

# 施氮量对土壤水氮盐分布和玉米生长及产量的影响

曹和平<sup>1</sup>, 蒋静<sup>1\*</sup>, 翟登攀<sup>2</sup>, 张超波<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024;

2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要:**【目的】探究盐渍化土壤下玉米适宜的施氮量。【方法】试验于2019年5—9月在太原理工大学水利科学与工程学院试验地的遮雨棚进行, 采用桶栽方式种植玉米, 设置4个施氮量水平N0(不施氮)、N1(225 kg/hm<sup>2</sup>)、N2(275 kg/hm<sup>2</sup>)和N3(325 kg/hm<sup>2</sup>)。【结果】施氮会明显改变水氮盐在土壤中的分布, 0~40 cm土层的体积含水率随施氮量增加而显著( $p < 0.05$ )减小。各测定时期的土壤电导率随施氮量增加而增大, 拔节—抽雄期比苗期升高0.968~1.542 dS/m, 完熟期比抽雄期降低4.740~5.471 dS/m。土壤硝态氮和铵态氮量随玉米生育期推进而降低, 且在各时期随施氮量增加而增大。施氮显著促进了玉米生长, 提高其耗水量及水分利用效率, 且各指标均随施氮量增加而增大, N2处理和N3处理间无显著差异( $p > 0.05$ )。与N3处理相比, N2处理节约肥料50 kg/hm<sup>2</sup>, 且氮肥偏生产力高3.4 kg/kg, 差异显著( $p < 0.05$ )。【结论】综合考虑不同施氮量对土壤水氮盐分布规律、玉米生长指标和耗水特性的影响, 得出该地区盐渍化土壤下玉米较适宜的施氮量为275 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 玉米; 产量; 水分利用效率; 土壤电导率; 硝态氮; 铵态氮

中图分类号: S279

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021409

OSID:



曹和平, 蒋静, 翟登攀, 等. 施氮量对土壤水氮盐分布和玉米生长及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 47-54.  
CAO Heping, JIANG Jing, ZHAI Dengpan, et al. Nitrogen Fertilization Modulates Spatial Distribution of Water, Nitrogen and Salt in Soil, and Growth and Yield of Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 47-54.

## 0 引言

【研究意义】玉米的产量和种植面积居主粮之首, 是我国粮食生产的关键作物<sup>[1]</sup>。然而我国的玉米平均单产(5 028 kg/hm<sup>2</sup>)仍落后于发达国家<sup>[2]</sup>。盐碱地在我国分布广泛, 其中可用于农业生产的面积高达1 300万hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。玉米是盐碱地种植的主要作物, 但其耐盐性较差, 容易遭受盐分胁迫而减产。因此, 提升盐碱地玉米生产力对确保我国粮食安全至关重要。【研究进展】氮素是促进作物生长和提高产量的重要因子<sup>[4]</sup>。氮肥的施用能够在一定程度上促进作物生长, 提高产量及水分利用效率<sup>[5-7]</sup>。增施氮肥可显著提高玉米的生长指标和产量<sup>[8-9]</sup>。适宜的施氮量还可促进玉米的生长发育进程, 显著提高作物产量和水氮利用效率<sup>[10-11]</sup>。盐渍化土壤一般较贫瘠, 水肥利用效率低, 从而种植效益不佳。为了追求粮食高产, 在盐碱地农业生产中普遍存在施肥过量的现象。过量的氮素投入不仅导致氮肥利用率降低, 而且可能加重土

壤盐渍化程度, 严重破坏生态环境<sup>[12-13]</sup>。所以, 科学合理的施氮除了提高玉米的生产水平外, 还可减少氮肥的损耗及减轻对生态环境的影响, 从而实现农业的可持续生产<sup>[14]</sup>。【切入点】前人主要通过控制施氮水平来研究氮素对作物生长和产量等的影响, 进而提高作物产量和氮肥利用效率<sup>[15-18]</sup>。然而氮肥不仅是作物生长和产量提高的必要元素, 在盐渍土情况下, 合理施氮可以缓解盐分胁迫对作物生长的影响, 而过量施氮则会加重盐碱地土壤的盐渍化程度。因此, 关于施氮对盐渍化土壤条件下玉米的影响还有待进一步研究。【拟解决的关键问题】本研究通过比较玉米在遮雨棚桶栽种植方式下不同施氮量对土壤水氮盐分布规律、玉米生长指标和耗水特性的影响, 探究盐碱地玉米适宜的施氮量, 以期实现玉米的高产。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

2019年5—9月在山西省太原理工大学试验地的遮雨棚(112°30'E, 37°51'N)进行玉米桶栽试验。该试验地海拔785 m, 年均气温11.7℃, 全年≥10℃的积温4 080.9℃, 年日照时间2 471.4 h, 年平均相对湿度52.6%, 霜冻期为当年10月中旬至第2年的4月中旬, 无霜期大约149~175 d。

收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放课题(2019001); 山西省基础研究计划项目(201901D211101)

作者简介: 曹和平(1997-), 男, 河北邢台人。硕士研究生, 主要从事土壤水氮盐运移等方面的研究。E-mail: 1376745099@qq.com

通信作者: 蒋静(1984-), 女, 山东枣庄人。副教授, 主要从事节水灌溉、水土资源与环境方面的研究。E-mail: jiangjing@tyut.edu.cn

