N₂O 排放有明显的抑制作用。在 NO 条件下, BW 处理土壤 N₂O 排放通量与 FW 处理差异不大(P>0.05), 但 SW 处理土壤 N₂O 排放通量较 FW 处理降低了 55.30%。在 N360 条件下, 土壤 N₂O 排放通量随灌溉水盐度的增加而显著降低, BW 和 SW 处理土壤 N₂O 排放通量较 FW 处理分别减少了 15.59% 和 30.36%。

2.6 N₂O 排放通量与土壤理化性质的相关性

N₂O 排放通量与土壤理化性质的相关性如表 4 所示。N₂O 排放通量与土壤含水量、有机质、NH₄⁺-N、NO₃-N、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶存在显著的相关

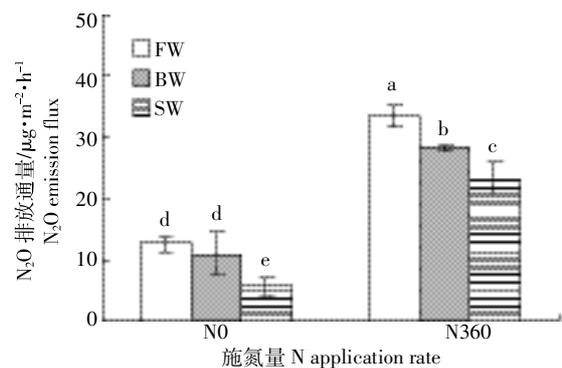


图 3 不同处理土壤 N₂O 排放通量

Figure 3 Effects of irrigation water salinity and N application on soil N₂O emissions

性; 其中, N₂O 排放通量与土壤含水量呈显著负相关, 土壤含水量在 15.04%~18.87% 的范围, N₂O 排放通量随含水量的增加而降低; N₂O 排放通量则与土壤有机质、NH₄⁺-N、NO₃-N、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性呈显著或极显著的正相关关系。因此, 当硝化反硝化

表4 N₂O 排放通量与土壤理化性质的相关性Table 4 Correlations between soil N₂O emission and soil properties

	SWC	pH	EC ₁₅	OM	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NR	NiR	N ₂ O
SWC	1									
pH	-0.64**	1								
EC ₁₅	0.82**	-0.92**	1							
OM	-0.28	0.16	-0.32	1						
TN	0.36	-0.30	0.28	-0.51*	1					
NH ₄ ⁺ -N	0.08	-0.62**	0.46	0.41	-0.08	1				
NO ₃ ⁻ -N	-0.62**	0.03	-0.29	0.78**	-0.36	0.32	1			
NR	-0.90**	0.69**	-0.85**	0.65**	0.74**	-0.27	0.59*	1		
NiR	-0.98**	0.64**	-0.81**	0.74**	0.89**	-0.20	0.61**	0.87**	1	
N ₂ O	-0.73**	0.15	-0.26	0.98**	0.49	0.55*	0.87**	0.56*	0.65*	1

注:SWC 土壤含水量;EC₁₅ 电导率;OM 有机质;TN 全氮;NR 硝酸还原酶;NiR 亚硝酸还原酶。

Note:SWC, soil water content; EC₁₅, electrical conductivity; OM, organic matter; TN, total nitrogen; NR, nitrate reductase; NiR, nitrite reductase.

底物充足,反硝化酶活性高时有利于 N₂O 排放。

3 讨论

淡水资源不足是干旱半干旱地区农业发展的重要限制因素,咸水和微咸水资源的开发利用是缓解淡水资源不足的有效途径之一。咸水灌溉在补充水源的同时也向土壤带入盐分,造成盐分在根区累积,抑制作物生长,从而影响作物产量。杨传杰等^[19]研究表明,土壤根系层可溶性盐平均浓度每升高 1 g·L⁻¹,棉花产量降低 861 kg。但逢焕成等^[20]认为连续两年灌溉矿化度在 3~5 g·L⁻¹的微咸水对作物年产量无明显不利影响,也没有发生积盐现象。本研究结果表明,第一年微咸水灌溉增加棉花产量,表现为微咸水灌溉处理的产量最高,较淡水和咸水灌溉处理分别高出 6.50% 和 22.46%。但随着灌溉年限的增加,棉花产量随灌溉水盐度的增加而显著降低,说明短期灌溉微咸水不会给作物带来不利影响,但若长期使用则很有可能抑制作物生长,从而导致作物减产。

此外,咸水微咸水灌溉也会改变土壤理化性质,直接影响土壤氮素的转化和循环,如 N₂O 的排放。土壤排放 N₂O 的能力受温度、水分、可溶性碳和无机氮含量(NO₃⁻和 NH₄⁺)等诸多因子的影响^[21]。盐通过生物、物理和化学作用影响土壤理化属性和碳氮循环过程,如通过抑制植物生长减少碳输入、通过“絮结作用”增加容重等。盐分也影响氨化、硝化作用,加快有机质分解^[22]。盐对土壤理化属性和碳氮循环的影响可能也改变了 N₂O 的排放^[23]。

