

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.034

# 有机无机肥配施对盐渍土供氮特性与作物水氮利用的影响

周 慧<sup>1</sup> 史海滨<sup>1</sup> 徐 昭<sup>1</sup> 郭珈玮<sup>1</sup> 付小军<sup>2</sup> 李正中<sup>2</sup>

(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, 巴彦淖尔 015400)

**摘要:** 为探究有机肥替代化肥比例对不同程度盐渍化玉米农田土壤供氮特性及水氮利用效率的影响,于2018年进行了田间试验。选取轻度(0.460 dS/m)和中度(0.951 dS/m)2种盐渍化农田,以纯施氮量240 kg/hm<sup>2</sup>为相同施氮总量进行有机无机肥配施,分别设置5个施肥处理(有机肥占施肥比例分别为0、25%、50%、75%、100%)和1个空白对照处理,依次记为U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1、CK。结果表明,同一处理中度盐渍土氮素矿化量显著低于轻度盐渍土。轻度盐渍土无机肥施入比例越大,土壤矿质氮释放速度越快,有机无机配施能更好地调节玉米生育期氮素的释放。中度盐渍土各处理下,生育前期土壤矿质氮含量无显著差异,增大有机肥施入比例对于提高作物生育后期土壤矿质氮含量的优势明显。同一处理中度盐渍土玉米产量及水氮利用效率较轻度盐渍土显著降低,产量下降幅度达到30.94%~63.90% ( $P < 0.05$ )。适当的有机肥施入比例能显著提高作物水氮利用效率,轻度盐渍土表现出随有机肥施入比例增大玉米水氮利用效率呈先升后降的趋势,中度盐渍土表现出随有机肥施入比例增大玉米水氮利用效率逐渐升高的趋势。轻、中度盐渍土分别以U1O1、O1处理水分利用效率最大,分别较U1处理提高11.84%、27.68% ( $P < 0.05$ ),同时,产量、植株吸氮量、氮收获指数、氮肥当季回收率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率等指标也较高。综合玉米产量、水氮利用效率及生育期土壤矿质氮变化规律,得到河套灌区玉米适宜的有机无机施肥管理模式为:轻度盐渍土为120 kg/hm<sup>2</sup>有机肥+120 kg/hm<sup>2</sup>化肥,中度盐渍土为240 kg/hm<sup>2</sup>有机肥。

**关键词:** 玉米; 盐渍化农田; 有机无机肥配施; 土壤供氮特性; 水氮利用效率

中图分类号: S274; S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)04-0299-09

OSID:



## Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Nitrogen Supply and Crop Water and Nitrogen Utilization in Salinized Soils

ZHOU Hui<sup>1</sup> SHI Haibin<sup>1</sup> XU Zhao<sup>1</sup> GUO Jiawei<sup>1</sup> FU Xiaojun<sup>2</sup> LI Zhengzhong<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Shahaoqu Irrigation Experimental Station, Jiefangzha Management Bureau of Hetao Irrigation District, Bayannur 015400, China)

**Abstract:** Hetao Irrigation District (HID) is a main grain production region in China. Soil salinization and excessive application of chemical fertilizers are main important factors that restricting the food and environmental safety in HID. Reasonable and efficient utilization of fertilizer resources on saline soil to improve crop production efficiency and reduce non-point source pollution of nitrogen are the effective ways to relieve the problem. Farmlands with mild (0.460 dS/m) and moderate (0.951 dS/m) salinization were selected, as a pure nitrogen application rate of 240 kg/hm<sup>2</sup>. The same amount of nitrogen was applied to the different treatments. Five fertilization treatments (the fertilization proportion of organic fertilizer was 0, 25%, 50%, 75% and 100%, respectively) and one blank control were provided, which were designated as U1, U3O1, U1O1, U1O3, O1 and CK, respectively. The field experiment was conducted to explore the response of maize yield to organic nitrogen substituting for inorganic nitrogen fertilizer in different salinized soils, and provide scientific basis for reasonable nitrogen management. Main conclusions were as follows: the amount of nitrogen mineralization in moderate saline soil of the

收稿日期: 2019-08-06 修回日期: 2019-09-08

**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)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400205)和内蒙古自治区科技计划项目(201602049)

**作者简介:** 周慧(1994—),男,博士生,主要从事土壤氮素循环及环境效应研究,E-mail: 792606382@qq.com

**通信作者:** 史海滨(1961—),男,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: shi\_haibin@sohu.com

same treatment was significantly lower than that of mild saline soil. In mild saline soil, mineral nitrogen contents added with more inorganic fertilizer were much higher in early growth stage, while a steady increase of mineral nitrogen content was found in soil which combined application of organic and inorganic fertilizer was added during the whole growth period of maize. In moderate saline soil, there was no significant difference in soil mineral nitrogen content in different treatments at the early growth stage, the increase of applied proportion of organic fertilizer was obvious to the improvement of soil mineral nitrogen content in the later stage of crop growth. The corn yield, water and nitrogen use efficiency in moderate saline soil of the same treatment were significantly lower than those in mild saline soil, and the yield was decreased by 30.94% ~ 63.90% ( $P < 0.05$ ), respectively. The utilization efficiency of water and nitrogen in mild saline soil was increased at first and then decreased, but in moderate saline soil it was increased gradually with the increase of proportion of organic fertilizer. The water use efficiency of mild and moderate saline soil treated with U1O1 and O1 was the highest, which was 11.84% and 27.68% ( $P < 0.05$ ) higher than that of U1, respectively. These two combination also obtained the highest yield, corn N uptake, N harvest index, N recovery, N agronomy efficiency and N partial productivity. Based on the changes of corn yield, water and nitrogen use efficiency and variation of soil mineral nitrogen during growth period, the suitable organic and inorganic fertilizer management models of corn in Hetao Irrigation Area were as follows: mild saline soil should be applied with 120 kg/hm<sup>2</sup> urea + 120 kg/hm<sup>2</sup> organic fertilizer, and moderate saline soil should be applied with 240 kg/hm<sup>2</sup> organic fertilizer.