## 1.2 桶栽试验布置及管理

供试玉米品种为“中地 88”，桶栽试验装置为聚氯乙烯 (polyvinyl chloride polyper, PVC) 管。管壁厚度为 5 mm，管道内径为 30 cm，管道高度为 50 cm。底部连接排水管，排水管内径 1.5 cm。土壤采集于山西省农业科学院盐碱地改良试验基地 (113°15'E, 39°54'N)，采集深度为 0~40 cm，土壤质地为砂壤土，砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为 54.5%、34.7% 和 10.8%。土壤初始电导率为 0.636 dS/m，平均体积质量为 1.53 g/cm<sup>3</sup>，田间持水率为 32% (体积含水率)。土壤经自然风干和碾压过筛 ( $D=2$  mm) 去除杂草及石块。装置底部铺设不同粒径的碎石及河沙，构成高度为 3 cm 的反滤层。根据田间实测土壤体积质量分层填装土柱，高度为 40 cm，并对土层之间做打毛处理。氮肥使用尿素 ( $N\geq 46.4\%$ )，参照当地玉米施肥量 ( $N: 200\sim 350$  kg/hm<sup>2</sup>) 设置 4 个施氮处理: N0 (不施氮)、N1 (225 kg/hm<sup>2</sup>)、N2 (275 kg/hm<sup>2</sup>) 和 N3 (325 kg/hm<sup>2</sup>)，按 7:3 的比例分别于播种前和拔节期均匀施入。磷、钾肥分别选用过磷酸钙 ( $P_2O_5\geq 16\%$ , 80 kg/hm<sup>2</sup>) 和硫酸钾 ( $K_2O\geq 51\%$ , 40 kg/hm<sup>2</sup>)，均作为底肥施入。当土壤条件一定，土壤水氮盐的分布

状况主要取决于灌溉制度。灌水会影响土壤的根际微气候环境，若灌水过多会造成土壤通气性降低、根系呼吸减弱，水分过少又会出现土壤干燥、温度过高等问题，都会限制作物的生长发育，因此选择合适的灌水定额至关重要。本试验采用称质量法测定管内的土壤含水率，当含水率低于 1/2 的田间持水率时对玉米进行灌水，用量杯补至田间持水率的 90%。因玉米在不同生育时期的需水量有差异，所以灌水的周期不固定，一般为 3~8 d。试验各处理随机区组排列，每个处理 4 组重复。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 土壤指标的测定

玉米的生育阶段划分如表 1 所示。分别于播种前 (0504)、苗期 (0604)、拔节期 (0621)、大喇叭口期 (0716)、抽雄期 (0815) 和完熟期 (0910) 利用内径为 38 mm 的土钻分层采集土样，取样深度为 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm，共 4 层。所取土样部分置于铝盒先采用烘干法测定含水率，之后测定电导率；部分置于自封袋用于测定土壤硝态氮和铵态氮量。此外，取样点还需做回填、夯实及标记处理。

表 1 玉米生育阶段划分

Table 1 Maize growth stages division

生育阶段	播种期—苗期	苗期—拔节期	拔节期—大喇叭口期	大喇叭口期—抽雄期	抽雄期—完熟期
日期	0504—0604	0604—0621	0621—0716	0716—0815	0815—0910

新鲜土样采用 UV-5500 型紫外可见分光光度计 (METASH 上海元析仪器有限公司，中国) 测定铵态氮 (靛酚蓝比色法) 和硝态氮 (双波长紫外分光光度法) 量。将烘干后的土样粉碎，过 2 mm 筛孔，制备土壤饱和浸提液 (土水比为 1:5)，采用 SG3-ELK742 型电导率仪 (Mettler-Toledo International Inc., Switzerland) 测定电导率 ( $EC_{1:5}$ )。

### 1.3.2 生长指标及产量的测定

于完熟期 (0910) 测定玉米的生长指标和产量及其构成要素。使用 0.1 mm 精度的游标卡尺测定玉米的茎粗 (植株第 3 节扁面直径)，0.01 cm 精度的卷尺测定玉米的株高 (地面至穗顶) 和所有叶片的长度及最大宽度，玉米叶面积指数计算式为：

$$LAI = \sum_{i=0}^k (0.75l_i b_i / f), \quad (1)$$

式中: LAI 为玉米叶面积指数 (cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>)；k 为叶片数；0.75 为系数； $l_i$  为单片叶长度 (cm)； $b_i$  为单片叶宽度 (cm)；f 为单株占地面积 (cm<sup>2</sup>)。

在完熟期将所有玉米从茎基部取下，洗净后分为茎、叶、果穗，放入烘箱 105 °C 杀青 2 h，75 °C 烘干至恒重，测定产量及其构成要素。采用 0.01 cm 精度的卷尺测定玉米的穗长，0.1 mm 精度的游标卡尺测

定穗粗，玉米穗脱粒后计数其籽粒数，选取 100 粒籽粒用 0.1 g 精度的电子称称量其质量，每个处理取 3 个重复。

### 1.3.3 耗水量的计算

玉米的阶段耗水量计算式为：

$$ET = P + I + K + \Delta W - D - R, \quad (2)$$

式中: ET 为阶段耗水量 (mm)；P 为降水量 (mm)；I 为灌溉量 (mm)；K 为地下水补给量 (mm)； $\Delta W$  为某阶段初始和最终土壤蓄水量的差值 (mm)；D 为深层渗漏量 (mm)；R 为地表径流量 (mm)。因本试验在遮雨棚内进行，采用桶栽方式种植玉米，故 P、K、D 忽略不计，所以该公式简化为  $ET = I + \Delta W$ 。

### 1.3.4 水氮利用效率

$$WUE = Y / ET, \quad (3)$$

式中: WUE 为玉米水分利用效率 (kg / (hm<sup>2</sup> mm))；Y 为玉米籽粒产量 (kg/hm<sup>2</sup>)；ET 为玉米全生育期总耗水量 (mm)。

$$NPFPP = Y_N / F_N, \quad (4)$$

$$NAE = (Y_N - Y_0) / F_N, \quad (5)$$

式中: NPFPP 为氮肥偏生产力 (kg/kg)；NAE 为氮肥农学利用效率 (kg/kg)； $Y_N$  和  $Y_0$  分别为施氮区和不

施氮区的玉米籽粒产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $F_N$  为施氮量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

### 1.3.5 土壤硝态氮累积量

$$SNA = SN \times SBD \times H / 10, \quad (6)$$

式中:  $SNA$  为土壤硝态氮累积量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $SN$  为土壤硝态氮量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $SBD$  为土壤体积质量 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $H$  为土层厚度 ( $\text{cm}$ )。

