

周 慧, 史海滨, 徐 昭, 等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1649–1656.

ZHOU Hui, SHI Hai-bin, XU Zhao, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1649–1656.

化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周 慧¹, 史海滨^{1*}, 徐 昭¹, 郭珈玮¹, 付小军², 李正中²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古河套灌区解放闸灌域管理局沙壕渠试验站, 内蒙古 巴彦淖尔 015400)

摘 要:针对河套灌区无机氮肥过量施用造成的环境问题,通过探究有机氮替代部分无机氮肥对田间土壤氨挥发的影响,确定盐渍化农田适宜的有机无机氮肥配施用量。于2018年进行田间试验,选取轻度($0.45\sim 0.68\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)和中度($1.04\sim 1.40\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$)盐渍化农田,以纯施氮量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为相同施氮总量进行有机无机氮肥配施,分别设置5个施肥处理:单施化肥、3/4氮由化肥提供+1/4氮由有机肥提供、1/2氮由化肥提供+1/2氮由有机肥提供、1/4氮由化肥提供+3/4氮由有机肥提供、单施有机肥,依次记为 U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 、 O_1 。另外设置空白对照处理(CK),探究不同有机无机氮肥配施量对盐渍化玉米农田土壤氨挥发速率、氨挥发损失量及产量的影响。结果表明:土壤盐分随着有机氮肥施用量增加呈先降后升的趋势;各肥料配施处理追肥后氨挥发期较施入基肥后明显延长,导致同一处理轻、中度盐渍化土壤追肥后氨挥发损失量较施入基肥后分别高出22.15%~64.03%和14.34%~40.66%;同一处理在中度盐渍化土壤上的氨挥发总量较轻度盐渍化土壤高出8.35%~16.46%;土壤氨挥发损失量与有机肥施入比例、土壤盐分之间呈显著二元二次非线性回归关系,分析回归方程各系数可知,适当增大有机肥施入比例可以降低土壤氨挥发,而增加土壤盐分则会使土壤氨挥发增大,增施有机肥和土壤盐分之间会产生共同降低氨挥发损失的效应;有机肥替代部分化肥可提高玉米产量,轻、中度盐渍化土壤 U_1O_1 处理玉米产量分别较 U_1 处理高出12.63%和17.05%。在轻度和中度盐渍化土壤上,综合氨挥发损失量及玉米产量,处理 U_1O_1 既能保证高产,又能显著降低氨挥发损失,故推荐该处理为当地适宜肥料配施模式。

关键词:盐渍化土壤;有机无机肥配施;氨挥发

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1649-08 doi:10.11654/jaes.2018-1406

Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil

ZHOU Hui¹, SHI Hai-bin^{1*}, XU Zhao¹, GUO Jia-wei¹, FU Xiao-jun², LI Zheng-zhong²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Shahaoqu Irrigation Experimental Station, Jiefangzha Management Bureau of Hetao Irrigation District, Bayannaoer 015400, China)

Abstract: In order to solve the environmental problems caused by excessive application of inorganic nitrogen fertilizer in Hetao Irrigation District, the aim of this study was to find out the appropriate proportion of organic to inorganic fertilizer application for salinized farmland, with investigation of the effect of organic nitrogen substituting for inorganic nitrogen fertilizer on ammonia volatilization. Field experiments were carried out in 2018. Farmlands with mild ($0.45\sim 0.68\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) and moderate ($1.04\sim 1.40\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) salinization were selected, as was a pure nitrogen application rate of $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The same amount of nitrogen was applied to the different treatments, with five treatment sets: chemical fertilizer only, 3/4 chemical fertilizer + 1/4 organic fertilizer, 1/2 chemical fertilizer + 1/2 organic fertilizer, 1/4 chemical fertilizer + 3/4 organic fertilizer, and organic fertilizer only, which were designated U_1 , U_3O_1 , U_1O_1 , U_1O_3 , and O_1 , respectively. In addition, a blank

收稿日期:2018-11-08 录用日期:2018-12-28

作者简介:周 慧(1994—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:792606382@qq.com

*通信作者:史海滨 E-mail:shi_haibin@sohu.com

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51539005);国家自然科学基金项目(51769024);“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0400205)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China (51539005); The National Natural Science Foundation of China (51769024); The National Key Technology Research During the 13th Five-Year Plan Period of China (2016YFC0400205)

