

河套灌区盐渍化土壤玉米水氮耦合效应

闫建文^{1,2}, 史海滨^{1,2}, 李仙岳^{1,2}, 田德龙³, 李 祯^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;)

摘要:为了探求适用于盐渍化地区的节水、施肥优化模式,采用大田试验,以玉米为研究对象,选取了轻度和中度两种盐分土壤,设置了10种不同水、氮处理,建立不同盐分土壤玉米产量与灌水量及施氮量之间的回归模型并对其进行了分析,研究不同盐分土壤水、氮用量对玉米产量的影响。结果表明:在轻度和中度盐分土壤条件下,灌水和施氮对玉米均有增产效应,水、氮交互作用为正效应,水分的作用大于施氮的作用。通过边际效应分析可知,轻度和中度盐分土壤施氮肥的增产速率没有明显差异,轻度盐分土壤灌水的增产效率明显高于中度盐分土壤。轻度和中度盐分土壤玉米最高产量分别为13 581 kg·hm⁻²和11 115 kg·hm⁻²,对应的水、氮配比均为灌水编码为0.77(全生育期灌水量2 250 m³·hm⁻²),施氮编码为0.69(总施氮量225 kg·hm⁻²)。通过模型寻优,得到轻度和中度盐分土壤种植玉米的最佳水、氮配比方案均为全生育期灌水量为1 900.95~2 389.08 m³·hm⁻²,总施氮量为174.04~240.7 kg·hm⁻²。优化方案的水、氮用量分别比当地灌水量(2 925 m³·hm⁻²)节水18.2%~35%,施氮量(325 kg·hm⁻²)节肥26.0%~46.4%。优化范围包含了轻度和中度盐分的最高产量水、氮用量,产量与当地产量基本一致,符合当地灌水施肥要求。但从维持目前玉米产量和长期盐碱地改良的角度看,建议中度盐化土壤应选取水、氮优化范围中中等偏上灌水量和中等偏下的施肥量,以便于从根本上降低土壤盐分背景值,便于长期产量的提高;轻度盐分土壤选取优化范围适中的水、氮用量。

关键词:盐渍化土壤;玉米;灌水量;施氮量;水氮耦合;产量

中图分类号:S287;S274;S143.1 **文献标志码:**A

Effect of water and nitrogen coupling on maize in salinity soil of the Hetao irrigation area

YAN Jianwen^{1,2}, SHI Haibin^{1,2}, LI Xianyue^{1,2}, TIAN Delong³, LI Zhen^{1,2}

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

2. Engineering Research Center of High-Efficiency Water-Saving Technology Equipment and Water and Soil Environment Effects in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

3. Hydroelectric and Water Conservancy Science Institute, China's Scientific Research Institute in the Pastoral Areas of Water Conservancy, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: In order to explore an optimized mode of saving water and fertilizer, suitable for salinized areas, this paper selected maize as the research object a field experiments. The experiment had 10 treatments including different water and fertilizer combination in light and moderate saline soils. Regression model between maize yield and irrigation amount and nitrogen (N) amount was developed in different saline soils. The results showed that water and N had increased yield in slight and moderate saline soils. The interactions of water and N had positive effects. Also, the effect of water was more important than that of nitrogen. Through the analysis of marginal effect, the rate difference of increasing yield of N was not significant in slight and moderate saline soil. Water increased yield more efficiently in slight saline soil than that in moderate saline soil. The maximum yields in slight and moderate saline soils were 13 581 kg·hm⁻² and 11 115 kg·hm⁻², respectively. The irrigation number was 0.77 (the ir-

收稿日期:2020-03-11

修回日期:2020-03-22

基金项目:国家自然科学基金“盐渍化农田水氮调控后冻融土壤氮素迁移转化及肥力响应”(51509132);内蒙古农业大学“双一流”学科创新人才培育项目(NDESC2018-2)

作者简介:闫建文(1985-),男,山西忻州人,助理研究员,博士,主要从事节水灌溉新技术方面的研究。E-mail: baotouyan13579@163.com

通信作者:史海滨(1961-),男,山西太谷人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用方面的研究。E-mail: shi_haibin@sohu.com

irrigation amount in whole period of growth was $2\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$). The N number was 0.69 (the total N amount was $225\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). It showed that salt stress decreased the maize yield with the same irrigation and N amount. Through the model optimization, the best model of water and N in slight and moderate saline soils was the same. The irrigation amount in whole period of growth was $1\ 900.95 \sim 2\ 389.08\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. The total N amount was $174.04 \sim 240.7\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with the local irrigation amount ($2\ 925\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) and N amount ($325\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), the optimized model saved $18.2\% \sim 35\%$ water. It also saved $26.0\% \sim 46.4\%$ of N. The optimized scope contained the irrigation and N amount of the highest yield in slight and moderate saline soils. The yield was consistent with the local yield. However, from the view of maintaining maize yield and improving saline-alkali soil for a long-term, the above-moderate irrigation amount and below-moderate fertilizer amount were recommended as the optimized scope for the moderate saline soil. The measures were taken to decrease the background value of soil salinity radically and increase the yield in a long-term. It was advised to select moderate amount of irrigation and N in slight saline soil.