### 1.4 数据处理及分析

使用 Microsoft excel 2016 软件进行数据处理; 采用 Surfer 15.0 进行网格化处理, 绘制等值线图; 用 SPSS 20.0 进行方差统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分和电导率

#### 2.1.1 土壤含水率分布

各个处理土壤水分的垂直变化趋势在每个测定

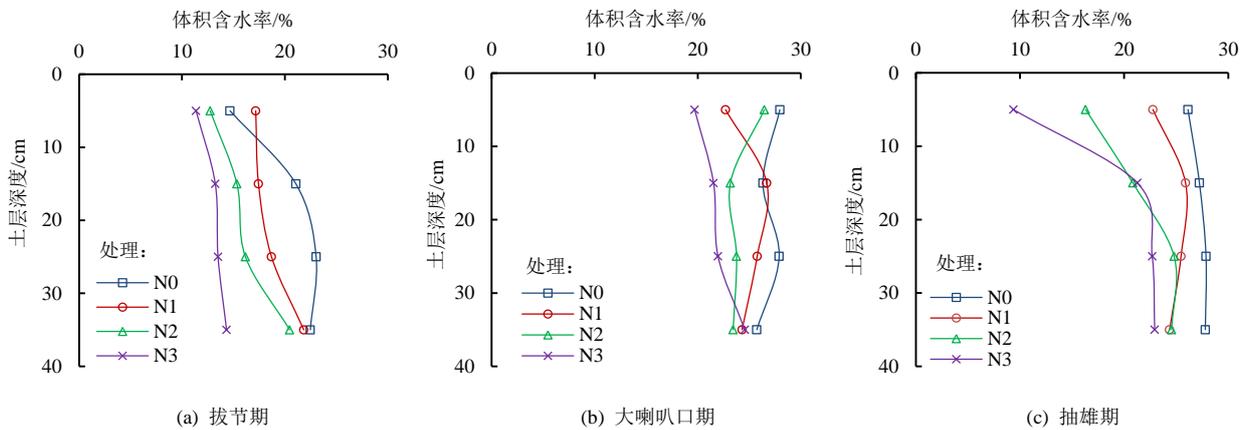


图 1 不同生育时期土壤水分分布

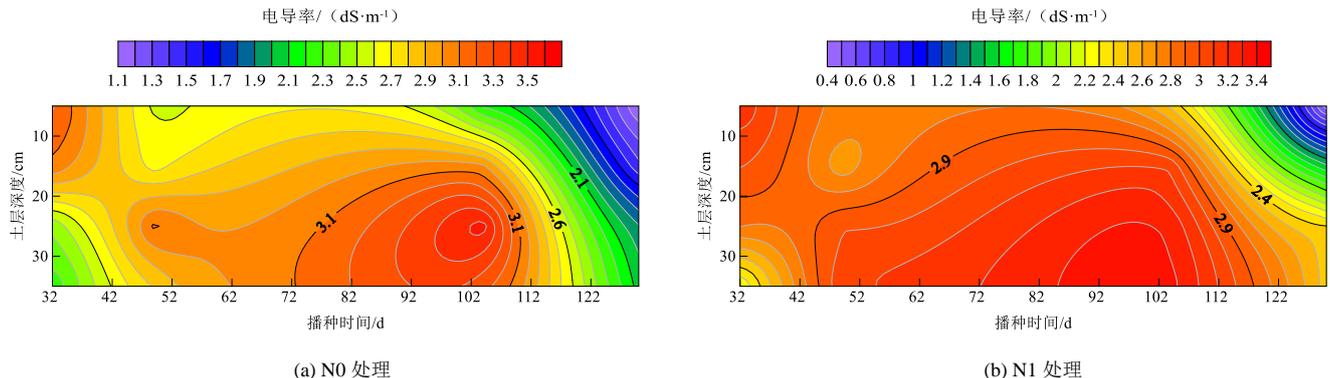
Fig.1 Distribution of soil moisture at different growth stages

#### 2.1.2 土壤电导率分布

各施氮处理土壤电导率在拔节—抽雄期(49~104 d)比苗期(32 d)升高 0.123~1.542 dS/m, 完熟期(130 d)比抽雄期(49 d)降低 4.740~5.471 dS/m(图 2)。N0、N1、N2 处理和 N3 处理在完熟期 0~40 cm 土层的土壤电导率与苗期相比分别降低 4.446、4.361、3.615 dS/m 和 3.421 dS/m。土壤电导率在苗期和拔节期随土层深度的增加而降低, 在抽雄期和完熟期随土层

时期基本一致(图 1)。其中, 各处理在拔节期的土壤体积含水率随土层深度增加而增大, 10~40 cm 比 0~10 cm 土层的含水率高 0.019~0.084  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , N2 处理的变化幅度最大; 大喇叭口期的土壤体积含水率介于 0.197~0.280  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  之间, 各土层均保持较高水平; 抽雄期 10~20 cm 比 0~10 cm 土层的体积含水率高 0.011~0.119  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , N3 处理的变化幅度最大; 20~40 cm 土层体积含水率几乎保持不变。在各生育时期, 0~40 cm 土层都表现为施氮量越高体积含水率越低。与 N0 处理相比, N1、N2 处理和 N3 处理在拔节期的土壤体积含水率分别降低 8.1%、25.6% 和 54.9%, 大喇叭口期分别降低 8.5%、11.5% 和 23.0%, 抽雄期分别降低 10.7%、26.1% 和 43.0%, 差异显著 ( $p < 0.05$ ); N1、N2 处理和 N3 处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

深度增加而增大。完熟期 N0、N1、N2 处理和 N3 处理 20~40 cm 土层电导率与 0~20 cm 土层相比高 56.7%~151.8%。除抽雄期 N2 处理和 N3 处理外, 0~40 cm 土层电导率均随施氮量增加而增大, N1、N2 处理和 N3 处理在苗期与 N0 处理相比分别高 2.0%、3.0% 和 3.1%, 拔节期分别高 2.4%、3.0% 和 3.3%, 抽雄期分别高 2.2%、8.5% 和 6.2%, 完熟期分别高 5.0%、18.7% 和 22.7%。