control treatment (CK) was employed to study the effects of different fertilization treatments on the ammonia volatilization rate, ammonia volatilization loss, and corn yield. Soil salt concentration decreased first and then increased with the increase in organic fertilizer application. The high-volatility period of ammonia after top dressing became significantly longer than that after basal dressing, with result of the same treatment of mildly and moderately salinized soil, the ammonia volatilization loss after top dressing was 22.15%~64.03% and 14.34%~40.66% higher than that after basal dressing, respectively. The total ammonia volatilization of the same treatment in moderately salinized soil was higher than that in mildly salinized soil by 8.35%~16.46%. Soil ammonia volatilization showed a significant nonlinear relationship with organic fertilizer rate and soil salt concentration. An increase in appropriate organic fertilizer application reduced ammonia volatilization. Soil salinity increased and ammonia volatilization increased. Increasing organic fertilizer application and soil salt concentration had the effect of jointly reducing the loss of ammonia volatilization. Replacing some chemical fertilizers with organic fertilizer can increase corn yield in mildly and moderately salinized soil, as the yield of corn treated with U_1O_1 treatment was 12.63% and 17.05% higher, respectively, than that of single application urea. Combined with ammonia volatilization loss and corn yield with the mildly and moderately salinized soil, U_1O_1 not only can ensure high yield, but also can significantly reduce ammonia volatilization loss. It should be recommended as the more suitable treatment for experimental district.

Keywords: salinized soil; combined application of organic and inorganic fertilizers; ammonia volatilization

内蒙古河套灌区是我国重要的粮食产区,该灌区现行农业生产实践中施用的氮肥主要是无机化肥,且化肥施用量逐年增加,目前用量已超过 $60 \text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ [1-2]。由于过量施用尿素且长期施肥种类单一,导致肥料利用率低且严重威胁生态环境,给当地农业的可持续发展带来了较大的挑战。如何提高肥料利用效率、改善土壤环境和质量是河套灌区亟待解决的科学问题之一。研究表明,有机肥养分元素全面而肥效缓,对环境负面影响较小;无机肥料养分单一而含量高、肥效快,但对环境负面影响大 [3-5]; 因此,减少无机氮肥用量,提高有机肥比重,采用有机无机肥料配施是解决该问题的主要途径之一。

氮素损失是造成肥料利用率低和一些环境污染的主要原因,而氨挥发又是田间土壤氮素损失的重要途径之一,我国氨挥发损失率达到 21% [6-7]。因此,从环境友好的角度可利用田间氨挥发损失量来评价肥料施用模式的优劣。目前,国内外对于有机无机肥配施对氨挥发影响的研究已有很多 [8-11],但大多集中在非盐渍土上,盐分对氨挥发的影响已引起众多学者的关注 [12-14]。研究表明,高盐度抑制土壤中硝化作用的进行,导致土壤氨挥发增加 [15],但微生物也可能由于盐分过多而被抑制生长,从而降低肥料水解,减少土壤氨挥发 [16]。河套灌区是我国土壤盐渍化发育的典型地区,过量盐分的存在严重影响着土壤的理化特征,从而影响土壤中氮素的转化和损失 [17-18],对于氨挥发损失的影响更为复杂。目前,关于采用有机肥替代部分无机氮肥模式下不同盐渍化农田氨挥发损失的研究还鲜有报道。本文通过田间试验,研究不同盐

渍化程度土壤有机无机氮肥用量配施对土壤氨挥发的影响,并以降低氨挥发损失和稳产为依据,以期对河套灌区盐渍化玉米农田肥料管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4—9 月在河套灌区解放闸灌域沙壕渠试验站进行。试验区冬季寒冷少雪、夏季高温炎热,属于典型的温带大陆性季风气候,多年平均气温达到 $7.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期为 135~150 d,大于 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $3551 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均日照时数 3200 h,年冻融期在 180 d 左右。阳光充足,全年太阳总辐射约为 $6000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,热量充足,具有非常优越的农业发展条件。试验田属硫酸盐-氯化物型盐土,0~20 cm 土层为粉壤土,20~40 cm 为粉质黏壤土,40~60 cm 为粉壤土,60~100 cm 为砂壤土。播种前轻、中度盐渍化土壤 0~40 cm 平均电导率分别为 $0.382 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.254 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。试验区耕层初始土壤性质详见表 1。

1.2 试验设计

供试玉米品种为内单 314,播种日期为 2018 年 4 月 27 日,收获日期为 9 月 13 日。参考李祯等 [19] 优化畦灌灌水定额 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为灌水量,优化施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为施氮总量,分别在轻、中度盐渍化农田上设置 1 个空白对照处理和 5 个施肥处理,分别为单施化肥、3/4 氮由化肥提供+1/4 氮由有机肥提供、1/2 氮由化肥提供+1/2 氮由有机肥提供、1/4 氮由化肥提供+3/4 氮由有机肥提供、单施有机肥,依次记为 CK 和 U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 、 O_1 ,具体施肥设计见表 2,施氮量

表1 试验区土壤基本性状

Table 1 Basic properties of tested soils

盐渍化程度 Salinity degree	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkaline hydrolysis N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	pH
轻度 Mild	14.04	1.43	54.68	37.78	199.67	8.2
中度 Moderate	13.04	1.07	46.54	23.58	176.33	8.4