**Key words:** corn; salinization farmland; combined application of organic and inorganic fertilizers; soil nitrogen supply characteristics; water and nitrogen use efficiency

## 0 引言

内蒙古河套灌区是我国重要的粮食产区,同时也是我国盐渍化发育的典型地区,盐渍化面积已达到灌溉总面积的50%以上<sup>[1]</sup>,过量的盐分严重影响农业生态系统的稳定性和经济发展的可持续性<sup>[2-4]</sup>。此外,灌区为了实现粮食增产,化肥施用量逐年增加<sup>[5]</sup>,目前已超过60万t<sup>[6]</sup>,长期不科学的施肥方式导致大量氮素流失,造成严重的面源污染<sup>[7]</sup>。土壤盐渍化以及过量施用化肥已成为制约灌区粮食安全和环境安全的重要因素。

土壤盐分和养分匮乏是干旱地区作物生产力下降的主要原因<sup>[7]</sup>。在盐胁迫下,作物对水氮吸收及其生理生化反应均产生较大变化<sup>[8]</sup>。ADAMS<sup>[9]</sup>研究发现,盐分胁迫会造成作物养分缺失。PESSARAKLI等<sup>[10]</sup>研究表明,盐分增加导致作物养分吸收利用效率降低。MUNNS等<sup>[11]</sup>研究指出,盐分过高会抑制作物根系吸水能力。ZENG等<sup>[12]</sup>研究得出,作物的水肥利用效率在不同程度盐分胁迫下有所差异。在盐渍化农田中,盐分是影响作物水氮有效利用的重要因素<sup>[13-14]</sup>。研究表明,增施肥料有助于根系吸水能力的增强,但过量施肥会导致作物水分利用效率的下降<sup>[11]</sup>。同时,施肥对土壤含盐量也会造成一定的影响。ULERY等<sup>[15]</sup>研究发现,过量施用氮肥可能会加重土壤盐分,从而对作物生长产生抑制作用。RAVIKOVITCH等<sup>[16]</sup>研究表明,施用氮肥可使土壤达到中等盐度水平。CHEN等<sup>[17]</sup>研究得出,不同土壤盐度与施氮量之间存在着不同的交互作

用。可见,为减少土壤盐害,在盐渍化土壤上施用氮肥应当更为慎重。此外,盐渍化土壤施用氮肥所造成的环境污染也较为严重,周慧等<sup>[18]</sup>研究表明,随着土壤盐分增加,土壤氨挥发总量也增大。也有学者提出,盐分过高会限制作物对氮素的吸收利用,因而增加氮素淋失的风险<sup>[19]</sup>。综上,河套灌区同时存在盐渍化程度差异较大和施肥不合理的问题,因此,针对灌区不同程度盐渍化土壤进行氮肥施用的调控尤为重要。

大量研究表明,在盐渍化土壤中施用有机肥是修复土壤的重要手段<sup>[20-22]</sup>。DU等<sup>[23]</sup>研究表明,施入有机肥有利于减缓土壤盐碱化速率,有机肥最佳施入量与土壤盐分状况密切相关。LIANG等<sup>[24]</sup>研究发现,施用有机肥可提高土壤微生物和酶活性,从而提高植物对盐胁迫的适应能力。此外,有机肥对于提高作物水氮利用效率也具有重要意义。苏秦等<sup>[25]</sup>研究表明,有机肥可以改善土壤水分状况,提高土壤水分利用效率。徐明岗等<sup>[26]</sup>研究发现,有机肥替代化肥可以提高作物氮素积累量,减少环境污染。目前,有机肥替代化肥比例对盐渍化土壤供氮特性及水氮利用效率的研究鲜见报道,不同盐分条件下有机肥最佳返田的比例需要进一步探明。因此,本文针对河套灌区不同程度盐渍化土壤,探求适宜的有机无机肥料配施用量,以期促进粮食增产、提高水氮有效利用率及减小环境污染。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2018年在河套灌区解放闸灌域沙壕渠

试验站进行,试验区属于典型的干旱地区,多年平均降雨量 143 mm,蒸发量 2 100 mm,多年平均气温达到 7.7℃,无霜期为 135~150 d。大于 10℃的年积温为 3 551℃,年平均日照时数 3 200 h,年冻融期大约 180 d。全年太阳总辐射约为 6 000 MJ/m<sup>2</sup>,热量

充足。玉米生育期(4—9月)有效降雨量为 81.6 mm。试验地 0~20 cm 土层为粉壤土,20~40 cm 土层为粉质黏壤土,40~60 cm 土层为粉壤土,60~100 cm 土层为砂壤土。试验区耕层初始土壤性质见表 1。

表 1 试验区土壤基本性状  
Tab. 1 Basic properties of tested soils

盐渍化程度	有机质质量比/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮质量比/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮质量比/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷质量比/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾质量比/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
轻度	14.04	1.43	54.68	37.78	199.67	8.2
中度	13.04	1.07	46.54	23.58	176.33	8.4