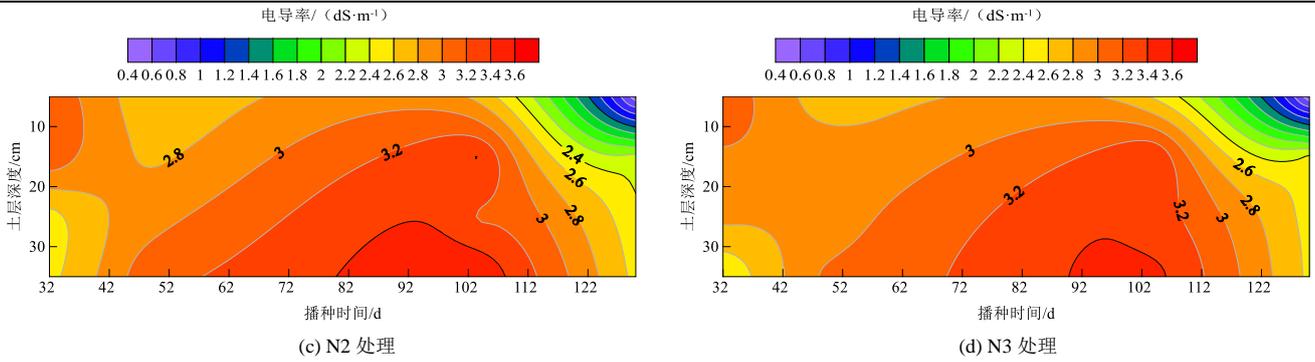


图 2 不同处理的土壤电导率时空分布等值线图

Fig.2 Isoline map of temporal and spatial distribution of soil conductivity under different treatments

### 2.2 土壤硝态氮和铵态氮

土壤硝态氮和铵态氮量随玉米的生育期推进逐渐降低, 沿土层深度方向的变化不明显(图 3)。在 0~40 cm 土层, N0、N1、N2 处理和 N3 处理的硝态氮量拔节比苗期降低 8.4%~11.6%, 抽雄比拔节期降低 3.6%~8.1%, 完熟比抽雄期降低 12.3%~17.4%; 铵态氮量拔节比苗期降低 11.7%~26.2%; 抽雄比拔节期降低 25.0%~38.2%; 完熟比抽雄期降低 49.3%~55.5%。

可以看出, 铵态氮量随玉米生育期推进降低的幅度更大, 尤其在抽雄—完熟期。这是由于玉米在生长过程中吸收了大量氮素, 且在抽雄期到完熟期吸收的氮素最多。N1、N2 处理和 N3 处理的硝态氮量在各生育期比 N0 处理高 1.4%~9.5%, 铵态氮量高 9.9%~53.3%。各生育时期的硝态氮(除抽雄期外)和铵态氮量均随施氮量增加而增大, 所以高氮处理更容易导致氮素在土壤中积累。

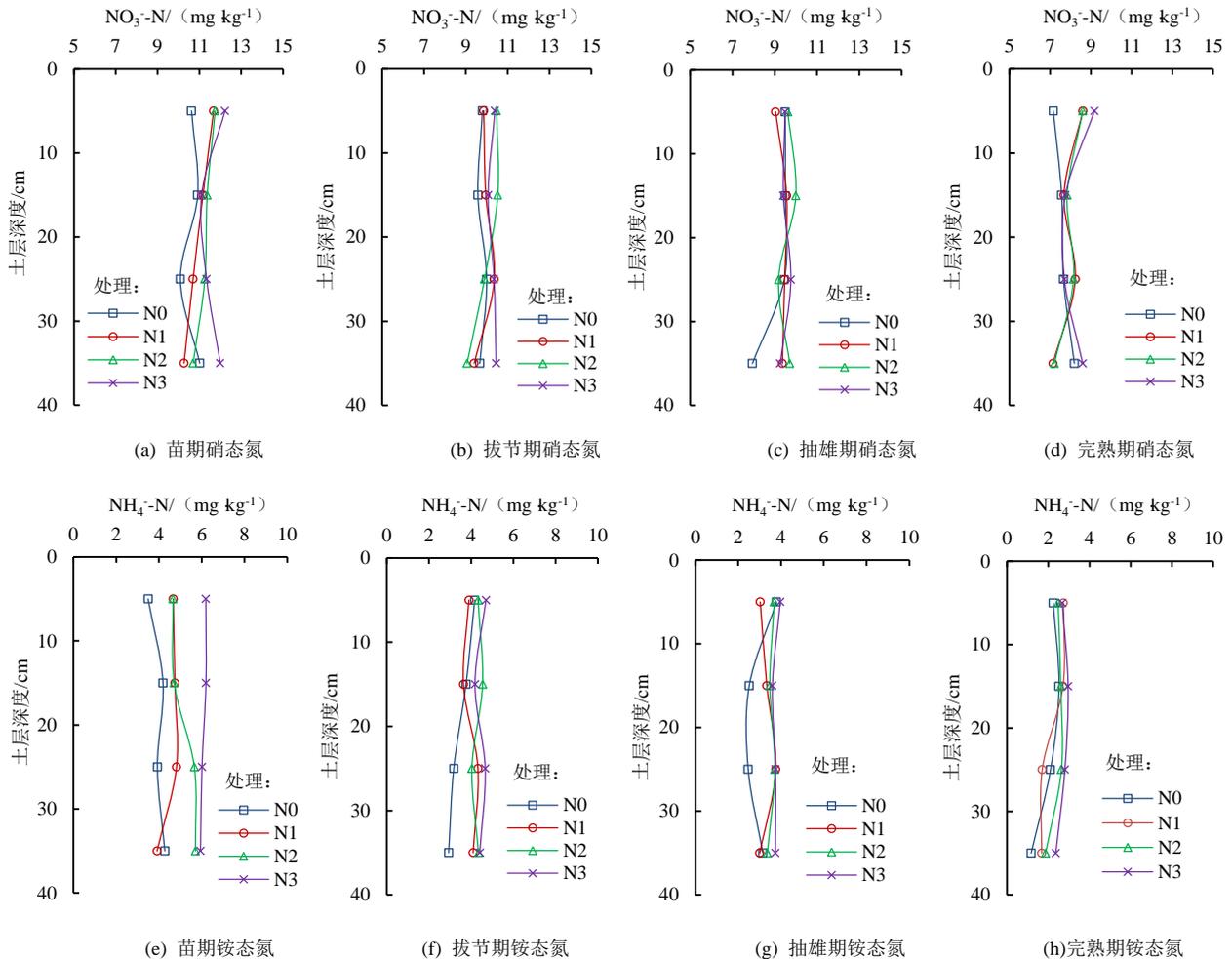


图 3 土壤硝态氮和铵态氮时空变化

Fig.3 Spatiotemporal changes of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen

### 2.3 作物生长与产量

玉米的生长指标与产量均随施氮量的增加而显

著增大(表 2)。N1、N2 处理和 N3 处理比 N0 处理的株高分别提高 11.8%、16.8%和 20.0%, 叶面积指数

分别提高了 15.6%、25.2%和 30.8%，茎粗分别提高 23.2%、27.6%和 28.1%。N2 处理和 N3 处理的株高和叶面积指数无明显差异，且显著高于 N1 处理 ( $p < 0.05$ )。施氮处理的生物产量介于 17 251~19 158 kg/hm<sup>2</sup> 之间，籽粒产量在 6 654~7 928 kg/hm<sup>2</sup> 之间。与 N3 处理相比，N2 处理的生物产量减少 3.0%，籽粒产量减少 3.7%，且二者的 2 项指标间差异均不显著 ( $p > 0.05$ )。N1 处理的产量及构成因素显著 ( $p < 0.05$ ) 低于 N2 处理和 N3 处理，但其生物产量和籽粒产量与 N3 处理相比的降低值不超过 20%。

表 2 完熟期玉米生长指标与产量

Table 2 Growth index and yield of maize in complete mature period

处理	株高/cm	叶面积指数/ (cm <sup>2</sup> cm <sup>-2</sup> )	茎粗/mm	生物产量/ (kg hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量/ (kg hm <sup>-2</sup> )
N0	181.2c	3.21c	20.3c	13 091c	4 814c
N1	202.5b	3.71b	25.0a	17 251b	6 654b
N2	211.7a	4.02a	25.9a	18 587a	7 635a
N3	217.4a	4.20a	26.0a	19 158a	7 928a

注 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2.4 作物耗水与水氮利用效率

各处理的耗水量介于 262.3~346.2 mm 之间，水分利用效率在 18.4~22.9 kg/(hm<sup>2</sup> mm) 之间(表 3)。提高氮肥用量会使玉米全生育期的耗水量和水分利用效率增大。与不施氮处理相比，N1、N2 处理和 N3 处理耗水量分别增加 23.8%、31.0%和 32.0%，水分利用效率分别增加 11.4%、20.7%和 24.5%，N2 处理和 N3 处理的两项指标均显著 ( $p < 0.05$ ) 高于 N1 处理，但 3 个施氮处理之间的差异都小于 10%，且 N2 处理仅比 N3 处理分别低 0.7%和 3.1%。N2 处理和 N3 处理的氮肥偏生产力比 N1 处理分别降低 6.1%和 17.6%，且 3 个施氮处理间的差异显著 ( $p < 0.05$ )。N2 处理的氮肥农学利用效率显著 ( $p < 0.05$ ) 高于 N1 处理，略高于 N3 处理。

表 3 玉米的耗水量和水氮利用效率

Table 3 Water consumption and water and nitrogen use efficiency of maize

处理	ET/mm	WUE/ (kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	NPFP/ (kg kg <sup>-1</sup> )	NAE/ (kg kg <sup>-1</sup> )
N0	262.3c	18.4c	-	-
N1	324.7b	20.5b	29.6a	8.2b
N2	343.7a	22.2a	27.8b	10.3a
N3	346.2a	22.9a	24.4c	9.6a

注 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2.5 作物耗水和硝态氮累积量与玉米产量的关系

为确定玉米全生育期总耗水量和完熟期 0~40 cm 土层硝态氮累积量对玉米籽粒产量的贡献，分别拟合了二者与产量的关系(图 4 和图 5)。由图 4、图 5 可知，耗水量和硝态氮累积量与籽粒产量均呈线性正相

关，相关系数分别为 0.988 1 和 0.886 2，可知玉米耗水量和土壤硝态氮量是影响玉米产量的重要因素。

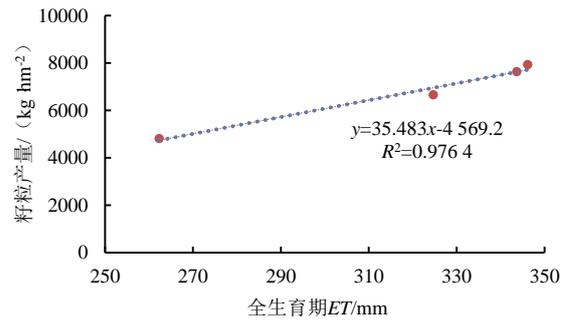


图 4 玉米全生育期耗水量与产量的关系

Fig.4 Relationship between water consumption and yield in the whole growth period of maize

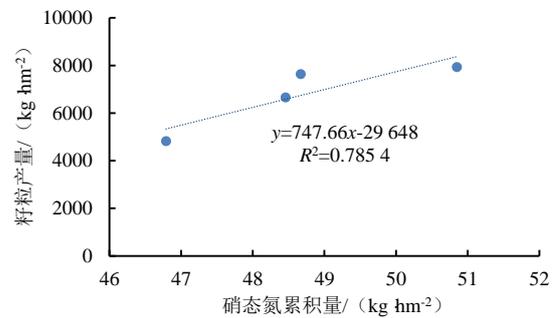


图 5 0~40 cm 土层硝态氮累积量与玉米产量的关系

Fig.5 Relationship between nitrate nitrogen accumulation and maize yield in 0~40 cm soil layer