Keywords: soil salinization; maize; irrigation amount; fertilizing amount; water and nitrogen coupling; production

内蒙古灌区是全国三大灌区之一,但大部分耕地为盐渍化土壤,其中轻度盐渍化土壤面积为 $2.84 \times 10^5\ \text{hm}^2$,占耕地面积的 49.5%,中度盐渍化土壤面积为 $9.2 \times 10^4\ \text{hm}^2$,占耕地面积的 16.04%,重度盐分土壤面积为 $1.79 \times 10^4\ \text{hm}^2$,占耕地面积的 3.19%。盐胁迫已经成为限制该地区土地生产力的主要因子之一^[1]。根据黄河水利委员会对水量的统一调度要求,2010 年河套灌区的引水量从原来每年 52 亿 m^3 减少到 40 亿 m^3 ,引水量减少了 20%,水资源短缺已经严重影响灌区的可持续发展^[2]。河套灌区由于长期形成大水漫灌的习惯,导致地下水位上升使表层盐分无法下渗,加上大量使用化学氮肥,造成盐分大量积累,导致农田水氮利用率低下。河套灌区玉米播种面积 $34 \times 10^4\ \text{hm}^2$,占内蒙古灌区玉米播种面积的 14.5%,总产量 $29.6 \times 10^8\ \text{kg}$,占内蒙古灌区玉米总产量的 21%^[3]。由于不合理的水氮制度,直接影响玉米产量,造成盐渍化土壤面积增加,并且普遍存在玉米生产成本过高、效益过低的现象。因此针对河套灌区水资源紧张、氮肥用量大、盐渍化面积广的现状,必须建立按需灌溉、按需施肥,适合盐渍化地区的精确水氮管理制度。建立盐渍化土壤水氮适量耦合模型,找到盐渍化地区合理的水氮配比和优化组合,相关研究对提高水氮利用效率、节约水肥资源、减轻环境污染、防止次生盐渍化、提高盐渍化地区玉米产量和降低水氮过量对环境的影响都有着重要意义。

目前,关于水氮对产量的影响和水氮产量模型的研究已有较多的报道。王小彬等^[4]研究表明,水和氮与作物产量在一定范围表现为水氮的协同效应;薛亮等^[5]研究表明,水、氮对产量有明显的促进作用,而且氮素作用大于灌水作用,两因素交互作用对玉米产量的影响为正效应;路亚等^[6]和刘秀

珍^[7]等研究表明,水分对产量的影响大于氮素。李仙岳等^[8]研究表明沙区滴灌条件下灌水量与施氮量存在明显的交互效应;以上研究都开展在非盐分土壤上。而 Lamsal 等^[9]研究表明,水分亏缺程度与盐分水平直接相关,土壤含盐量越大,水分亏缺程度越高;徐万里等^[10]研究表明,盐分抑制土壤中的氮素硝化,加剧土壤 NH_3 的挥发;表明盐分能够影响土壤水分和氮素的活动。相关学者在轻度盐渍化土壤上开展了水氮交互影响研究,研究表明,在盐渍化土壤上合理的水氮交互用量能够显著的提高作物的产量,当水氮过量时产量略有下降^[11]。其他研究也表明^[12-13],不同土壤盐分情况下,作物吸收土壤水分和养分的能力存在差异。因此开展不同盐分土壤情况下的水氮合理优化利用研究,对提高盐渍化农田水氮利用效率有着重要意义。霍星等^[2]在盐渍化地区研究了水氮对向日葵生长的影响并建立了产量模型,但向日葵比玉米耐盐,而且在生育期内水肥管理制度差异较大。徐昭等^[14]开展了不同盐渍化程度土壤水氮调控对玉米产量的影响,但目前开展盐分农田水氮交互效应研究较少,且由于盐分分级不同以及水氮处理差异,优化结果也存在着差异,需要进一步验证。因此,本文选取了玉米可以正常生长的轻度和中度两种盐分土壤,建立不同盐分胁迫下的水氮产量模型,并通过模型寻优,以探求适用于盐渍化地区的节水施肥优化模式,为盐渍化地区及相近地区玉米生产提供节水减肥依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

试验区地处内蒙古河套灌区西部 ($40^\circ 24' 32''$)

N, 107°02'19"E) 巴彦淖尔市磴口县农业综合节水示范区, 气候为干旱半干旱气候, 降水量少, 光照充足, 热量丰富, 昼夜温差大, 无霜期短。年均降水量 144.5 mm, 相对湿度 47%, 蒸发量 2 381 mm, 日照时数 3 209.5 h, 光合有效辐射为 3 152.02 MJ · m⁻²。年均无霜期 142 d。试验年份玉米生育期 4—9 月之间共计降雨 130.02 mm, 6 月降雨量最大, 为 45.63 mm, 4 月降雨量最小, 为 0 mm, 平均月降雨量为 21.67 mm。试验区内玉米生育期地下水埋深在 0.73 ~ 2.28 m, 生育期内平均地下水埋深为 1.43 m, 试验选取的不同盐渍化土壤试验田相距 150 m, 在同一区域, 地下水变化情况相同。轻度和中度盐分土壤根据《盐渍化土壤的冲洗改良与排水-作物的耐盐标准与盐化土的分级》^[15] 的标准划分。土壤理化性状见表 1, 土壤养分状况见表 2。