## 1.2 试验设计

试验选取轻度(S1)和轻度(S2)2种不同程度盐渍化土壤。播前 S1、S2 土壤 0~40 cm 平均土壤电导率分别为 0.460、0.951 dS/m。供试玉米品种为内单 314,大小行种植,大行距 70 cm,小行距 40 cm,株距 27.7 cm,播种日期为 4 月 27 日,收获日期为 9 月 13 日。以当地优化灌水定额 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>作为灌水量,灌水方式为畦灌,分别于 6 月 14 日、7 月 9 日及 7 月 26 日进行灌溉;以优化施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>为施氮总量(施氮量为换算后的纯氮素量)进行有机无机肥配施。分别在 2 种盐渍化农田设置 5 个施肥处理(化肥占施肥比例分别为 100%、75%、50%、25% 和 0)和 1 个空白对照处理,依次记为 U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1 和 CK,具体施肥设计见表 2。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。各小区间设有 1 m 宽的隔离带并打起 15 cm 高田埂。所施化肥为尿素(含氮质量分数 46%),有机肥为商品有机肥(碳氮比为 7.5,含 N 质量分数 10%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数 1%,K<sub>2</sub>O 质量分数 1%,有机质质量分数大于等于 45%,腐殖酸质量分数大于等于 17%,S 质量分数大于等于 8%),有机肥和磷肥(过磷酸钙 50 kg/hm<sup>2</sup>)于耕作前作为基肥一次性施用,化肥按 1:1 比例分别于玉米播前和拔节期灌水时施入。

表 2 试验处理设计

Tab. 2 Design of experimental treatments

处理	kg/hm <sup>2</sup>		
	纯氮施用量		
	基肥(4月23日)		追肥(6月14日)
	有机氮	无机氮	无机氮
CK	0	0	0
U1	0	120	120
U3O1	60	90	90
U1O1	120	60	60
U1O3	180	30	30
O1	240	0	0

## 1.3 测定项目及方法

### 1.3.1 玉米产量及植株氮素含量

玉米成熟时,在各小区非边行连续取样 20 株,单独收获考种测产,取平均值。用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,靛酚蓝比色法测定玉米植株氮素含量<sup>[27]</sup>。

### 1.3.2 土壤矿质氮含量

土壤样品采集在玉米苗期(5月23日)、拔节期(6月28日)、灌浆期(7月26日)及成熟期(8月25日)进行,取样时将每个小区平均划为 3 个区域进行,作为 3 个重复。取样深度为 100 cm,分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,用氯化钙浸提法对土壤提取土壤矿质氮<sup>[28]</sup>,用连续流动分析仪测定含量。

## 1.4 计算公式及数据统计分析

水分利用效率计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{10ET} \quad (1)$$

其中  $ET = \Delta W + P + I + W_g$  (2)

式中 WUE——水分利用效率,kg/m<sup>3</sup>

Y——玉米产量,kg/hm<sup>2</sup>

ET——作物耗水量,mm

$\Delta W$ ——作物种植和收获后土壤贮水量变化量,mm

P——降雨量,mm

I——灌水量,mm

$W_g$ ——地下水补给量,mm

氮素利用效率计算公式为<sup>[29]</sup>

$$N_{HI} = G_N / P_N \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{EN} = (N - N_0) / F \times 100\% \quad (4)$$

$$P_{FPN} = Y' / F \quad (5)$$

$$A_{EN} = (Y' - Y_0) / F \quad (6)$$

式中  $N_{HI}$ ——氮收获指数,%

$G_N$ ——籽粒吸氮量,kg/hm<sup>2</sup>

$P_N$ ——植株吸氮量,kg/hm<sup>2</sup>

$P_{FPN}$ ——氮肥偏生产力, kg/kg

$A_{EN}$ ——氮肥农学效率, kg/kg

$R_{EN}$ ——氮肥当季回收率, %

$Y'$ ——施氮处理玉米籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>

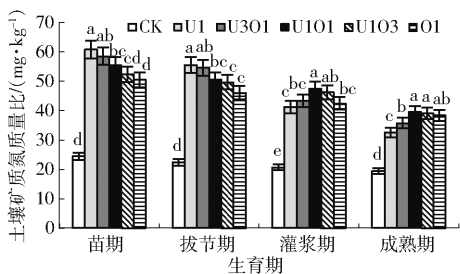
$Y_0$ ——CK 处理玉米籽粒产量, kg/hm<sup>2</sup>

$N$ ——施氮处理地上部总吸氮量, kg/hm<sup>2</sup>

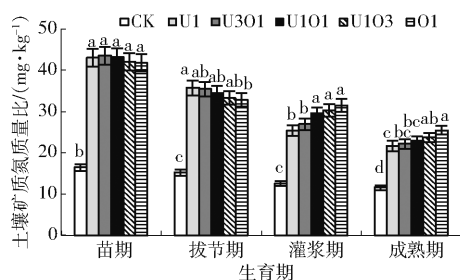
$N_0$ ——CK 处理地上部总吸氮量, kg/hm<sup>2</sup>

$F$ ——施氮量, kg/hm<sup>2</sup>

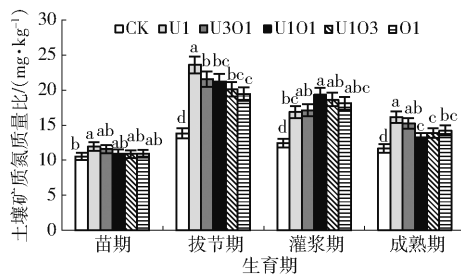
数据处理采用 SPSS 22.0 与 Excel 2016 进行分析及图表绘制, 用 LSD 法进行多重比较确定差异的



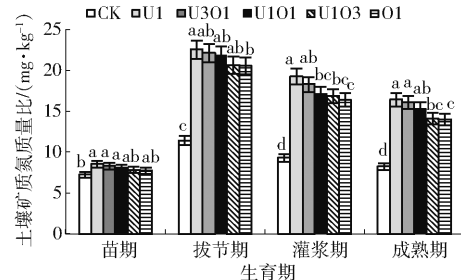
(a) S1, 0~40 cm



(c) S2, 0~40 cm



(b) S1, 40~100 cm



(d) S2, 40~100 cm

图1 不同施肥处理下玉米生育期 S1、S2 土壤矿质氮含量变化规律

Fig.1 Variations of mineral nitrogen in S1 and S2 soils under different nitrogen treatments