## 3 讨论

马金慧<sup>[19]</sup>总结前人的研究结果及历史经验值得出，玉米生育期内土壤含水率阈值分别为种植期 11%~18%，苗期—拔节期 18%~24%、拔节—抽雄期 24%~30%、抽雄—灌浆期 22%~25%。Maas 等<sup>[20]</sup>对多个玉米品种从萌发到成熟不同生长阶段的相对耐盐性进行了研究，结果发现玉米在电导率高达 10 dS/m 的土壤中发芽良好；在苗期—抽雄期对盐分较敏感，阈值为 1.0 dS/m；在抽雄—灌浆期的土壤盐度不超过 9.0 dS/m，不会显著降低其产量。本研究中玉米各生育时期的土壤含水率基本在阈值之内，但土壤含盐量在苗期—抽雄期高于耐盐阈值，而抽雄—完熟期在阈值之内。在玉米整个生育周期内，各处理的平均土壤电导率低于玉米产量不受损失的耐盐阈值 3.7 dS/m<sup>[21]</sup>。

氮肥的施用会影响土壤中的水盐分布和氮素迁移。杨蕊菊等<sup>[22]</sup>发现增加施氮量会降低 0~120 cm 土层的含水率。Che 等<sup>[23]</sup>觉得施氮过多会加速土壤盐渍化，但 Machado 等<sup>[24]</sup>认为适当增加施氮量可以缓解土壤盐分胁迫效应。刘志恒等<sup>[25]</sup>研究发现施氮量越

大则土壤氮素量越高。本研究得出,土壤含水率随施氮量增加而降低,电导率及硝态氮和铵态氮量随施氮量增加而增加。土壤电导率在苗期和拔节期随土层深度的增加而降低,这是因为玉米前期生长速度快、蒸腾作用强,深层土壤的盐随水分向上运移而被带入土壤表层<sup>[26]</sup>;在抽雄期和完熟期随土层深度增加而增大,这是由于玉米后期蒸腾作用弱,盐分随水分的入渗被带入深层土壤中。同时,土壤电导率还表现为在大喇叭口期之前升高,而后降低,且完熟期深层土壤显著( $p < 0.05$ )高于表层。土壤硝态氮和铵态氮量随玉米生育期推进而降低,沿土层深度方向无明显变化。若灌水水平发生变化,土壤水分分布和玉米耗水量会随之发生改变,另外土壤硝态氮量和电导率值及沿土层深度方向的分布状况都有可能发生变化,但土壤水氮盐分布及玉米生长随施氮量改变而呈现出的规律基本不变。

本研究发现玉米株高、茎粗及叶面积指数随施氮量增加而增加,这与 Li 等<sup>[27]</sup>和翟登攀等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。合理增施氮肥可有效提高玉米产量,但过量施氮产量增加不显著,相似观点在原小燕等<sup>[29]</sup>和宋金鑫等<sup>[30]</sup>的试验研究中也有明显体现。这是因为土壤环境是影响玉米生长和产量的直接因素,施氮量不同导致土壤的指标存在差异,进而影响玉米的生长和产量。本研究结果表明,225~275 kg/hm<sup>2</sup>的施氮处理比不施氮的玉米生物产量高 31.8%~42.0%,籽粒产量高 38.2%~58.6%,但施氮量从 275 kg/hm<sup>2</sup>增加到 325 kg/hm<sup>2</sup>时产量并没有显著变化。

李文惠等<sup>[31]</sup>的研究表明提高氮肥用量会增强玉米的耗水强度。本研究同样得出施氮可以促进玉米对土壤水分的吸收利用,这可能是增施氮肥增加了玉米株高和叶面积,间接增加了根系吸水,进而土壤含水率随施氮量增加而降低。水分利用效率反映了作物耗水与产量间的关系<sup>[32]</sup>,史中欣等<sup>[33]</sup>认为适当增施氮肥可提高作物产量和水分利用效率。本研究得到与之相似的结论,各施氮处理的总耗水量和水分利用效率均显著( $p < 0.05$ )高于 N0 处理, N2 处理和 N3 处理之间无显著差异,但二者显著( $p < 0.05$ )高于 N1 处理。刘梦等<sup>[34]</sup>通过试验发现,与 180 kg/hm<sup>2</sup>的施氮处理相比,提高施氮量使氮肥偏生产力降低 31.2%~72.3%,氮肥农学利用效率提高 12.5%~52.6%。本试验得出,氮肥偏生产力随施氮量增加显著降低,这与前人得出的结论一致。氮肥农学利用效率表现为 N2 处理高于 N1 处理和 N3 处理,其中 N2 处理比 N3 处理高 7.3%,这与一些学者的结论不一致,可能是由于土壤中的盐分对实验结果产生了影响。

## 4 结论

1) 施氮显著影响土壤水氮盐分布,土壤含水率随施氮量增加而降低,盐分及硝态氮和铵态氮量随施氮量增加而增大。施用适量氮肥能够显著提高玉米株高、叶面积指数和产量,对茎粗的影响较小。玉米耗水量和水分利用效率随施氮量的增加而提高。

2) 因此,在初始电导率为 0.636 dS/m 的盐渍土条件下,施氮量为 275 kg/hm<sup>2</sup>时,既能有效提高玉米的生产水平,也不会对土壤环境产生严重影响,还可以提高水氮利用效率,达到较好的综合效果。