表2 试验处理设计

Table 2 The design of experimental treatments

处理 Treatments	施氮量 Application amounts of the nitrogen/kg·hm ⁻²		
	基肥 Basal dressing (2018-04-27)		追肥 Top dressing (2018-06-14)
	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	尿素 Urea
CK	0	0	0
U ₁	0	120	120
U ₃ O ₁	60	90	90
U ₁ O ₁	120	60	60
U ₁ O ₃	180	30	30
O ₁	240	0	0

为换算后的纯氮素量。试验共12个处理,3次重复,共36个小区,各小区长、宽分别为6 m和5 m,所施基肥和追肥深度均约5 cm。各小区间设有1 m宽的隔离带并搭起15 cm高田埂。所施无机肥为尿素(含氮46%),有机肥为宁夏贝特肥业有限公司生产的金临门有机肥料(含N 10%、P₂O₅ 1%、K₂O 1%、有机质≥45%、腐植酸≥17%、S≥8%),有机肥和磷肥(过磷酸钙50 kg·hm⁻²)于耕作前作为基肥一次性施用,氮肥按1:1比例分别于玉米播种期和拔节期灌水时施入。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤氨挥发测定

试验采用通气法^[20]。由聚氯乙烯硬质塑料管制成高10 cm、内径15 cm的通气法装置,将2块厚度为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL H₃PO₄+40 mL C₃H₈O₃,定容至1000 mL)后,置于装置中,下层的海绵距管底5 cm,上层的海绵与管顶部相平,将装置插入土中1 cm深处。在各装置顶部20 cm处支撑起1个遮雨顶盖以防止降雨对装置的影响。

在各小区的对角线上分别安置3个氨捕获装置,于施肥当日开始捕获氨的挥发,次日早晨8:00取样。取样时将下层海绵迅速取出并装入有对应编号的自封袋中,密封,同时换上刚刚浸润过的另1块海绵,上层海绵视其干湿状况每隔2~4 d更换1次。将取出的海绵剪碎后装入500 mL塑料瓶,并加入300 mL 1.0

mol·L⁻¹的KCl溶液,将海绵完全浸润于其中后振荡1 h,采用连续流动分析仪(Aquakem 250)测定浸取液中的铵态氮含量。施肥后的最初1周,每日取1次样,之后视监测到氨挥发的量每隔2~5 d取1次样,直至监测不到为止。

土壤氨挥发速率计算公式:

$$V = \frac{M}{A \times D} \times 10^{-2}$$

式中:V为氨挥发速率,kg·hm⁻²·d⁻¹;M为通气法单个装置平均每次测得的NH₃-N,mg;A为捕获装置的横截面积,m²;D为每次连续捕获的时间,d。

1.3.2 土壤盐分测定

土壤样品在氨挥发测定期间于各氨收集装置处用土钻每隔5 d进行1次采样,电导率采用电导率仪测定土水比1:5浸提液。

1.4 数据统计分析

采用SPSS 22.0与Excel 2016进行数据分析及图表绘制,用LSD法进行多重比较确定差异的显著性。

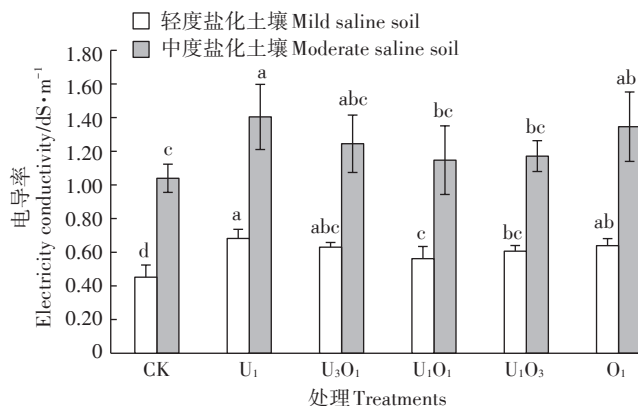
2 结果与分析

2.1 肥料配施对土壤电导率的影响

分析氨挥发测定期间土壤电导率均值(图1)发现,土壤盐渍化程度与有机无机肥料配施均对土壤电导率有显著影响。在氨挥发测定期间,轻度和中度盐渍化土壤电导率分别达到0.45~0.68 dS·m⁻¹和1.04~1.40 dS·m⁻¹。同一盐渍化程度土壤电导率随有机肥施入比例的增大呈现出先降后升的趋势,不同程度盐渍化土壤电导率均表现为U₁>O₁>U₃O₁>U₁O₃>U₁O₁>CK。轻度和中度盐渍土条件下不同肥料配施土壤电导率较CK分别高出24.8%~51.5%和10.30%~35.02%。

2.2 不同盐渍化土壤肥料配施对土壤氨挥发速率的影响

由图2A可知,施入基肥后,轻度盐渍化土壤各肥料配施处理氨挥发速率变化范围为0.081~1.642 kg·hm⁻²·d⁻¹,不同处理氨挥发速率动态变化趋势有所不同,U₁和U₃O₁处理在第2 d出现峰值,分别为1.642 kg·hm⁻²·d⁻¹和1.307 kg·hm⁻²·d⁻¹,均呈单峰变化趋势,