在 S1 盐渍土壤, 玉米苗期及拔节期耕层土壤 (0~40 cm) 表现出施入无机肥比例越大土壤矿质氮含量越高的规律, 表明此时配施化肥比例较大的处理肥效较快, 而有机肥矿化速率较为缓慢; 在玉米生长中后期, 配施 50% 以上有机肥的处理供氮能力较强, 其中以 U101 处理土壤矿质氮含量最大, 灌浆期比其余处理显著 (除了 U103 处理不显著) 高 2.83%~15.31% ( $P < 0.05$ ), 成熟期较其余处理显著 (除了 U103、O1 处理不显著) 高 1.04%~21.41% ( $P < 0.05$ )。分析 40~100 cm 土层土壤矿质氮含量发现, 在苗期各处理之间土壤矿质氮含量无显著性差异。进入拔节期, 各处理深层土壤矿质氮含量表现出与耕层土壤相似的趋势, 表明此时期在灌溉作用下土壤矿质氮向深层土壤淋洗, 且无机肥施入比例较大的处理矿质氮运移量较大, 而在灌浆期则呈现出相反的趋势, 配施有机肥较多的处理持续供氮能力更强。在作物生育末期, 以 U101 处理土壤矿质氮含量最低, 表明后期有机无机肥各半配施对深层土壤矿质氮含量吸收利用较大。

显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对生育期土壤矿质氮含量的影响

由图 1 (图中不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著) 可知, 有机无机肥配施对不同程度盐渍化土壤矿质氮释放规律影响各异。在 0~100 cm 土层范围内, 同一处理玉米各生育期 S1 土壤矿质氮含量明显高于 S2; 随着生育期推进, 土壤矿质氮含量整体表现出逐渐降低的趋势。

分析 S2 盐渍土 0~40 cm 土层作物生育期土壤矿质氮含量变化可知, 在作物生育前期, 各施肥处理土壤矿质氮含量差异不明显。而在玉米生长中后期, 表现出随着有机肥施入比例越大土壤矿质氮含量越大的趋势, 灌浆及成熟期 O1 处理土壤矿质氮含量分别比其余施肥处理显著 (除了 U103、U101 处理不显著) 高 3.95%~23.97%、7.49%~17.88% ( $P < 0.05$ )。对于 40~100 cm 土层而言, 在苗期及拔节期各施肥处理土壤矿质氮含量均无显著性差异。而在玉米生长中后期, 表现出随着有机肥施入比例越大土壤矿质氮含量越小的趋势, 说明施入有机肥比例越大的处理作物后期对土壤矿质氮吸收利用量越大。

### 2.2 不同处理对玉米产量及水分利用效率的影响

由表 3 可以看出, 随着土壤盐渍化程度增大, 玉米产量显著降低。在不同盐分条件下, 产量与有机无机肥配施比例的关系表现不一。在 S1 土壤, 随着有机肥施入比例增加, 玉米产量整体表现出先升后降的趋势, 以 U101 处理产量最大, 较其余施肥处理显著 (除了 U103 处理不显著外) 高 5.32%~

12.63% ( $P < 0.05$ )。在 S2 土壤表现为随有机肥施入比例增大玉米产量逐渐增加的态势, O1 处理玉米产量比其余施肥处理显著(除了 U1O3 处理不显著外)高 0.27% ~ 30.48%。同一处理 S2 盐分下玉米产量较 S1 显著降低, 下降幅度达到 30.94% ~ 63.90% ( $P < 0.05$ )。

表 3 不同处理下的玉米产量和水分利用效率

Tab.3 Yield and water use efficiency in maize under different treatments

盐渍化程度	处理	ET/mm	产量/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	WUE/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
S1	CK	397.57	7 857.71 <sup>d</sup>	1.98 <sup>c</sup>
	U1	404.31	10 638.92 <sup>c</sup>	2.63 <sup>b</sup>
	U3O1	407.16	10 780.75 <sup>c</sup>	2.65 <sup>b</sup>
	U1O1	412.58	12 141.97 <sup>a</sup>	2.94 <sup>a</sup>
	U1O3	411.69	11 528.93 <sup>ab</sup>	2.80 <sup>ab</sup>
	O1	408.11	11 237.14 <sup>bc</sup>	2.70 <sup>ab</sup>
S2	CK	376.33	5 975.44 <sup>d</sup>	1.59 <sup>b</sup>
	U1	381.62	6 577.53 <sup>c</sup>	1.72 <sup>b</sup>
	U3O1	382.74	6 740.03 <sup>c</sup>	1.76 <sup>b</sup>
	U1O1	386.29	7 889.14 <sup>b</sup>	2.04 <sup>a</sup>
	U1O3	388.56	8 559.51 <sup>a</sup>	2.20 <sup>a</sup>
	O1	389.99	8 582.22 <sup>a</sup>	2.20 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同。

从表 3 可知,轻度盐分土壤耗水量要高于中度盐分土壤,同一盐分条件下,各处理土壤耗水量差异并不明显,增施有机肥耗水量较单施化肥处理略有增加。盐渍化程度及有机无机肥配施比例对玉米 WUE 影响较大,本研究条件下,作物 WUE 范围在 1.59 ~ 2.94  $\text{kg}/\text{m}^3$  之间。随土壤盐分增加,WUE 显著降低。S1 盐分下 CK、U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1 处理 WUE 比 S2 盐分下分别高 24.47%、52.67%、50.36%、44.10%、27.12%、25.12%。在 S1 盐分条件下,U1O1 处理 WUE 最高,较 U1 处理提高 11.84% ( $P < 0.05$ ),与 U1O3、O1 处理之间无显著性差异,但显著高于其余处理;在 S2 盐分条件下,以 O1、U1O3 处理最高,较 U1 处理提高 27.68% ( $P < 0.05$ ),U1O1、U1O3、O1 处理之间无显著性差异,较其余处理显著提高。