1.2 试验设计

供试验的玉米品种为辽单 565 号。选取轻度和中度 2 个土壤含盐水平, 含盐量如表 1 所示。在两种盐分土壤上设置相同的水肥处理, 设计灌水量和施氮量 2 个试验因素、3 个水平。当地传统水肥用量为灌水量 2 925 m³ · hm⁻²、施氮量 325 kg · hm⁻²。研究设置了 3 个供氮水平: 高氮(当地水平 325 kg · hm⁻²)、中氮(225 kg · hm⁻²)、低氮(125 kg · hm⁻²)。3 个灌水水平: 高水(当地水平 2 925 m³ · hm⁻²)、中水(2 250 m³ · hm⁻²)、低水(1 575 m³ · hm⁻²)。另设 1 个不灌水不施肥的处理作为对照。试验共 10 个处理。3 次重复, 共 30 个小区。小区面积 36 m² (9 m × 4 m), 小区 1 m 深土体四周以埋设 2 层塑料薄膜相隔, 防止水分侧渗和肥料的影响。种植密度为株距 0.3 m、行距 0.6 m。磷肥作为底肥一次性施

表 1 土壤理化性状

Table 1 Soil physicochemical properties

土壤盐渍化类型 Types of soil salinization	土层深度/cm Soil depth	容重/(g · cm ⁻³) Bulk density	土壤颗粒分布/% Soil particle size distribution			土壤类型 Soil type	pH	0~100 cm 平均含盐量/% 0~100 cm average salt content
			0.05~ 2 mm	0.002~ 0.05 mm	<0.002 mm			
轻度盐分土壤 Slight-saline soil	0~20	1.463	16.961	73.475	9.563	粉砂壤土 Silt loam soil	8.2	0.16
	20~40	1.420	9.742	79.435	10.823	粉砂壤土 Silt loam soil		
	40~60	1.333	4.081	84.968	10.95	粉土 Silt soil		
	60~80	1.380	35.895	60.828	3.27	粉砂质粘壤土 Silty clay loam soil		
	80~100	1.420	1.083	84.045	10.872	粉砂壤土 Silt loam soil		
中度盐分土壤 Moderate-saline soil	0~20	1.454	55.91	39.14	4.95	砂壤土 Sandy loam soil	8.8	0.39
	20~40	1.413	42.98	51.01	6.01	粉壤土 Silt loam soil		
	40~60	1.454	37.32	52.97	9.71	粉壤土 Silt loam soil		
	60~80	1.411	17.46	67.8	14.74	粉壤土 Silt loam soil		
	80~100	1.456	26.43	61.31	12.26	粉壤土 Silt loam soil		

表 2 轻度和中度盐分土壤养分含量

Table 2 Nutrient contents of slight-saline and moderate-saline soil

土壤盐渍化类型 Types of soil salinization	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g · kg ⁻¹)	有机质 Organic /(g · kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg · kg ⁻¹)
轻度盐分土壤 Slight-saline soil	1.25	14.27	1.61	7.51	31.11	11.33	122.68
中度盐分土壤 Moderate-saline soil	1.09	14.31	1.43	6.47	29.67	12.36	117.52

入用量($450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与当地农民相同,氮肥为追肥分别在拔节期和大喇叭口期(施氮量各占 1/2)灌溉前撒施在行间。由于内蒙古河套灌区是自流灌区,每次灌水由灌区管理部门统一调配,由于黄委减少了灌区引水量,因此灌区内统一在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期进行 3 次灌水,本试验按照当地灌水时间,全生育期在玉米拔节期、大喇叭口期、灌浆期灌水 3 次,每次灌水量相同,具体灌水和施肥处理见表 3。

1.3 测定方法

土壤电导率和 pH 值分别使用电导率仪和 pH 计测定土水比 1:5 土壤水提液的电导率和 pH 值。测产时玉米产量按小区籽粒产量单打单收。

1.4 数据处理

采用 SPSS 软件对数据进行回归模拟和频步分析。

由于试验中灌水量和施氮量的量纲不统一,不能直接比较。本文通过离差标准化,对原始数据线性变换,使结果落到 $[0, 1]$ 区间,转换函数见式 1。经过标准化的灌水量和施肥量成为无量纲的代码。用无量纲的灌水量和施肥量的代码与因变量(产量)进行回归分析,可以根据回归系数的正负大小判断相应因素(灌水量或施肥量)对因变量(产量)的影响力。