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments

图1 不同施肥处理下轻度和中度盐渍化土壤的电导率

Figure 1 Electrical conductivity in mild and moderate saline soils under different nitrogen treatments

U₁O₁和U₁O₃均在第2 d和第4 d出现峰值,呈双峰变化趋势,O₁处理在施肥后第1 d即出现峰值,为1.519 kg·hm⁻²·d⁻¹,随后逐渐下降进入低挥发阶段。中度盐渍化土壤不同有机无机氮肥配施氨挥发速率变化范围为0.077~1.855 kg·hm⁻²·d⁻¹(图2C),其氨挥发速率变化趋势与轻度盐渍化土壤基本一致。

追肥后,不同肥料配施处理氨高挥发期较施入基肥后明显延长,轻度盐渍化土壤不同肥料配施氨挥发速率变化范围为0.032~1.952 kg·hm⁻²·d⁻¹,氨挥发强度较施入基肥后明显提高,各处理氨挥发速率均呈单峰变化趋势,且在追肥后第2 d出现峰值(图2B)。中度盐渍化土壤不同有机无机氮肥配施氨挥发速率变化范围为0.030~2.143 kg·hm⁻²·d⁻¹,除O₁处理氨挥发速率于第3 d出现峰值外,其余各处理均于第2 d出现峰值,随后逐渐进入低挥发阶段(图2D)。

同一处理中度盐渍化土壤氨挥发速率均大于轻度盐渍化土壤,施入基肥和追肥后中度盐渍化土壤氨挥发速率较轻度盐渍化土壤分别高出9.09%~19.22%和2.22%~35.27%,高盐度明显促进了土壤氨挥发。

2.3 不同盐渍化土壤肥料配施对氨挥发累积量的影响

不同程度盐渍化土壤有机无机氮肥配施对土壤氨挥发累积量影响各异(表3)。轻度盐渍化土壤不同肥料配施处理氨挥发总量为12.80~16.05 kg·hm⁻²,U₁处理氨挥发总量显著高于其他处理,O₁与U₃O₁处理之间无显著差异,但均显著高于U₁O₃处理,U₁O₁处理氨挥发总量最少,显著低于其余施肥处理,氨挥发损失量为U₁处理的79.77%。中度盐渍化土壤不同有