### 2.3 不同处理对氮素吸收利用效率的影响

由表 4 可以看出,各处理植株吸氮量随盐度升高显著降低,S1 土壤 CK、U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1 处理植株氮素吸收总量较 S2 土壤分别高出 40.21%、34.82%、42.93%、44.59%、21.76%、13.68%。同一盐分条件下植株吸氮量随有机无机肥配施比例不同存在差异,S1 盐分下,植株吸氮量随有机肥施入比例增大呈先升后降的趋势,当有机

肥施入比例小于 50% 时,植株吸氮量随有机肥增加而增大,当超过这一水平则逐渐下降,以 U1O1 处理植株吸氮量最大,比其余施肥处理显著(除 U1O3 处理不显著外)高 6.11% ~ 24.40% ( $P < 0.05$ );S2 盐分下,植株吸氮量表现出随有机肥施入比例增大而增加的趋势,以 O1 处理植株吸氮量最大,比其余施肥处理显著(除与 U1O3 处理不显著外)高 2.19% ~ 32.65% ( $P < 0.05$ )。

表 4 不同处理下的氮素利用效率

Tab.4 N use efficiency in maize under different treatments

盐渍化程度	植株处理	氮收 吸氮量/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	氮肥当 获指数/ % 季回收 率/率	氮肥偏 生产力/ ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	氮肥农学 效率/ ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
S1	CK	114.66 <sup>d</sup>	47.62 <sup>b</sup>		
	U1	174.04 <sup>c</sup>	48.81 <sup>b</sup>	24.74 <sup>d</sup>	44.33 <sup>b</sup>
	U3O1	188.24 <sup>bc</sup>	50.49 <sup>b</sup>	30.66 <sup>c</sup>	44.92 <sup>b</sup>
	U1O1	216.51 <sup>a</sup>	54.96 <sup>a</sup>	42.44 <sup>a</sup>	50.59 <sup>a</sup>
	U1O3	204.04 <sup>ab</sup>	54.54 <sup>a</sup>	37.24 <sup>b</sup>	48.04 <sup>ab</sup>
	O1	194.66 <sup>b</sup>	53.30 <sup>a</sup>	33.33 <sup>c</sup>	46.82 <sup>ab</sup>
S2	CK	81.78 <sup>d</sup>	38.18 <sup>c</sup>		
	U1	129.09 <sup>c</sup>	37.62 <sup>c</sup>	19.71 <sup>c</sup>	27.41 <sup>c</sup>
	U3O1	131.70 <sup>c</sup>	43.78 <sup>b</sup>	20.80 <sup>c</sup>	28.08 <sup>c</sup>
	U1O1	149.74 <sup>b</sup>	46.12 <sup>ab</sup>	28.32 <sup>b</sup>	32.87 <sup>b</sup>
	U1O3	167.58 <sup>a</sup>	48.49 <sup>a</sup>	35.75 <sup>a</sup>	35.66 <sup>ab</sup>
	O1	171.24 <sup>a</sup>	46.27 <sup>ab</sup>	37.27 <sup>a</sup>	35.76 <sup>a</sup>

盐分对玉米氮收获指数(NHI)影响较大(表 4),S1 土壤 CK、U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1 处理 NHI 比 S2 土壤分别高 24.74%、29.76%、15.33%、19.17%、12.47%、15.20%,即 NHI 随着盐分含量增加而降低。增施有机肥可以提高玉米氮收获指数,2 种盐分条件下 NHI 均表现出 U1O1、U1O3、O1 处理之间无显著差异,但显著高于单施化肥处理,配施 50% 以上有机肥可以较大程度提高轻、中度盐渍土氮收获指数。

选取氮肥当季回收率(REN)、氮肥偏生产力(PFPN)及氮肥农学效率(AEN)3 个常用指标来表征农田肥料利用效率。就 REN 来看(表 4),当有机肥施入比例小于 50% 时,S1 盐分条件下 REN 显著高于 S2 盐分条件下 REN,当有机肥施入比例超过 50% 时,S1 盐分条件下 REN 呈降低趋势,而 S2 盐分条件下 REN 继续增大,S1、S2 盐分土壤分别以 U1O1、O1 处理 REN 最大,分别较单施化肥提高 17.70%、17.56%。由表 4 可以看出,盐分水平及施肥处理均对 PFPN 有明显影响,盐分增加,PFPN 下降,S1 条件下 U1、U3O1、U1O1、U1O3、O1 处理 PFPN 比 S2 条件下分别高 61.75%、59.95%、

53.91%、34.69%、30.94%，呈现出随着有机肥施入比例增大两种盐分条件下 PFPN 差异逐渐减小的趋势。在相同盐渍化程度下，S1 盐分条件以 U1O1 处理 PFPN 最大，S2 盐分条件下以 O1 处理最大。不同盐分下各施肥处理之间 AEN 差异与 PFPN 差异基本一致。综合各相关指标来看，S1、S2 土壤分别以 U1O1、O1 处理氮肥利用效率较好。

### 3 讨论

盐渍化土壤中盐分和养分是限制作物产量的两大主要因素，二者之间的交互关系与盐渍化程度密切相关。因此，在不同程度盐渍化土壤通过合理的施肥模式来调控作物生育期氮素状况是提高作物产量的重要途径。