土壤含水量是影响 N₂O 排放的重要因素之一,含

水量通过影响土壤通气性、氧化还原电位、土壤有效氮(NO₃⁻和 NH₄⁺)分布及其对微生物的有效性等,从而对土壤硝化、反硝化等微生物过程以及 N₂O 和 NO 在土壤中的传输及其向大气的扩散^[24]。有研究表明,当土壤含水量低于田间持水量的 97%~100%时,N₂O 排放通量与土壤湿度呈正相关;土壤含水量超过田间持水量的 97%~100%后,N₂O 排放通量与土壤湿度呈负相关^[25]。本研究表明灌溉水盐度和施氮肥均显著影响滴灌棉田土壤含水量,咸水和微咸水滴灌会造成根区土壤盐分积累,抑制作物生长,导致农田蒸散损失降低,土壤含水量增加;而施用氮肥可促进作物生长,农田蒸散量增加,导致根区土壤水分降低。试验中采用滴灌,土壤含水量始终控制在田间持水量的 97%~100%以内,但土壤含水量与 N₂O 排放量呈显著负相关,与上述研究结果不一致。这可能是由于咸水微咸水灌溉和施氮肥直接影响土壤氮素的转化和 N₂O 排放,掩盖了土壤水分的影响效应。董玉红等^[26]研究也表明土壤 N₂O 的排放除了受肥料施用的影响外,还受土壤温度、水分等环境因子的影响,土壤 N₂O 排放只在对照处理中与土壤水分相关显著,施肥处理中,肥料效应掩盖了土壤温度和水分效应。

从 N₂O 排放通量与土壤理化性质的相关性来看,土壤有机质也是影响 N₂O 排放的重要因素。有机质可以为土壤呼吸提供基质而消耗 O₂,造成土壤缺氧条件,有利于反硝化过程产生 N₂O,土壤有机质含量高,N₂O 排放潜势亦高^[27]。本研究结果表明,灌溉水盐度和施氮量显著影响有机质含量,有机质含量随灌溉水

盐度的增加而降低, N₂O 排放量也随有机质含量的降低而降低, 有机质含量与 N₂O 排放量呈正相关, 这与上述观点基本一致。但 Teepe 等^[28]研究认为, N₂O 排放与土壤有机碳含量呈负相关趋势, 同一季节有机碳含量最低的德国农田 N₂O 排放最高, 有机碳含量最高的森林土壤排放量最低, 有机碳含量略高于农田的休闲地居中。出现差异的原因可能是水源不同, 本试验为咸水微咸水灌溉, 补充水源的同时也向土壤带入盐分, 盐分会加快有机质的分解^[2], 使土壤有机质含量随灌溉水盐度的增加而降低, 为土壤呼吸提供基质而消耗的 O₂ 越来越少, 不利于反硝化过程产生 N₂O; 另一方面可能是作为专性酶参与土壤硝态氮的进一步还原过程的硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性受灌溉的咸水微咸水抑制, 从而导致土壤 N₂O 排放减少。

NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 作为硝化反应和反硝化反应的底物, 制约 N₂O 的产生。Skiba 等^[29]发现, N₂O 排放与表土 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度呈正相关关系。本研究结果也表明, 土壤 NH₄⁺-N 含量随灌溉水盐度的增加而增加, 土壤 NO₃⁻-N 含量随灌溉水盐度的增加而减小, NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量与 N₂O 排放均呈显著正相关, 与上述研究结果基本一致。相关分析表明 NH₄⁺-N 与 N₂O 的相关系数为 0.55, NO₃⁻-N 与 N₂O 的相关系数达到了 0.87, 说明本试验条件下 N₂O 的产生可能主要来自于反硝化过程。

本试验只在 2013 年 7 月 14 日、7 月 21 日和 7 月 29 日(分别为第 2、3、4 次灌水施肥)进行 3 次监测, 由于所得的监测结果只是某一时间 N₂O 排放通量, 并非 N₂O 的累积量, 可能并不反映棉田土壤 N₂O 排放的真实情况, 但对于我们理解咸水灌溉后棉田土壤 N₂O 的排放特征有一定帮助。由于咸水灌溉对棉田土壤 N₂O 排放的影响机理十分复杂, N₂O 排放的动态监测需进一步研究。

4 结论

长期咸水微咸水灌溉导致土壤理化性质改变, 一方面抑制棉花生长, 导致棉花产量显著降低, 另一方面也必然影响 N₂O 的排放。土壤含水量、NH₄⁺-N 含量随灌溉水盐度的增加而增加, 土壤 pH、有机质、NO₃⁻-N 含量随灌溉水盐度的增加而减小。参与反硝化作用的硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性也随灌溉水盐度的增加而降低。同一施氮水平下, 土壤 N₂O 排放随灌溉水盐度的增加而减小, 咸水和微咸水灌溉显著抑制 N₂O 排放; 施用氮肥可促进 N₂O 排放。

参考文献:

- [1] Mmolawa K B, Or D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review[J]. *Plant Soil*, 2004, 222: 163-190.
- [2] Letey J, Feng G L. Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters[J]. *Agric Water Manage*, 2007, 90: 165-180.
- [3] 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[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969-973.
ZHANG Yu-liang, LU Wen-long, ZHANG Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 969-973.
- [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[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 30-35.
WAN Shu-qin, KANG Yue-hu, WANG Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3): 30-35.
- [5] Albassam B A. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24: 1325-1335.
- [6] Stone D L R, Whitney D A, 王学锋. 长期施用氮肥对土壤理化性质的影响[J]. 土壤学进展, 1992, 4: 49-56.
Stone D L R, Whitney D A, WANG Xue-feng. The influence of nitrogen fertilizer on soil physical and chemical properties for a long time[J]. *Progress in soil Science*, 1992, 4: 49-56.
- [7] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen loss from fertilizers applied to maize-wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2002, 63: 187-195.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: The physical science basis[M]//Solomon S, Manning M, Chen Z, et al, Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [9] Liu X, Chen C R, Wang W J, et al. Soil environmental factors rather than denitrification gene abundance control N₂O fluxes in a wet sclerophyll forest with different burning frequency[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 292-300.
- [10] 彭世彰, 杨士红, 丁加丽, 等. 农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素及减排措施研究进展[J]. 河海大学学报, 2009(1): 1-6.
PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, DING Jia-li, et al. Key influencing factors and mitigation measures of nitrous oxide emission from agricultural soil[J]. *Journal of Hehai University*, 2009(1): 1-6.
- [11] 邹国元, 张福锁, 巨晓棠, 等. 冬小麦-夏玉米轮作条件下氮素反硝化损失研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 499-504.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, JU Xiao-tang, et al. Under the condition of winter wheat-summer maize rotation of denitrifying nitrogen loss research[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 499-504.
- [12] 黄 耀, 焦 燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598-602.
HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Liang-gang, et al. N₂O emission from

- wheat cultivated soils as influenced by soil physico-chemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):598-602.
- [13] 杨云, 黄耀, 姜纪峰. 土壤理化特性对冬季菜地 N₂O 排放的影响[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2):7-12.
YANG Yun, HUANG Yao, JIANG Ji-feng. Influence of soil properties on N₂O emission from vegetable soils in winter[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2):7-12.
- [14] 杜睿. 温度和水分对草甸草原土壤氧化亚氮产生速率的调控[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11):2170-2174.
DU Rui. Effects of soil moisture and temperature on N₂O production rate of meadow grassland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11):2170-2174.
- [15] Strpanov A. 11th International symposium on environmental biogeochemistry[R]. Salamanca: 1993.
- [16] Inubushi K, Barahona M A, Yamakawa K. Effects of salts and moisture content on N₂O emission and nitrogen dynamics in yellow soil and Andosol in model experiments[J]. *Biology and Fertility of Soil*, 1999, 29(4):401-407.
- [17] 邹建文, 黄耀, 蒋静艳, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4):7-12.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, JIANG Jing-yan, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4):7-12.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1996:274-338.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and its methodology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1996:274-338.
- [19] 杨传杰, 罗毅, 孙林, 等. 灌溉水矿化度对玛纳斯流域棉花生长影响的试验研究[J]. 资源科学, 2012, 34(4):660-667.
YANG Chuan-jie, LUO Yi, SUN Lin, et al. Experimental study on the impacts of the irrigation water salinity on cotton growth in Manas River Oasis, Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2012, 34(4):660-667.
- [20] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6):599-603.
PANG Huan-cheng, YANG Jing-song, YAN Hui-jun. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6):599-603.
- [21] Dobbie K E, Smith K A. Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67:37-46.
- [22] Wong V N L, Greene R S B, Murphy B W, et al. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(1):2-11.
- [23] 张金凤, 李增嘉. 不同水肥条件下黄河三角洲盐土的 N₂O 排放速率[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7):1703-1709.
ZHANG Jin-feng, LI Zeng-jia. Nitrous oxide emission rates of saline soils in Yellow River Delta of China under different water and N amendment conditions[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7):1703-1709.
- [24] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6):881-887.
CAI Yan-jiang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Factors controlling N₂O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A Review[J]. *Soils*, 2012, 44(6):881-887.
- [25] 于萍萍, 张进忠, 林存刚. 农田土壤 N₂O 排放过程影响因素研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2006, 5:20-22.
YU Ping-ping, ZHANG Jin-zhong, LIN Cun-gang. Factors affecting agricultural soil N₂O emission is reviewed[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2006, 5:20-22.
- [26] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):913-918.
DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):913-918.
- [27] 梁冬丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 有效碳源和氮源对黄土性土壤 N₂O 逸出量的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(1):43-48.
LIANG Dong-li, TONG Yan-an, Ove Emteryd, et al. Effects of available carbon and nitrogen concentration on the N₂O flux of Rural the Loessal soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 31(1):43-48.
- [28] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1897-1910.
- [29] Skiba U M, Sheppard L J, MacDonald J, et al. Some key environmental variables controlling nitrous oxide emission from agricultural and semi-natural soils in Scotland[J]. *Atmos Environ*, 1998, 32(19):3311-3320.