3) 本研究中玉米的桶栽深度为 40 cm,而田间玉米根系实际生长深度较大,桶栽可能会限制玉米根系生长及其对水肥的吸收利用。所以,对于该盐渍土条件下玉米的最佳施氮量还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] FANG H, LI Y N, GU X B, et al. Evapotranspiration partitioning, water use efficiency, and maize yield under different film mulching and nitrogen application in northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 264: 108-103.
- [2] 王富贵, 于晓芳, 高聚林, 等. 不同类型玉米品种冠层结构及其光合特性对深松增密的响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(2): 33-44.  
WANG Fugui, YU Xiaofang, GAO Julin, et al. Response of canopy structure and photosynthetic characteristics of different maize varieties to subsoiling tillage and increasing density[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(2): 33-44.
- [3] 高英波, 张慧, 刘开昌, 等. 优化氮素与品种匹配可协同提高盐碱地夏玉米产量和氮肥利用率[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4 388-4 398.  
GAO Yingbo, ZHANG Hui, LIU Kaichang, et al. The coordination of nitrogen optimization with matched variety could enhance maize grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize in saline land[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4 388-4 398.
- [4] 张萌, 魏全全, 肖厚军, 等. 生物炭对贵州黄壤朝天椒减氮的生物效应及氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1 201-1 209.  
ZHANG Meng, WEI Quanquan, XIAO Houjun, et al. Biological effects of biochar on nitrogen fertilizer reduction and nitrogen fertilizer utilization efficiency of pod pepper in yellow soil of Guizhou[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1 201-1 209.
- [5] 倪玉琼, 张强, 曹方琴, 等. 不同施氮量对高粱产量及植株养分积累的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 95-99, 105.  
NI Yuqiong, ZHANG Qiang, CAO Fangqin, et al. Effect of different nitrogen concentrations on sorghum bicolor yield and nutrient accumulation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 95-99, 105.
- [6] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 291-296.  
LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of nitrogen and irrigation interaction on water consumption characteristics and use efficiency in winter wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 291-296.
- [7] 杨恒山, 张明伟, 张瑞富, 等. 滴灌灌溉量、施氮量和种植密度对春玉米产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(5): 16-22.  
YANG Hengshan, ZHANG Mingwei, ZHANG Ruifu, et al. The combined impact of planting density and amount of water and nitrogen

- application on yield of spring maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(5): 16-22.
- [8] 董丽利, 李援农, 周昌明, 等. 免耕垄播覆膜时长与施氮量对夏玉米生长及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2015(7): 1-4.  
DONG Lili, LI Yuannong, ZHOU Changming, et al. Effects of plastic film mulching periods and nitrogen rates on growth and yield of no-tillage summer maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(7): 1-4.
- [9] 任艳云, 张连秋, 孔晓民, 等. 不同耕作方式和施氮方式对夏玉米生长发育和产量的影响[J]. *农业科技通讯*, 2016(7): 67-70.  
REN Yanyun, ZHANG Lianqiu, KONG Xiaomin, et al. Effects of different tillage methods and nitrogen application methods on growth and yield of summer maize[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2016(7): 67-70.
- [10] 李婷. 覆膜、施氮和密度对旱地玉米产量和水氮利用效率的互作效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.  
LI Ting. Interaction effects of film mulching, nitrogen rate and plant density on grain yield, water and nitrogen use efficiency of spring maize under dryland system[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [11] 李英豪, 张政, 朱吉祥, 等. 管渠自动控水灌溉施氮量对夏玉米产量、氮素吸收利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(5): 35-41.  
LI Yinghao, ZHANG Zheng, ZHU Jixiang, et al. Effects of nitrogen application on yield, nitrogen uptake and utilization by summer maize under automatically controlled pipe-channel irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(5): 35-41.
- [12] 李昌贵. 施氮对小麦、番茄产量与品质及旱地土壤氮素淋失的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.  
LI Changgui. Effects of nitrogen application on yield and quality of wheat and tomato and nitrogen leaching from upland soil[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.
- [13] 赵靛, 侯振安, 黄婷, 等. 新疆石河子地区玉米产量及氮素平衡的施氮量阈值研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 860-869.  
ZHAO Jing, HOU Zhen'an, HUANG Ting, et al. Study on the nitrogen rate threshold of maize yield and nitrogen balance in Shihezi, Xinjiang[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 860-869.
- [14] 马登科, 殷俐娜, 刘溢健, 等. 施氮量对黄土高原旱地冬小麦产量和水分利用效率影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(3): 486-499.  
MA Dengke, YIN Lina, LIU Yijian, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen application rates on yield and water use efficiency of winter wheat in dryland of loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(3): 486-499.
- [15] 谢呈辉, 马海翌, 许宏伟, 等. 施氮量对宁夏引黄灌区麦后复种糜子生长、产量及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2022, 48(2): 463-477.  
XIE Chenghui, MA Haizhao, XU Hongwei, et al. Effects of nitrogen rate on growth, grain yield, and nitrogen utilization of multiple cropping proso millet after spring-wheat in Irrigation Area of Ningxia[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 463-477.
- [16] 赵笃勤, 刘淑慧, 赵凯超. 玉米-大豆间作和减量施氮对玉米生长、产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(8): 1 159-1 166.  
ZHAO Duqin, LIU Shuhui, ZHAO Kaichao. Effect of maize-soybean intercropping and reduced nitrogen application on maize growth, yield and soil nitrate content[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(8): 1 159-1 166.
- [17] 勉有明, 苗芳芳, 吴鹏年, 等. 施氮量对扬黄灌区土壤水分、温度、碳氮及玉米产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(9): 950-958.  
MIAN Youming, MIAO Fangfang, WU Pengnian, et al. Effects of nitrogen application rates on soil water, temperature, carbon nitrogen, and maize yield in Yanghuang irrigation area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(9): 950-958.
- [18] ZHANG G X, DAI R C, MA W Z, et al. Optimizing the ridge-furrow ratio and nitrogen application rate can increase the grain yield and water use efficiency of rain-fed spring maize in the Loess Plateau region of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107 430.
- [19] 马金慧. 基于农田水土环境限制因子的河套灌区引黄水量阈值模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.  
MA Jinhui. Simulation of the Yellow River water threshold based on limiting factor of farmland soil and water environment in Inner Mongolia Hetao irrigation district[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [20] MAAS E V, HOFFMAN G J, CHABA G D, et al. Salt sensitivity of corn at various growth stages[J]. *Irrigation Science*, 1983, 4(1): 45-57.
- [21] HOFFMAN G J, MAAS E V, PRICHARD T L, et al. Salt tolerance of corn in the Sacramento-San Joaquin Delta of California[J]. *Irrigation Science*, 1983, 4(1): 31-44.
- [22] 杨蕊菊, 柴守玺, 马志明. 施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7 905-7 912.  
YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming. Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7 905-7 912.
- [23] CHE Z, WANG J, LI J S. 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.
- [24] MACHADO R, SERRALHEIRO R. Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. management practices to prevent and mitigate soil salinization[J]. *Horticulturae*, 2017, 3(2): 30.
- [25] 刘志恒, 徐开未, 王科, 等. 不同施氮量对玉米产量及各器官养分积累的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(5): 573-579.  
LIU Zhiheng, XU Kaiwei, WANG Ke, et al. Effect of different nitrogen applications on maize yield and nutrient accumulation in different organs[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2018, 44(5): 573-579.
- [26] 白宇龙. 覆膜沟灌下水氮调控对土壤水氮盐分布和向日葵生长特性的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
BAI Yulong. Effects of water and nitrogen regulation on soil water, nitrogen and salt distribution and growth characteristics of sunflower under plastic film mulching and furrow irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [27] LI C Z, LI C J. Ridge-furrow with plastic film mulching system decreases the lodging risk for summer maize plants under different nitrogen fertilization rates and varieties in dry semi-humid areas[J]. *Field Crops Research*, 2021, 263: 108 056.
- [28] 翟登攀, 蒋静, 白宇龙, 等. 全膜双垄沟播条件下施氮量对玉米耗水特性及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(1): 24-30.  
ZHAI Dengpan, JIANG Jing, BAI Yulong, et al. Nitrogen applications affect water consumption and yield of maize grown in double-furrowed raised bed with full film mulch[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(1): 24-30.
- [29] 原小燕, 符明联, 张云云, 等. 施氮量对生育中期玉米花生单作及间作植株生长发育的影响[J]. *花生学报*, 2018, 47(4): 19-25.  
YUAN Xiaoyan, FU Minglian, ZHANG Yunyun, et al. Effects of nitrogen application on plant development of single cropping and intercropping maize and peanut at middle growth stage[J]. *Journal of Peanut Science*, 2018, 47(4): 19-25.
- [30] 宋金鑫, 谷岩, 于寒, 等. 覆膜和氮肥施用量对滴灌玉米生长发育及产量的影响[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(21): 7 251-7 255.  
SONG Jinxin, GU Yan, YU Han, et al. Effects of film mulching and nitrogen application rate on growth and yield of drip irrigation corn[J].