盐渍化土壤中肥料矿化特性随着盐渍化程度的不同而不同<sup>[30]</sup>。LAURA<sup>[31]</sup>研究表明，土壤中矿质氮含量通常随着土壤盐分增加而降低，这与本研究的结果相同，即在作物整个生育期内均表现为轻度盐渍化土壤矿质氮含量显著高于中度盐渍化土壤矿质氮含量。这是因为在低盐环境下矿化作用会受到刺激而上升<sup>[32]</sup>，而过量的盐分会对土壤的理化性质和矿化过程产生不利影响<sup>[33]</sup>。研究表明，不同生育阶段作物对氮素的需求与土壤氮有效性之间保持更好的同步将有助于提高氮肥利用效率<sup>[34]</sup>。本文针对轻度盐渍土 0~40 cm 土层研究发现，在玉米生长前期，配施有机肥比例越大的处理其土壤矿质氮含量越小，这种现象是由于有机肥具有矿质化过程缓慢的特性而产生的<sup>[35]</sup>。在玉米生育后期，有机肥肥效持久且不易流失的优势开始体现，其中以有机无机各半配施处理土壤矿质氮含量最大，这一结果可能是由于前期该处理无机化肥较快的矿化速率能及时供应足量无机氮，有机肥分解的氮素易被微生物利用而固定在其体内，到了作物生长后期，微生物的死亡伴随着固持在其体内的氮素释放<sup>[36-37]</sup>，再加上有机肥自身所释放的矿质氮而共同产生。本研究条件下，中度盐渍土不同有机无机肥配施处理在作物生育前期耕层土壤矿质氮含量无明显差异，其原因因为高盐度对无机肥矿化的抑制作用较强，且在盐分较高的条件下，负责将氨盐转换为硝态氮的微生物受到影响<sup>[38]</sup>，从而会加剧土壤氮挥发的损失<sup>[39]</sup>，导致氮素有效性降低，而有机肥的施入可以增加土壤微生物含量及提高土壤酶活性<sup>[40]</sup>，为有机氮素矿化创造较好的环境条件，导致高盐度下有机肥与无机肥的矿化量差异不显著。本试验结果显示，在作物生长后期，有机肥施入比例越大的处理其耕层土壤矿质氮含量越大，说明在中度盐渍化土壤有机肥在

后期对于氮素的持续供应能力较强。本研究发现，轻、中度盐渍土在作物生育后期均表现出配施 50% 以上有机肥的各处理深层土壤矿质氮含量较小，这可能是由于施入较多的有机肥可以促进作物根系生长，提高根冠比，促使作物对深层土壤养分的吸收利用<sup>[41]</sup>。有研究表明，有机肥的碳氮比是决定其氮素矿化最主要的特性指标之一<sup>[42]</sup>，较宽的碳氮比会为微生物提供大量碳源，部分氮素会被微生物吸收，因此会出现氮的净固定<sup>[43]</sup>，而随着碳氮比变窄会出现氮的净矿化。一般认为，当有机肥的碳氮比小于 15 时，有机肥可出现净固定<sup>[44]</sup>，本试验所施用的有机肥碳氮比为 7.5，其氮素有效性较高，可为作物生长提供较为充足的无机养分。

作物氮素积累、分配及氮素利用效率与最终籽粒产量形成关系密切。本研究表明，随着土壤盐分增加，作物吸氮量降低，这是因为根系土壤盐分过高导致土壤或者营养液渗透势减小，从而抑制作物对氮的吸收能力<sup>[45]</sup>。左青松等<sup>[46]</sup>研究发现，盐分含量增加，会导致植株氮素向籽粒的转运效率降低，这可能也是本研究中度盐分土壤氮收获指数低于轻度盐分土壤氮收获指数的原因。合理调配生育期氮素供应过程对于提高氮素利用效率尤为重要。本研究结果显示，轻度盐渍化土壤以有机无机肥各半配施处理氮素利用效率较高，而中度盐渍化土壤则呈现出随有机肥施入比例越大氮素利用效率越高的趋势，原因在于：盐分较低时，盐度对作物生长抑制较小，在玉米生长前期需要无机肥供应适量的无机氮满足其发育所需，但过量施入无机肥又会造成浪费，因此，施用有机肥来替代部分无机肥可以减少前期矿质氮过量累积造成挥发、淋洗等损失，进入作物生育后期，有机肥持续矿化又能稳定地释放无机氮供作物吸收利用；在盐度较高的条件下，盐分会影响植物正常的营养吸收，抑制其生长<sup>[47]</sup>，过量施入无机化肥并不能被作物有效吸收，且本研究发现，盐分显著降低了无机肥的有效性，导致有机肥和无机肥所产生的土壤矿质氮含量在生育前期并无显著性差异，而在生育中后期则呈现出随着有机肥施入比例越大土壤矿质氮含量越多的态势。有机肥中大量疏松的有机物质可以降低土壤压实指数及改善土壤结构<sup>[48-49]</sup>，易于盐分淋洗的同时还能抑制盐分随水分蒸发产生表聚效应，从而可以起到降低土壤盐分的作用，促进作物对养分的吸收，这也可能是本研究中度盐渍化土壤中增加有机肥施入比例对于提高肥料利用效率优势更加明显的原因。研究表明，玉米在生育前期氮素积累量较少，在生育中后期出现氮素吸收高峰<sup>[50]</sup>，本研究 2 种盐分条件下配施 50% 以上

有机肥处理土壤矿质氮含量在作物生育后期显著高于施入无机肥比例较大的处理,这也是配施有机肥可以提高肥料利用效率的重要原因之一。

本研究表明,同一盐分条件下,各有机无机肥配施处理之间土壤耗水量并无显著差异,这是因为虽然有机肥的施入可以提高土壤含水率<sup>[51]</sup>,但同时也给作物提供了良好的水肥环境,对土壤水分造成较大的消耗,导致各处理之间土壤贮水量变化差异并不明显。本研究结果显示,随着土壤盐渍化程度增大作物水分利用效率降低,这是因为土壤盐分过高时,土壤溶液渗透压也随之提高,从而导致水分有效性降低,使植物吸水困难。也有可能因为盐分浓度过高致使作物出现生理干旱现象,抑制作物生长,造成作物减产<sup>[52]</sup>。LEA-COX等<sup>[53]</sup>研究发现,在盐分胁迫条件下,作物对氮素吸收的减少与其对水分利用的减少具有极大相关性,盐渍化土壤中这种复杂的机制也是导致作物水肥利用效率降低的直接原因。已有研究表明<sup>[54]</sup>,施有机肥可以显著提高作物水分利用效率,这与本试验研究结果基本一致,这是因为施入有机肥使土壤总空隙度及土壤养分状况得到明显改善,利于作物生长及水分利用率的提高<sup>[55-56]</sup>。有机无机肥配施对作物的产量效应受土壤基础地力的影响较大<sup>[57]</sup>,本试验初始土壤肥力较好,土壤本身可提供的无机养分较多,这可能也是导致增大有机肥施入比例对于增产及提高作物水氮利用效率效果明显的直接原因。