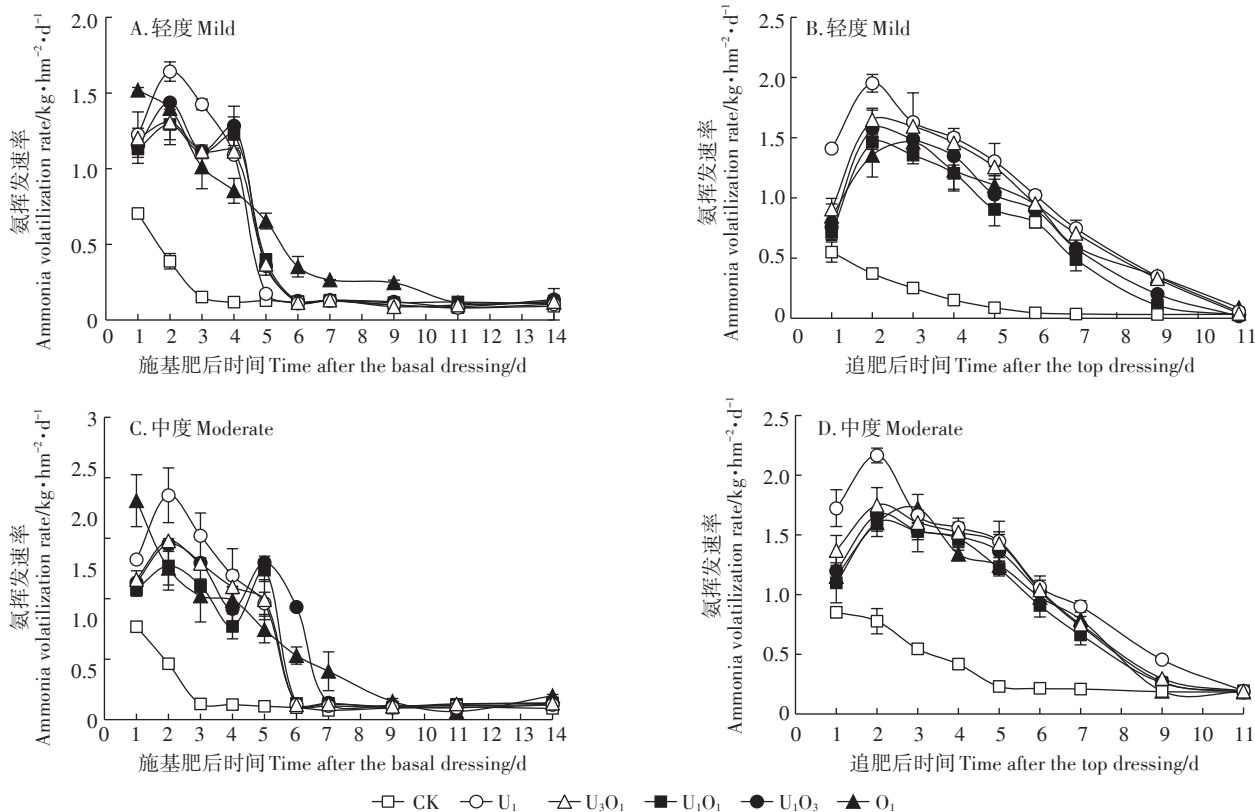


图2 不同施肥处理下轻度和中度盐渍化土壤氨挥发速率

Figure 2 Soil ammonia volatilization rate in mild and moderate saline soils under different nitrogen treatments

机无机氮肥配施处理氨挥发损失量为 14.14~17.84 kg·hm⁻², U₁ 处理氨挥发总量最大, 显著高于其余处理, 其次为 U₁O₃ 处理, O₁ 与 U₃O₁ 处理之间无显著差异, 但均显著高于 U₁O₁ 处理, U₁O₁ 处理氨挥发总量为 U₁ 处理的 79.28%。研究发现, 同一处理中度盐渍化土壤氨挥发累积量均显著高于轻度盐渍化土壤, 中度盐渍化土壤 U₁、U₃O₁、U₁O₁、U₁O₃、O₁ 处理氨挥发总量较轻度盐渍化土壤分别高出 11.16%、8.31%、10.47%、16.47%、6.82%。

不同程度盐渍化土壤肥料配施处理氨挥发损失率表现不一。轻度盐渍化土壤 O₁ 与 U₃O₁ 处理氨挥发损失率无显著差异, 其余处理间均呈显著差异 ($P<0.05$), U₁ 处理氨挥发损失占施氮量比例最大, 为 5.20%, U₁O₁ 氨挥发损失率最少, 为 3.85%; 中度盐渍化土壤各处理氨挥发损失率均呈现出显著性差异, U₁ 处理氨挥发损失率最大为 5.59%, 其后依次是 U₁O₃、U₃O₁、O₁ 处理, U₁O₁ 处理最低, 为 4.04%。

2.4 肥料配施与土壤盐分对氨挥发累积量的影响

通过回归分析得到了土壤氨挥发在有机肥施入比例与土壤盐分交互作用下的二元二次非线性回归模型(表 4), 其中 Y 为氨挥发总量(kg), X_1 为有机肥施入比例(百分比), X_2 为土壤盐分(dS·m⁻¹)。通过显著性分析得知, 土壤氨挥发总量回归模型的显著水平小于 0.05, 获得了较好的拟合度。

通过分析回归方程各系数可知, 在本研究条件下, 适当增加有机肥施入比例可以降低土壤氨挥发损失, 而土壤盐分增大会使氨挥发损失量增加, 增施有机肥和土壤盐分之间会产生共同降低氨挥发损失的

效应。因此, 适当降低化肥施入比例, 增加有机肥施入比例可以降低土壤氨挥发损失。

2.5 肥料配施对盐渍化土壤玉米产量的影响

从表 5 可以看出, 轻度和中度盐渍化土壤不同有机无机氮肥配施对玉米产量和增产率影响各异。同一处理轻度盐渍化土壤玉米产量均显著高于中度盐渍化土壤, 各肥料配施处理下产量增加 30.94%~61.75%。轻度盐渍化土壤, 各肥料配施处理玉米产量增幅为 31.84%~54.52%, U₁O₁ 处理玉米产量最高, 与 U₁O₃ 处理之间无显著差异, 但较 U₁、U₃O₁、O₁ 处理显著增加。而中度盐渍化土壤各肥料配施处理玉米产量增幅为 10.08%~43.62%, O₁ 处理玉米产量最大, 与 U₁O₃ 处理之间没有显著差异, 但该 2 个处理均显著高于其余处理。

3 讨论

本研究结果表明, 纯无机肥氨挥发损失量最大, 肥料配施能有效降低氨挥发损失。在轻度和中度盐渍化土壤上, 有机无机氮肥各半配施氨挥发损失较单

表 4 土壤氨挥发累积量在有机肥施入比例与土壤盐分作用下的回归模型

Table 4 Regression model of cumulative ammonia volatilization under the effect of organic fertilizer application ratio and soil salt

回归模型 Regression model	显著水平 Significance
$Y=12.420-8.003X_1+7.035X_2-1.191X_1X_2+7.456X_1^2-2.290X_2^2$	0.011 2

注: Y 为氨挥发量; X_1 为有机肥施入比例; X_2 为土壤盐分。

Note: Y indicates ammonia volatilization loss; X_1 indicates organic fertilizer application ratio; X_2 indicates soil saline.