- Molecular Plant Breeding, 2019, 17(21): 7 251-7 255.
- [31] 李文惠, 尹光华, 谷健, 等. 膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3 397-3 401.  
LI Wenhui, YIN Guanghua, GU Jian, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield and water use efficiency of spring maize with drip irrigation under film mulching[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3 397-3 401.
- [32] 李文婷, 王仕稳, 邓西平, 等. 不同水氮水平对马铃薯产量和水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 191-196.  
LI Wenting, WANG Shiwen, DENG Xiping, et al. Effects of different water and nitrogen levels on tuber yield, water and nitrogen use efficiency of potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(6): 191-196.
- [33] 史中欣, 柴强, 杨彩虹, 等. 带型配置及施氮量对玉米间作豌豆产量和水分利用效率的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 39-43.  
SHI Zhongxin, CHAI Qiang, YANG Caihong, et al. Effects of different nitrogen applications and intercropping stripe compound on yield and WUE under maize/pea intercropping[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(1): 39-43.
- [34] 刘梦, 梁茜, 葛均筑, 等. 不同密度下施氮量对夏玉米产量和氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 153-159.  
LIU Meng, LIANG Qian, GE Junzhu, et al. Effects of nitrogen and density on summer maize yield and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(6): 153-159.

## Nitrogen Fertilization Modulates Spatial Distribution of Water, Nitrogen and Salt in Soil, and Growth and Yield of Maize

CAO Heping<sup>1</sup>, JIANG Jing<sup>1\*</sup>, ZHAI Dengpan<sup>2</sup>, ZHANG Chaobo<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Zhongshui North Survey, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** **【Objective】** Nitrogen is not only a plant nutrient but also functions as a signal affecting crop growth and yield in complex ways. This paper presents the results of an experimental study on the effect of nitrogen fertilization on water and solute dynamics in soil, as well as the consequence for growth and yield of maize in semi-arid regions in northern China. **【Method】** The experiment was conducted from May to September in 2019 in a rain shelter at the Experimental Station of Taiyuan University of Technology. We compared four nitrogen fertilizations: without nitrogen application (N0), applying nitrogen fertilizer at 225 kg/hm<sup>2</sup> (N1), 275 kg/hm<sup>2</sup> (N2) and 325 kg/hm<sup>2</sup> (N3), respectively. In each treatment, we measured, at different growing stages, the distributions of water, salt and nitrogen in the soil profile, as well as the final grain yield. **【Result】** Nitrogen application affected distribution of water, nitrogen and salt in the soil, with volumetric water content in the 0~40 cm of soil decreasing significantly ( $p < 0.05$ ) with the increase in nitrogen application. Soil electrical conductivity also increased with nitrogen application, regardless of the growing stages. As the crop grew, soil electrical conductivity increased by 0.968~1.542 dS/m until the tasseling stage, compared with that at seedling stage, and it then fell by 4.740~5.471 dS/m at mature stage compared to that at the tasseling stage. Soil nitrate and ammonium decreased as the crop grew. Nitrogen application promoted crop growth and improved its water consumption and water use efficiency, with crop yield and water use indexes increasing with nitrogen application. There was no significant difference in grain yield between N2 and N3 ( $p > 0.05$ ), despite the former saving 50 kg/hm<sup>2</sup> of fertilizer and increasing partial productivity of the nitrogen fertilizer to 3.4 kg/kg higher ( $p < 0.05$ ). **【Conclusion】** Considering the effects of nitrogen application and crop growth and yield, the most suitable nitrogen fertilization for maize production in the salinized soils in the studied region is 275 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** maize; yield; water use efficiency; soil electrical conductivity; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen

责任编辑: 赵宇龙