## 4 结论

(1)土壤盐分水平由 0.460 dS/m 增至 0.951 dS/m

时,各处理土壤氮素矿化量显著减少;盐分水平为 0.460 dS/m 时,无机肥施入比例越多,氮素释放速度越快,有机无机肥配施能更好地调节生育期土壤氮素释放;盐分水平升至 0.951 dS/m 时,在生育前期各处理土壤矿质氮含量无明显差异,增大有机肥施入比例可以显著提高玉米生育后期土壤矿质氮含量。

(2)不同盐分条件下,有机无机肥配施对作物产量及水分利用效率影响不同。盐分水平为 0.460 dS/m 时,有机肥替代 50% 化肥可获得最高产量(12 141.97 kg/hm<sup>2</sup>)及水分利用效率(2.94 kg/m<sup>3</sup>),比单施化肥分别高 12.63%、11.84%;盐分水平为 0.951 dS/m 时,有机肥替代 100% 化肥处理产量最高(8 582.22 kg/hm<sup>2</sup>),同时可以获得较高的水分利用效率(2.20 kg/m<sup>3</sup>),比单施化肥分别高 30.48%、27.68%。

(3)随着土壤盐分增加,同一处理植株吸氮量及氮收获指数显著降低,下降幅度分别达到 13.68%~44.59% 和 12.47%~29.76%。盐分水平为 0.460、0.951 dS/m 时,分别以有机肥替代 50% 化肥、有机肥替代 100% 化肥处理可以获得较高的氮素利用效率。

(4)通过有机肥替代化肥比例对生育期土壤供氮特性、玉米产量、水氮利用及环境友好等进行综合评判得出,在施氮总量为 240 kg/hm<sup>2</sup> 时,灌区轻度盐渍化土壤应该采用有机肥替代 50% 化肥的施肥方式,中度盐渍化土壤以有机肥替代 100% 化肥较优,这种施肥管理模式可以达到增加产量效益、降低氮素污染的目的。

## 参 考 文 献

- [1] FENG Z Z, WANG X K, FENG Z W. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(2):131-143.
- [2] WICHELINS D, QADIR M. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157:31-38.
- [3] LI X B, KANG Y H, WAN S Q, et al. First and second-year assessments of the rapid reconstruction and re-vegetation method for reclaiming two saline-sodic, coastal soils with drip-irrigation[J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 496-505.
- [4] LIU G, LI J, ZHANG X, et al. GIS-mapping spatial distribution of soil salinity for eco-restoring the Yellow River Delta in combination with electromagnetic induction[J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 306-314.
- [5] 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 Peiling, LI Yunkai, et al. Nitrogen balance in the farmland system based on water balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16):4549-4559. (in Chinese)
- [6] GAO Ying, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize intercropping system in an arid region of northwestern China[J]. Field Crops Research, 2014, 167(5):19-30.
- [7] ASHRAF M, WAHEED A. Responses of some genetically diverse lines of chick pea (*Cicer arietinum* L.) to salt[J]. Plant and Soil, 1993, 154(2):257-266.
- [8] RODRIGUEZ-URIBE L, HIGBIE S M, STEWART J M, et al. Identification of salt responsive genes using comparative microarray analysis in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Plant Science, 2011, 180(3):461-469.
- [9] ADAMS P. Effect of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomato grown in rockwool[J]. Journal of Horticultural Sciences, 1991, 66(2):201-207.
- [10] PESSARAKLI M, TUCKER T C. Dry matter yield and nitrogen-15 uptake by tomatoes under sodium chloride stress[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(3):698-700.