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \quad (1)$$

其中, x^* 为无量纲代码, x 为样本值(试验设计中的实际施入量), \max 为样本数据的最大值, \min 为样本数据最小值。

2 结果与分析

2.1 不同盐分土壤水氮产量模型的建立

通过对轻度和中度盐分土壤的不同水氮处理玉米产量进行回归拟合,得到轻度和中度盐分土壤玉米产量与灌水量和施氮量的回归模型。

轻度盐分:

$$Y = 5832.029 + 7174.064X_1 + 6113.011X_2 - 4598.488X_1^2 - 5708.106X_2^2 + 4357.584X_1X_2 \quad (R = 0.9609) \quad (2)$$

中度盐分:

$$Y = 4417.455 + 6236.679X_1 + 5790.766X_2 - 3706.823X_1^2 - 5774.257X_2^2 + 3963.583X_1X_2 \quad (R = 0.9772) \quad (3)$$

式中, Y 为玉米产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); X_1 、 X_2 分别为试验设计的灌水量、施肥量的编码值。

对轻度和中度盐分土壤的回归模型(2)、(3)进行检验,轻度盐分土壤回归模型 $F_{\text{拟合}} = 9.654$,大于 0.05 水平下的 F 值(4.74),中度盐分土壤回归模型 $F_{\text{拟合}} = 16.965$,大于 0.01 水平下的 F 值(9.55),说明轻度和中度盐分土壤回归模型都达到了显著水平,能够反映产量与灌水量和施氮量之间的关系。轻度和中度盐分土壤模型中的一次项和 X_1X_2 的系数均为正值。说明适当的灌水和施氮在轻度和中度盐分土壤中均可对玉米有明显的增产作用,水氮的耦合作用对产量的影响为正效应。轻度和中度盐分回归模型中二次项系数均为负值,说明过量的灌水和施氮都会导致玉米的减产。轻度盐分灌水量和

表 3 玉米试验处理设计
Table 3 Maize experimental design

处理 Treatment	灌水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ Irrigation amount			灌溉定额 Irrigation requirement $/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	施氮量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ Amount of N fertilizer		施氮总量 Total N $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big trumpet period	灌浆期 Grain filling stage		拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big trumpet period	
T0	0	0	0	0	0	0	0
T1	525	525	525	1575	62.5	62.5	125
T2	525	525	525	1575	112.5	112.5	225
T3	525	525	525	1575	162.5	162.5	325
T4	750	750	750	2250	62.5	62.5	125
T5	750	750	750	2250	112.5	112.5	225
T6	750	750	750	2250	162.5	162.5	325
T7	975	975	975	2925	62.5	62.5	125
T8	975	975	975	2925	112.5	112.5	225
T9	975	975	975	2925	162.5	162.5	325

施氮量的一次项系数和 X_1X_2 的系数分别比中度盐分土壤高 15.03%、7.7% 和 9.9%。Ben-Asher 等^[16] 研究表明,中度盐分土壤中土壤水分的渗透势低于轻度盐分土壤水分的渗透势,根系吸水更加困难,导致更多的水分留在土壤中,致使中度盐分土壤水分利用效率低于轻度盐分土壤。盐分胁迫的增强还会抑制土壤中的氮素硝化,加剧土壤 NH_3 的挥发^[9],降低氮肥的利用效率。盐分胁迫的增强降低了水氮的利用效率,因此导致水氮在中度盐分土壤中的增产效应低于轻度盐分土壤。轻度和中度盐分土壤的常数项分别为 5 832.029 和 4 417.455,轻度比中度高 32.02%,表明无水氮投入时,随着盐分胁迫的加剧产量会明显下降,证明在盐渍化土壤地区,盐分是影响生产的重要因素之一。

2.2 单因素效应分析

为了研究不同盐分土壤中灌水量和施氮量单因子对产量的影响,采用降维法对模型(2)、(3)中任意一个因子取 0 水平编码值得另一因素对玉米产量的一元二次回归方程

轻度盐分:

$$\begin{cases} Y = 5832.029 + 7174.046X_1 - 4598.488X_1^2 \\ Y = 5832.029 + 6113.011X_2 - 5708.016X_2^2 \end{cases} \quad (4)$$

中度盐分:

$$\begin{cases} Y = 4417.455 + 6236.679X_1 - 3706.823X_1^2 \\ Y = 4417.455 + 5709.766X_2 - 5774.257X_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

图 1 为两种盐分水平下灌水量与施氮量对玉米产量的影响。不同盐分水平下玉米产量随水、氮两因素的增加呈先增后降变化,表明各因素都有明显的增产效应。各抛物线的顶点就是单因素对应的最高产量值。当水氮用量超过最高点时会导致产