表 3 不同施肥处理下轻度和中度盐渍化土壤上氨挥发累积量及损失率

Table 3 Cumulative ammonia volatilization and loss rate in mild and moderate saline soils under different nitrogen treatments

盐渍化程度 Salinity degree	处理 Treatments	氨挥发累积量 Cumulative ammonia volatilization/kg·hm ⁻²			氨挥发损失率 Proportion of ammonia loss/%
		基肥 Basal dressing	追肥 Top dressing	合计 Total	
轻度 Mild	U ₁	6.08	9.97	16.05a	5.20a
	U ₃ O ₁	5.66	8.90	14.56b	4.58b
	U ₁ O ₁	5.74	7.06	12.80d	3.85d
	U ₁ O ₃	5.95	7.90	13.84c	4.28c
	O ₁	6.53	7.98	14.51b	4.56b
中度 Moderate	U ₁	7.41	10.43	17.84a	5.59a
	U ₃ O ₁	6.65	9.13	15.77c	4.72c
	U ₁ O ₁	6.10	8.05	14.14d	4.04e
	U ₁ O ₃	7.52	8.60	16.12b	4.87b
	O ₁	7.16	8.33	15.50c	4.61d

注: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different treatments. The same below.

表5 不同施肥处理对轻度和中度盐渍化土壤上
玉米籽粒产量及增产率的影响

Table 5 The influence of different nitrogen treatments on grain
yield of maize and rate of grain increase

盐渍化程度 Salinity degree	处理 Treatments	产量 Yield/kg·hm ⁻²	增产率 Increase rate/%
轻度 Mild	CK	7 857.71d	—
	U ₁	10 638.92c	37.20
	U ₃ O ₁	10 780.75c	35.39
	U ₁ O ₁	12 141.97a	54.52
	U ₁ O ₃	11 528.93ab	31.84
	O ₁	11 237.4bc	43.01
中度 Moderate	CK	5 975.44d	—
	U ₁	6 577.53c	10.08
	U ₃ O ₁	6 740.03c	12.80
	U ₁ O ₁	7 889.14b	32.03
	U ₁ O ₃	8 559.51a	43.24
	O ₁	8 582.22a	43.62

施尿素分别降低 20.25% 和 20.74%, 而单施有机肥并不能有效抑制土壤氮挥发。究其原因, 主要是由于尿素和有机肥所发生的反应不同, 在土壤脲酶的作用下尿素被水解成 NH_4HCO_3 , 随后迅速转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 为氮挥发提供了充足的底物, 使纯无机肥处理氮挥发速率高于其他处理^[21]。而有机肥中的有机质在分解过程中大量有机酸被释放, 同时形成腐殖质, 抑制了尿素水解过程中土壤酸碱度的升高, 从而显著抑制土壤氮挥发^[22], 且有机肥配施氮肥能够促进土壤微生物活动, 将土壤无机氮固定在有机氮库中, 减少了产生氨的无机氮量, 进而降低氮挥发损失^[23], 而在等氮量条件下单施有机肥, 各形态有机氮经过矿化作用转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 除被作物吸收利用和土壤吸附外, 剩余部分大多以氨形态挥发^[24], 因此并不能有效降低氮挥发损失。

罗健航等^[25]研究发现, 施入基肥后氮挥发速率峰值出现时间为 1~4 d, 追肥后峰值时间为 1~2 d。而本研究表明各施肥处理氮挥发速率在施入基肥和追肥后均迅速达到峰值。这可能是由于本试验在施入基肥后土壤有较好的墒情, 土壤耕层含水率为 18.35%, 促使氮肥能较快被水解, 导致耕层土壤内铵态氮含量升高, 为氮挥发提供了充足的物质条件。追肥后土壤氮挥发损失量显著高于施入基肥后, 这是由于在灌水追肥后土壤耕层含水率迅速升高至 24.5%, 且此时温度较施入基肥时的 12.6 °C 增加为 21.4 °C, 脲酶活性增强^[26], 促使氮挥发损失速率较施入基肥后增加, 导致

在追肥后氮挥发量较施入基肥后明显增加。

梁飞等^[27]研究表明, 土壤氮挥发随着土壤含盐量的增加而加剧, 但土壤含盐量对氮挥发累积量的影响符合“S”型增长模式, 即随着盐含量增加到某一范围以后, 氮挥发速率开始增长缓慢甚至保持不变。本研究结果发现, 当土壤电导率在 0.45~1.40 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 范围之内时, 高盐分会促进土壤氮挥发损失, 同一处理下中度盐渍化土壤氮挥发损失量明显高于轻度盐渍化土壤, 这与 Mcelung 等^[28]研究结果一致。这是因为适当盐分促进土壤氨态氮的硝化, 使土壤氮素的硝化速率加快, 降低土壤中氨态氮含量从而减少氮挥发损失^[29]。随着土壤盐分增加, 土壤中硝化细菌逐渐受到抑制, 氨态氮累积量增加导致氮挥发损失量增加^[27]。本研究表明, 土壤电导率随着有机肥施用量的增加呈现出先降后升的趋势, 这可能是因为适当的增加有机肥配施比例改善了土壤理化性状, 毛管作用降低, 溶于水中的盐分也不易随水蒸发至耕层土壤, 但有机肥施用量过多时, 其中含有的许多作物难以吸收利用的钙、钠、镁、氯等离子将会在土壤中累积, 从而导致土壤盐分增加^[30], 因此, 不论无机肥还是有机肥, 施入量过多均会导致土壤盐分增加。适度的采用有机氮肥替代无机氮肥相比纯施无机氮可显著降低土壤盐分含量, 这间接降低了土壤盐分对氮挥发的促进作用。可见, 在盐渍化土壤上, 采用适度的有机肥替代无机化肥相比非盐渍化土壤更加能够降低氮挥发损失, 优势更加明显。