- [11] MUNNS R, PASSIOURA J. Hydraulic resistance of plants. III. Effects of NaCl in Barley and Lupin[J]. Functional Plant Biology, 1984, 11(5):351-359.
- [12] ZENG W, XU C, HUANG J, et al. Emergence rate, yield, and nitrogen-use efficiency of sunflowers (*Helianthus annuus*) vary with soil salinity and amount of nitrogen applied[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(8):1006-1023.
- [13] IRSHAD M, HONNA T, YAMAMOTO S, et al. Nitrogen mineralization under saline conditions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(11-12):1681-1689.
- [14] 徐昭,史海滨,李仙岳,等. 不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):334-343.  
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xieyue, et al. Response of maize yield to irrigation and nitrogen rate in three salinization farmlands [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):334-343. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190538&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190538&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.038. (in Chinese)
- [15] ULERY A L, CATALANVALENCIA E A, VILLACASTORENA M, et al. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6):1781-1789.
- [16] RAVIKOVITCH S, YOLES D. The influence of phosphorus and nitrogen on millet and clover growing in soils affected by salinity[J]. Plant & Soil, 1971, 35(3):555-567.
- [17] 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(1-2):61-73.
- [18] 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 Haibin, 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. (in Chinese)
- [19] KATERJI N, MASTRORILLI M, LAHMER F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38(1):1-9.
- [20] WU Yupeng, LI Yufei, ZHANG Yi, et al. Responses of saline soil properties and cotton growth to different organic amendments [J]. Pedosphere, 2018, 28(3):161-169.
- [21] XU H, HUANG X, ZHONG T, et al. Chinese land policies and farmers'adoption of organic fertilizer for saline soils[J]. Land Use Policy, 2014, 38:541-549.
- [22] GAFFAR M O, IBRAHIM Y M, WAHAB, et al. Effect of farmyard manure and sand on the performance of sorghum and sodicity of soils[J]. J. Indian Soc. Soil Sci., 1992,40(3):540-543.
- [23] DU L F, LIU W K, LIU J L. Effects on rape biomass and salty concentration of salinity soil applied with three straw manures and effective dose[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005,3:309-312.
- [24] LIANG Y, SI J, NIKOLIC M, et al. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(6):1185-1195.
- [25] 苏秦,贾志宽,韩清芳,等. 宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1466-1469.  
SU Qin, JIA Zhikuan, HAN Qingfang, et al. Effects of organic fertilization on soil moisture and crop productivity in semi-arid areas of Southern Ningxia[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6):1466-1469. (in Chinese)
- [26] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.  
XU Minggang, LI Dongchu, LI Jumei, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10):3133-3139. (in Chinese)
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [28] HOUBA V J G, NOVOZAMSKY J, HUYBREGTS A W M, et al. Comparison of soil extractions by 0.01 M CaCl<sub>2</sub> by EUF and by some conventional extraction procedures [J]. Plant and Soil, 1986, 96(3):433-437.
- [29] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(4):836-845.  
HOU Yunpeng, HAN Liguang, KONG Lili, et al. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(4):836-845. (in Chinese)
- [30] GANDHI A P, PALIWAL K V. Mineralization and gaseous losses of nitrogen from urea and ammonium sulphate in salt-affected soils[J]. Plant and Soil, 1976, 45(1):247-255.
- [31] LAURA R D. Salinity and nitrogen mineralization in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1977, 9(5):333-336.
- [32] MCCLUNG G, FRANKENBERGER W T. Nitrogen mineralization rates in saline vs. salt-amended soils[J]. Plant and Soil, 1987, 104(1):13-21.
- [33] ROUSK J, ELYAAGUBI F K, JONES D L, et al. Bacterial salt tolerance is unrelated to soil salinity across an arid agroecosystem salinity gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(9):1881-1887.
- [34] 银敏华,李援农,李昊,等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):129-138.  
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6):129-138. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160617&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160617&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017. (in Chinese)



- [35] SEUFERT V, RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. *Nature*, 2012, 485(7397):229–232.
- [36] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12):1575–1578.  
ZHANG Yali, ZHANG Juan, SHEN Qirong, et al. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12):1575–1578. (in Chinese)
- [37] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1):89–96.  
XU Yangchun, SHEN Qirong, RAN Wei. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):89–96. (in Chinese)
- [38] KUMAR U, KUMAR V, SINGH J P. Effect of different factors on hydrolysis and nitrification of urea in soils[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2007, 53(2):173–182.
- [39] ASLAM M, QURESHI R H. Fertilizer management in salt-affected soils for high productivity [C] // *Proceedings of the Symposium on “Plant Nutrition for Sustainable Plant Growth”*, 1998:89–109.
- [40] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17):5502–5511.  
MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17):5502–5511. (in Chinese)
- [41] 陈倩, 刘照霞, 邢玥, 等. 有机无机肥分次配施对嘎啦苹果生长、N-尿素吸收利用及损失的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4):1367–1372.  
CHEN Qian, LIU Zhaoxia, XING Yue, et al. Effects of split combined application of organic-inorganic fertilizers on the plant growth, <sup>15</sup>N absorption, utilization and loss of Gala apple tree[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1367–1372. (in Chinese)
- [42] CORDOVIL C M D S, CABRAL F, COUTINHO J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J]. *Bioresour Technology*, 2007, 98(17):3265–3268.
- [43] AVIVA H, RITA P. Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures incubated in soil [J]. *Journal of Environment Quality*, 1994, 23(6):1184–1189.
- [44] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):749–757.  
LI Lingling, LI Shutian. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(3):749–757. (in Chinese)
- [45] HOORN J W V, KATERJI N, HAMDY 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(2):87–98.
- [46] 左青松, 蒯婕, 刘浩, 等. 土壤盐分对油菜氮素积累、运转及利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3):827–833.  
ZUO Qingsong, KUAI Jie, LIU Hao, et al. Effects of soil salt content on accumulation, translocation and utilization efficiency of nitrogen in rapeseeds[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3):827–833. (in Chinese)
- [47] CHINNUSAMY V, JAGENDORF A, ZHU J K. Understanding and improving salt tolerance in plants [J]. *Crop Science*, 2005, 45(2):437–448.
- [48] CELIK I, ORTAS I, KILIC S. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxeret soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1):59–67.
- [49] MIKHA M M, RICE C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3):809–816.
- [50] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5):622–627.  
ZHAO Ying, TONG Yan'an, ZHAO Hubing. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5):622–627. (in Chinese)
- [51] LI F, YU J, NONG M, et al. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2):231–239.
- [52] 陆景陵. *植物营养学* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [53] LEA-COX J D, SYVERTSEN J P. Salinity reduces water use and nitrate-N-use efficiency of citrus [J]. *Annals of Botany*, 1993, 72(1):47–54.
- [54] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):144–149.  
WANG Xiaojuan, JIA Zhikuan, LIANG Lianyou, et al. Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic returns of maize in dryland farming [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6):144–149. (in Chinese)
- [55] GOPINATH K A, SAHA S, MINA B L, et al. Influence of organic amendments on growth, yield and quality of wheat and on soil properties during transition to organic production [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82(1):51–60.
- [56] FAN T, STEWART B A, YONG W, et al. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 106(4):313–329.
- [57] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(1):106–112.  
LIU Shoulong, TONG Chengli, WU Jingshui, et al. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):106–112. (in Chinese)