量的下降和生产成本的增加,符合报酬递减的规律。两种盐分土壤中,灌水的增产效应显著高于施氮的增产效应,说明盐渍化土壤水分是影响玉米增产的主要因素。研究表明,河套灌区灌溉水经过土壤排水中的 Na^+ 所占比例明显增加,平均约为 87%,说明灌区主要以排出钠盐为主^[17]。李建兵等^[18] 研究表明,钠盐可促进土壤 NH_3 的挥发,且随盐分含量增加,土壤 NH_3 挥发越迅速,一定程度上抑制土壤的硝化作用。张余良等^[19] 研究表明,灌溉可以明显降低土壤的全盐量。盐渍化地区多为干旱半干旱地区,降雨少,蒸发量大,盐渍化土壤结构和透气性差,灌水少会因为蒸发的作用导致表层土壤积盐,而过多灌水会导致土壤透气性变差,土壤中含 O_2 量下降,以上因素均会抑制土壤的硝化作用,降低氮肥的利用效率。因此合理的灌水是盐渍化地区增产的主要措施。只有合理的灌水淋洗土壤中的盐分,降低土壤的含盐量,改善氮肥的水解和硝化条件,氮肥才能发挥相应的增产作用。由图 1 看出,轻度和中度盐分土壤,过量的施肥减产效果明显。说明盐渍化土壤中不适宜过多施氮肥,过多施氮肥会导致减产还会造成土壤次生盐渍化的发生。本试验中,轻度盐分土壤玉米最高产量为 $13\ 581\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,中度盐分土壤玉米最高产量为 $11\ 115\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,对应的灌水和施氮编码相同,灌水编码为 0.77(实际用量 $2\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),施氮编码为 0.69(实际用量 $225\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),轻度盐分的最高产量比中度盐分的高 22.2%。说明水氮条件相同条件下,随着盐分胁迫的加剧,产量明显下降。

对模型(4)、(5)求导得出轻度和中度盐分土壤玉米边际产量模型。

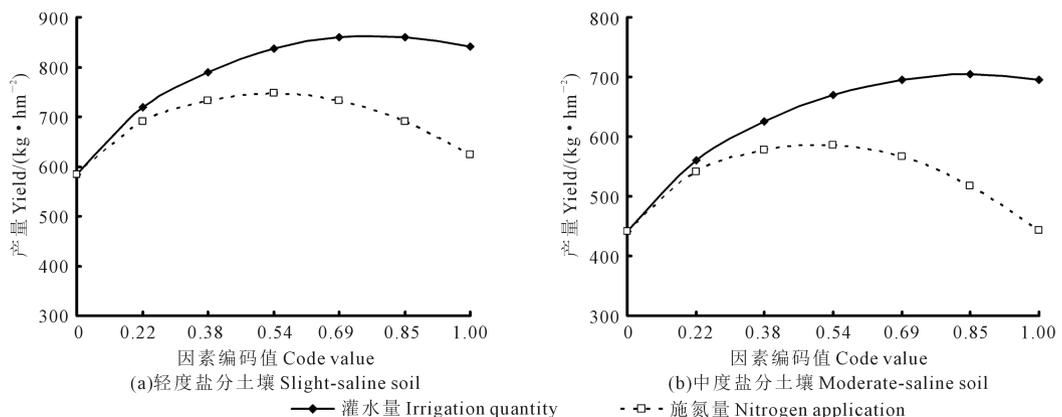


图 1 轻度和中度盐分土壤灌水量与施氮量对玉米产量的影响

Fig.1 Effects of water irrigation and N fertilizer on maize yield in slight-saline and moderate-saline soil

$$\text{轻度盐分: } \begin{cases} \frac{dY}{dX_1} = 7174.064 - 9196.976X_1 \\ \frac{dY}{dX_2} = 6113.011 - 11416.212X_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{中度盐分: } \begin{cases} \frac{dY}{dX_1} = 6236.679 - 7413.646X_1 \\ \frac{dY}{dX_2} = 5790.766 - 11548.514X_2 \end{cases} \quad (7)$$

边际产量可以反映各因子的最适投入量和单位投入量变化对产量增减速率的影响,它是对总产量变动速率的反映。若各因子效应均符合报酬递减规律,则当各因子的边际产量为零,即达到最高产量点时,此时各因子的施用量即为最高产量施用量。由图 2 可知,轻度和中度盐分土壤各单因子的边际效应均随着投入量的增加,边际效益递减,当超过边际产量为零的水氮投入量时,边际产量出现负值造成减产,符合报酬递减规律。令 $dY/dX_i = 0$, 由模型(6)、(7)分别求得轻度和中度盐分土壤玉米最高产量(Y)对应的水氮编码值,轻度盐分灌水编码值为 0.78(实际用量 $2\ 281.5\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、施氮编码值为 0.53(实际用量 $172.25\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。中度盐分灌水编码值为 0.84(实际用量 $2\ 457\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、施氮编码值为 0.50(实际用量 $162.5\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。达到最高产量时轻度盐分土壤灌水量比中度盐分土壤低 7.14%,轻度盐分土壤施氮量比中度盐分土壤高 6%。由图 2 还可以看出,轻度和中度盐分土壤施氮肥的增产速率没有明显差异,而轻度盐分土壤灌水的增产效率明显高于中度盐分土壤。由于中度盐分土壤含盐量高,土壤溶液水势不断降低,植物吸水能力降低^[20],导致水分利用效率降低、增产速率降低。盐分含量越高,土壤水分亏缺程度越严重,中度盐分土壤达到最高产量需要的灌水量要高于轻度盐分土壤。轻度和中度盐分土壤施氮肥的