在本研究条件下, 轻度盐渍化土壤有机无机肥料各半配施较单施化肥增产率最高, 其原因可以归结为化肥与有机肥配施可以调控土壤氮素的固持和释放, 协调土壤氮素供应^[31-33], 从而提高作物产量。谢军等^[34]研究表明有机氮肥替代 50% 化肥氮肥能够明显增加玉米的产量, 这与本研究结果相似。中度盐渍化土壤表现出有机肥施入比例越大玉米产量越高的趋势, 这可能是因为中度盐渍化土壤需要施入较多有机肥来改善土壤通气不良的状况, 以利于作物和土壤微生物呼吸^[35], 且在作物生长前期, 高盐度会抑制作物的生长发育, 本研究土壤初始肥力以及有机肥经矿化过程释放的养分可以满足作物所需, 而在作物生长后期, 有机肥相较于尿素肥效持久的优势显现^[5], 利于作物增产。

4 结论

(1) 纯无机氮肥氮挥发损失量显著高于其余施肥

处理($P<0.05$),有机无机氮肥配施能有效降低氨挥发损失。轻度 and 中度盐渍化土壤,1/2 有机+1/2 无机肥配施氨挥发损失量最小,显著低于其余施肥处理($P<0.05$)。

(2)中度盐渍化土壤氨挥发损失量均高于同一处理轻度盐渍化土壤,土壤氨挥发随着土壤含盐量的增加而加剧。适宜的肥料配施能显著降低土壤盐分,其中 1/2 有机+1/2 无机氮肥配施的土壤电导率最小,显著低于单施化肥处理($P<0.05$)。

(3)轻度盐渍化土壤,1/2 有机+1/2 无机氮肥配施玉米产量最高,较单施尿素玉米产量显著增加;中度盐渍化土壤,随着有机肥施入比例增大玉米产量增加,1/4 无机+3/4 有机氮肥配施处理和单施有机肥处理之间玉米产量差异不显著,但均显著高于纯无机肥处理($P<0.05$)。

(4)综合氨挥发损失量和玉米产量得到,施氮总量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,采用 1/2 有机+1/2 无机氮肥配施处理在降低氨挥发损失的同时还能实现提高玉米产量的目标,故推荐该处理为当地适宜的有机无机氮肥配施模式。

参考文献:

- [1] 杜 军, 杨培岭, 李云开, 等. 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4549-4559.
DU Jun, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4549-4559.
- [2] 赵春晓, 郑海春, 邵翻身, 等. 不同处理对河套灌区玉米土壤硝态氮和铵态氮动态及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, 15(6): 99-104.
ZHAO Chun-xiao, ZHENG Hai-chun, GAO Fan-shen, et al. Effect of different materials on dynamic change of soil nitrate and ammonium nitrogen and N uptake by maize in Hetao irrigation area[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2017, 15(6): 99-104.
- [3] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2): 264-280.
- [4] Yang S, Li F M, Suo D R, et al. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(1): 57-67.
- [5] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
LI Yan-qing. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [6] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZOU Guo-yuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [7] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(2): 259-273.
ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 19(2): 259-273.
- [8] 肖 娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氮挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 2011-2018.
XIAO Jiao, FAN Jian-ling, YE Gui-ping, et al. Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 2011-2018.
- [9] 杨清龙, 刘 鹏, 董树亭, 等. 有机无机肥配施对夏玉米氮素气态损失及籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2476-2488.
YANG Qing-long, LIU Peng, DONG Shu-ting, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on loss of gaseous nitrogen and yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2476-2488.
- [10] Akiyama H, McTaggart I P, Ball B C, et al. N_2O , NO , and NH_3 emissions from soil after the application of organic fertilizers urea and water[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2014, 156(1): 113-129.
- [11] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682-1689.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682-1689.
- [12] Zhou G, Zhang W, Ma L, et al. Effects of saline water irrigation and N application rate on NH_3 volatilization and N use efficiency in a drip-irrigated cotton field[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(4): 103-109.
- [13] Sun H, Lu H, Chu L, et al. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH_3 volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575(1): 820-825.
- [14] 周广威, 张 文, 闵 伟, 等. 灌溉水盐度对滴灌棉田土壤氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 413-420.
ZHOU Guang-wei, ZHANG Wen, MIN Wei, et al. Effects of the salinity of irrigation water on soil ammonia volatilization in drip-irrigated cotton fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 413-420.
- [15] 闵 伟, 侯振安. 土壤盐度和施氮量对灰漠土尿素 N 转化的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1372-1379.
MIN Wei, HOU Zheng-an. Effects of soil salinity level and nitrogen rate on urea-N transformation in grey desert soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(6): 1372-1379.
- [16] 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[J]. *Agricultural Science (Cairo)*, 2004, 49:401-411.
- [17] Meclung G, Frankenberger W T. Soil nitrogen transformations as affected by salinity[J]. *Soil Science*, 1985, 139(5):405-411.
- [18] Westerman R L, Tucker T C. Effect of salts and salts plus nitrogen-15-labeled ammonium chloride on mineralization of soil nitrogen, nitrification, and immobilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38(4):602-605.
- [19] 李 祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同水氮运筹模式对田间土壤氨挥发及春玉米籽粒产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4):799-807.
- LI Zhen, SHI Hai-bin, LI Xian-yue, et al. Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water-nitrogen management regimes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):799-807.
- [20] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定:通气法[J]. *植物营养与肥科学报*, 2002, 8(2):205-209.
- WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205-209.
- [21] 郑凤霞, 董树亭, 刘 鹏. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氨挥发损失的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(3):567-577.
- ZHENG Feng-xia, DONG Shu-tin, LIU Peng. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(3):567-577.
- [22] Dong W X, Hu C S, Zhang Y M, Cui J F. Ammonia volatilization from urea incorporation with wheat and maize straw on a loamy soil in China: The proceedings of the international plant nutrition colloquium XVII[C]. University of California, Davis, 2009.
- [23] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5):1115-1121.
- DONG Wen-xu, WU Dian-ming, HU Chun-sheng, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5):1115-1121.
- [24] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 基施尿素对土壤剖面中无机氮动态的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2001, 6(5):63-68.
- LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Effect of basal application of urea on inorganic nitrogen in soil profile[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(5):63-68.
- [25] 罗健航, 赵 营, 任发春, 等. 有机无机肥配施对宁夏引黄灌区露地菜田土壤氨挥发的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4):75-81.
- LUO Jian-hang, ZHAO Ying, REN Fa-chun, et al. Effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization in open vegetable field of the Yellow River irrigation region in Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4):75-81.
- [26] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):35-39.
- PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8):35-39.
- [27] 梁 飞, 田长彦. 土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氨挥发的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(14):3999-4006.
- LIANG Fei, TIAN Chang-yan. Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2011, 31(14):3999-4006.
- [28] Meclung G, Frankenberger W T. Soil nitrogen transformation as affected by salinity[J]. *Soil Science*, 1985, 139(5):405-411.
- [29] 李建兵, 黄冠华. 盐分对粉壤土氮转化的影响[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5):98-103.
- LI Jian-bing, HUANG Guan-hua. Pilot study of salinity (NaCl) affecting nitrogen transformation in silt loam soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5):98-103.
- [30] 陈劲慷, 高丽红, 曹之富, 等. 施肥对设施土壤及作物生育的影响研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊2):16-20.
- CHEN Jin-jing, GAO Li-hong, CAO Zhi-fu. Present situation of the effect of fertilization measures on protected soil and crop[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Suppl2):16-20.
- [31] 王艳博, 黄启为, 孟 琳, 等. 有机无机肥料配施对盆栽菠菜生长和土壤供氮特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(3):44-48.
- WANG Yan-bo, HUANG Qi-wei, MENG Lin, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilization application on growth of spinach and soil nitrogen supply[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3):44-48.
- [32] 杨春悦, 沈其荣, 徐阳春, 等. 有机高氮肥的施用对菠菜生长及土壤供氮能力的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2004, 27(2):60-63.
- YANG Chun-yue, SHEN Qi-rong, XU Yang-chun, et al. Effect of application of organic fertilizer with high nitrogen content on growth of spinach and soil nitrogen supply[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(2):60-63.
- [33] 梁 斌, 赵 伟, 杨学云, 等. 长期不同施肥对旱地小麦土壤氮素供应及吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(5):885-892.
- LIANG Bin, ZHAO Wei, YANG Xue-yun, et al. Effects of long-term different fertilization managements on changes of N in soil and its uptake by wheat on dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(5):885-892.
- [34] 谢 军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20):3934-3943.
- XIE Jun, ZHAO Ya-nan, CHEN Xuan-jing, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20):3934-3943.
- [35] 周连仁, 杨德超. 盐渍化农田有机无机肥配施比例的筛选[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(11):25-28.
- ZHOU Lian-ren, YANG De-chao. Screening of salinization of farmland organic manure and inorganic fertilizer ratio[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(11):25-28.