增产速率没有明显差异,轻度盐分土壤灌水的增产效率明显高于中度盐分土壤。说明盐渍化土壤水分是影响产量的主要因素。只有水分适宜,改良了土壤的盐渍化环境后,氮肥才能更好地发挥作用,与前面分析的结果一致。

2.3 不同盐分土壤水、氮交互效应分析

由图 3 可知,轻度和中度盐分土壤水、氮对玉米产量的影响都呈抛物线形。轻度和中度盐分土壤即水、氮交互作用明显。水、氮两因素,当一个因素固定,籽粒产量即随着另一因素呈先增加而后降低的趋势。不同盐分土壤中,产量随水氮的增加先增加后降低。两种盐分土壤在灌水量和施氮量取最低水平时,产量都出现最低点。轻度和中度盐分土壤玉米产量出现最高值时,对应的灌水量和施氮量并不是最高的水平,说明在盐渍化土壤中水、氮过多反而会降低玉米的产量。在两种盐分土壤中,当灌水量处于较低水平时,增加施氮量,产量增加不明显;而当施氮量处于较低水平时,增加灌水量,产量明显增加。说明在盐渍化土壤中水分是影响玉米产量增加的主要因素。

2.4 不同盐分土壤水、氮处理玉米产量模型寻优

根据模型(1)、(2),结合试验设计经过标准化的编码值,在 $0 \leq x_i \leq 1$ 之间给灌水量和施氮量各取了 7 个水平(编码值为 0、0.22、0.38、0.54、0.69、0.85、1),利用试验两因素的编码值组合可得到轻度盐分土壤产量超过 $10\ 081\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的组合方案和中度盐分土壤产量超过 $8\ 201\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的组合方案均为 26 个。对轻度和中度盐分土壤水、氮两因素的频数进行统计分析,得到轻度盐分土壤产量大于 $10\ 081\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的管理方案和中度盐分土壤产量大于 $8\ 201\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的管理方案相同,具体方案见表 4。由表 4 可知,轻度和中度盐分土壤优化出的灌水量和施氮量的方案相同,每次灌水量为 $1\ 900.95 \sim 2\ 389.08\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,总施氮量为 $174.04 \sim 240.47\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本试验中,轻度盐分土壤玉米最高产量为

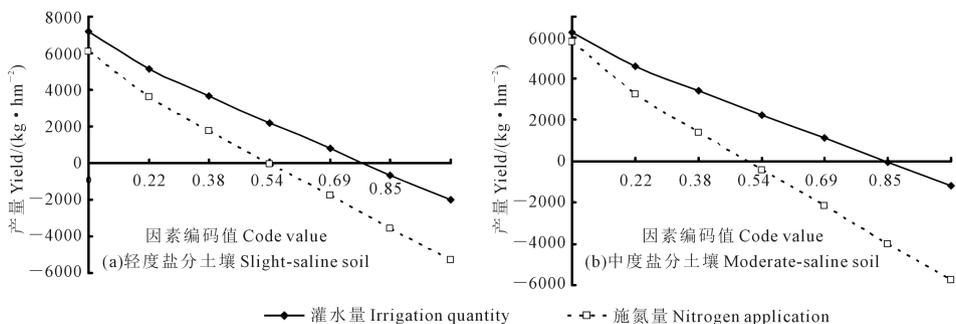


图 2 轻度和中度盐分土壤灌水量与施氮量的单因素边际效应

Fig.2 Marginal effects of water irrigation and N fertilizer in slight-saline and moderate-saline soil

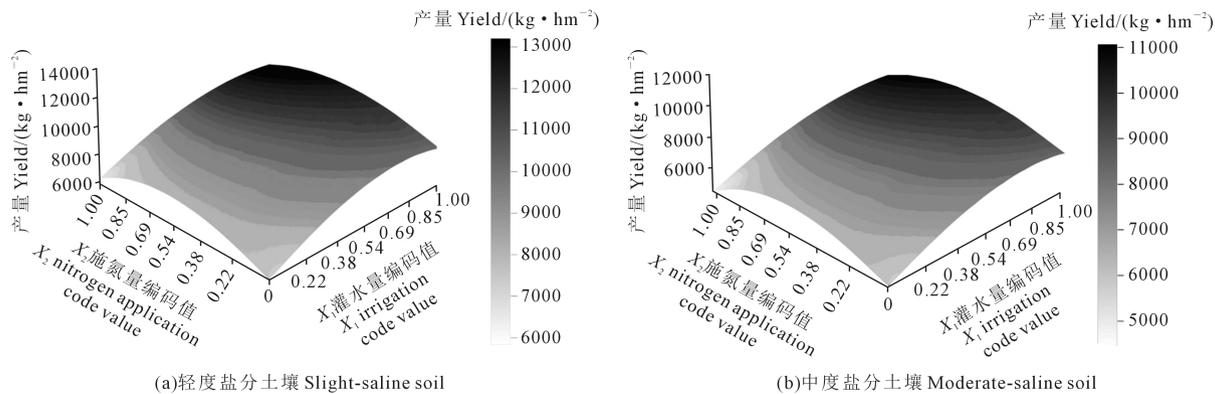


图3 轻度和中度盐分土壤灌水量和氮肥用量耦合对玉米产量的影响

Fig.3 Effects of coupling water irrigation and N fertilizer on maize yield in slight-saline and moderate-saline soil

表4 轻度和中度盐分土壤玉米籽粒产量各因子取值频率分布及配比方案

Table 4 Factor value of the frequency distribution and proportion plan with grain yield under slight and moderate salt soil

水平编码 Level code	X_1		X_2	
	次数 Times	频数 Frequency	次数 Times	频数 Frequency
0	0	0	0	0
0.22	0	0	3	11.54
0.38	3	11.54	4	15.38
0.54	5	19.23	5	19.23
0.69	6	23.08	5	19.23
0.85	6	23.07	5	19.24
1	6	23.08	4	15.38
总次数 Total number	26		26	
编码加权均值 Code weighted mean	0.7338		0.6377	
标准误 Standard error	0.0408		0.4963	
95%置信区间 95% confidence interval	0.6499~0.8178		0.5355~0.7399	
最优配比方案 Optimal matching scheme	1900.95~ 2389.08 m ³ ·hm ⁻²		174.04~ 240.47 kg·hm ⁻²	

13 581 kg·hm⁻², 中度盐分土壤玉米最高产量为 11 115 kg·hm⁻², 对应的灌水和施氮编码相同, 灌水编码为 0.77(实际用量 2 250 m³·hm⁻²), 施氮编码为 0.69(实际用量 225 kg·hm⁻²), 灌水和施氮量在优化方案范围内。说明优化出的水氮方案, 适用于轻度到中度盐分土壤。优化方案的水氮用量分别比当地的每次灌水量(2 925 m³·hm⁻²)节水 18.2%~35%, 氮肥用量(325 kg·hm⁻²)减少 26.0%~46.4%。

3 讨论

农业生产中, 水氮投入和土壤盐分状况是影响盐渍化土壤作物产量的主要因素。探索不同盐渍

化土壤合理的灌水施肥量, 充分利用灌水施肥之间的耦合效应适应盐分胁迫, 使盐渍化土壤作物的产量达到最优。王振华等^[21]研究表明, 合理的灌溉施肥量可以有效增加作物氮素积累, 促进作物氮素利用率的提高, 使产量有了明显的增加。相关研究^[11]表明, 在轻度盐化土壤中合理的水氮交互用量能够显著提高作物的产量, 当水氮过量时产量略有下降, 产量最高处理为中水中氮处理, 与本文的研究结果一致。李仙岳等^[8]研究表明, 玉米产量随水氮用量增加表现为先增加后降低, 灌水对玉米增产的作用大于增施氮肥的作用, 与本文的研究结果一致, 但是其最高产量出现在高水中氮与本文不同, 主要原因由于其相关试验开展在沙区, 因此相同条件下消耗水量较大。可见, 在盐分较轻的盐化土壤上, 水分条件适宜时适当增加氮素可以有效增加产量, 但如果过量灌水施肥会造成水肥的浪费。

随着土壤含盐量的提高, 土壤盐分占据了影响产量的主导地位。中度盐化土壤中盐分和水氮投入共同影响作物产量^[22]。本研究表明中度盐分土壤中各水氮处理的产量明显低于轻度盐分土壤相同水氮处理的产量, 中水中氮依然是产量最高的处理。徐昭等^[14]研究表明, 在中度盐渍化土壤中, 水氮交互效应对产量影响增大, 但依然保持着产量随水氮增加先增加后减少的变化规律, 灌水量对产量的影响依然大于施肥的影响, 中水中氮处理的产量最高, 与本文的研究结果一致。试验结果表明灌水过多会增加氮素的流失, 如果施氮量较少, 就会导致作物养分缺失, 作物减产, 适当增加施氮量可以维持土壤中的一定量氮素含量。然而相关研究^[23]也表明盐渍化土壤上土壤盐分随着施氮量的增加而增加。由于中度盐分土壤自身盐分背景值较高, 为了保持土壤盐分不较大幅度增加, 在保证足够施

肥量的同时还需适当增加灌水来维持对土壤盐分的淋洗,以保证玉米生长不因盐分过高而减产。可见,在中度盐化土壤上,水氮调控非常必要,适当的水氮用量才可以使作物在相对恶劣的环境中保持较高的产量。

本文优化出的轻度和中度盐分土壤的方案相同,每次灌水量为 $1\ 900.95 \sim 2\ 389.08\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,总施氮量为 $174.04 \sim 240.47\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与徐昭等^[14]优化出的方案相比,水氮投入量范围接近,但数值略有偏小,主要由于土壤肥力情况、气候条件以及目标产量设置不同导致的,但都符合当地的实际情况。由于优化的结果是一个范围,因此从长远的盐碱地改良角度看,建议中度盐化土壤选择优化水、氮范围中中等偏上的灌水量和中等偏下的施肥量,可达到逐渐降低土壤盐分背景值目的,将中度盐化土壤改良为轻度盐化土壤,降低盐分的影响程度,达到产量的稳步提高。轻度盐分土壤选择优化水氮范围中适中的水氮用量即可。从试验结果看主要影响产量的因素为灌溉水量,且河套灌区为干旱地区,降雨量少,年际变化不大,因此本试验具有一定的指导意义。

4 结 论

1) 在轻度和中度盐分土壤条件下,灌水和施氮对玉米均有增产效应,水、氮交互作用为正效应,水分的作用大于施氮的作用。

2) 通过边际效应分析可知,轻度和中度盐分施氮肥的增产速率没有显著差异,轻度盐分土壤灌水的增产效率显著高于中度盐分土壤。

3) 通过模型寻优,得到的轻度和中度盐分土壤种植玉米的最佳水氮配比方案相同,全生育期灌水量为 $1\ 900.95 \sim 2\ 389.08\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,总施氮量为 $174.04 \sim 240.7\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。优化范围包含了轻度和中度盐分的最高产量水肥用量,符合当地灌水施肥要求。但从维持目前玉米产量和长期盐碱地改良的角度看,建议中度盐化土壤选择优化水氮范围中中等偏上的灌水量和中等偏下的施肥量,以达到逐渐降土壤盐分背景值目的,将中度盐化土壤改良为轻度盐化土壤,降低盐分的影响程度,达到产量的稳步提高。轻度盐分土壤选择优化水氮范围中适中的水氮用量即可。

4) 优化方案的水氮用量分别比当地的每次灌水量($2\ 925\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)节水 $18.2\% \sim 35\%$,氮肥用量($325\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)减少 $26.0\% \sim 46.4\%$,为盐渍化地区种植玉米提供了节水节肥的依据。

参 考 文 献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] 霍星,史海滨,田德龙,等. 盐分条件下水氮对向日葵影响及其产量模型研究[J]. 节水灌溉, 2012, 22(5): 22-26.
- [3] 李文彪,刘荣乐,郑海春,等. 内蒙古河套灌区春玉米推荐施肥指标体系研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(1): 93-101.
- [4] 王小彬,代快,赵全胜,等. 农田水氮关系及其协同管理[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 7001-7015.
- [5] 薛亮,周春菊,雷杨莉,等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.
- [6] 路亚,刘强,宋希云,等. 非石灰性潮土水肥耦合对夏玉米产量效应的影响[J]. 玉米科学, 2010, 18(4): 121-124.
- [7] 刘秀珍,张阔军,杜慧玲. 水肥交互作用对间作玉米、大豆产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 75-78.
- [8] 李仙岳,丁宗江,闫建文,等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261-270.
- [9] Lamsal K, Paudyal G N, Saeed M. Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield [J]. Agricultural Water Management, 1999, 41(1): 57-70.
- [10] 徐万里,张云舒,刘骅. 新疆盐渍化土壤氮肥挥发损失特征初步研究[J]. 生态环境学报, 2007, 16(1): 176-179.
- [11] 王振华,朱延凯,张金珠,等. 水氮调控对轻度盐化土壤滴灌棉花生理特性与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 296-308.
- [12] Zhao X N, Othmanli H, Schiller T, et al. Water use efficiency in saline soils under cotton cultivation in the Tarim River basin [J]. Water, 2015, 7(6): 3103-3122.
- [13] Zeng W Z, Xu C, Huang J S, et al. Emergence rate, yield, and nitrogen-use efficiency of sunflowers vary with soil salinity and amount of nitrogen applied [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(8): 1006-1023.
- [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]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 334-343.
- [15] 张蔚榛. 盐渍化土壤的冲洗改良和排水(一)作物的耐盐标准与盐化土的分级[EB/OL]. [2020-01-26]. <https://www.docin.com/p-8503640.html>
- [16] Ben-Asher J, van Dam J, Feddes R A, et al. Irrigation of grapevines with saline water. II. Mathematical simulation of vine growth and yield [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83: 22-29.
- [17] 刘霞,王丽萍,张圣微,等. 内蒙古河套灌区灌排水离子组成及淋洗盐分用水量评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 500-505.
- [18] 李建兵,黄冠华. NaCl 对粉壤土氮挥发及硝化、反硝化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 945-948.
- [19] 张余良,王正祥,廉晓娟,等. 滨海盐灌水土脱盐动态的土壤质地和水质差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 515-520.
- [20] 曾洪学,王俊. 盐害生理与植物抗盐性[J]. 生物学通报, 2005, 40(9): 1-3.
- [21] 王振华,权丽双,郑旭荣,等. 水氮耦合对滴灌复播油菜氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 91-100.
- [22] 徐昭,史海滨,李仙岳,等. 水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 281-291.
- [23] 符鲜,杨树青,刘德平,等. 不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 661-667.