

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.038

不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应

徐 昭¹ 史海滨¹ 李仙岳¹ 周 慧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, 巴彦淖尔 015400)

摘要: 为探究玉米产量对不同程度盐渍化农田水氮调控的响应规律, 通过田间试验, 在3种盐渍化农田(S1, 0.247 dS/m; S2, 0.839 dS/m; S3, 1.286 dS/m)上设置3个灌溉量(W1, 150 mm; W2, 225 mm; W3, 300 mm(常规灌溉量))和3个施氮量(N1, 172.5 kg/hm²; N2, 258.8 kg/hm²; N3, 345 kg/hm²(常规施氮量)), 结合模型模拟研究了不同盐渍土条件下玉米产量对水氮调控的响应。结果表明: 灌水显著影响S1、S2和S3玉米产量, 产量随着灌水量的增加呈先增后降的变化趋势。施氮显著影响S1、S2和S3玉米产量, S1和S2上的产量随施氮量的增加先增后降, 而S3上的产量总体呈现逐渐减少趋势。随着土壤盐渍程度的加重, 水氮交互效应对产量影响增大。水氮交互对S1玉米产量影响不显著($P > 0.05$), W2N2较W3N3、W3N2减产4.41%、6.56% ($P > 0.05$), 非盐渍土在水分较好和氮素适宜时才可得较大产量, 但适度节水控氮不会显著减产。水氮交互显著影响S2玉米产量($P < 0.05$), W2N2产量显著高于其余水氮处理($P < 0.05$), 中度盐渍土需供应适宜水氮。水氮交互极显著影响S3玉米产量($P < 0.01$), W2N1产量显著高于其余水氮处理($P < 0.05$), 重度盐渍土在适宜水分和较少供氮时才可得较高产量。经模型寻优得到河套灌区玉米节水节氮高产的水氮用量为: 非盐渍土, 灌水量253.74~286.26 mm, 施氮量267.65~318.85 kg/hm²; 中度盐渍土, 灌水量233.25~268.17 mm, 施氮量225.22~272.56 kg/hm²; 重度盐渍土, 灌水量196.94~243.06 mm, 施氮量179.15~223.35 kg/hm²。

关键词: 玉米; 盐渍化农田; 地面灌溉; 水氮耦合; 产量效应

中图分类号: S274; S156.4⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)05-0334-10

Response of Maize Yield to Irrigation and Nitrogen Rate in Different Salinization Farmlands

XU Zhao¹ SHI Haibin¹ LI Xianyue¹ ZHOU Hui¹ FU Xiaojun² LI Zhengzhong²

(1. College of Water Conservation 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, but it is characterized by less rainfall. Water shortage, 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 water and 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. Referring to the local conventional irrigation (300 mm) and nitrogen amount (345 kg/hm²) in HID, a field interactive experiment with three irrigation amounts and three nitrogen amounts was carried out in three salinization farmlands (S1, 0.247 dS/m; S2, 0.839 dS/m; S3, 1.286 dS/m) respectively. Three irrigation amounts were 150 mm, 225 mm and 300 mm, which was marked as W1, W2, and W3, respectively, and three nitrogen amounts were 172.5 kg/hm², 258.8 kg/hm² and 345 kg/hm², marking as N1, N2 and N3, respectively. The coupling model of water and nitrogen for maize with border irrigation under three saline soils was established and optimized, and the field experiment combined with

收稿日期: 2018-11-25 修回日期: 2018-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005, 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: 徐昭(1991—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: xuzhaofufeng@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

model simulation was used to explore the response of maize yield to water and nitrogen regulation in different salinized soils, and provide scientific basis for reasonable irrigation and nitrogen management. Main conclusions were as follows: the maize yields were significantly affected by irrigation in S1, S2 and S3 soils. The yield of maize was increased firstly and then decreased with the increase of irrigation volume in S1, S2 and S3 soils. In addition, maize yields were significantly affected by nitrogen rate in S1, S2 and S3 soils ($P < 0.05$). The yield of S1 and S2 soils was increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen rate, but it was decreased gradually as a whole in S3 soils. With the increase of soil salinity, the interactive effect of water and nitrogen on yield was enhanced. Water and nitrogen interaction had insignificant effect on the yield ($P > 0.05$) under S1 soil condition. Compared with W3N3 and W3N2 treatment, the yield of W2N2 was decreased by 4.41% and 6.56% ($P > 0.05$), respectively. The maximum yield could be obtained only when the water was better and nitrogen was suitable, but the moderate reduction of irrigation and nitrogen application rate would not significantly reduce the yield in non-saline land. The interaction effect of water and nitrogen significantly affected the yield of S2 ($P < 0.05$), and the yield of W2N2 was significantly higher than that of the rest of treatments ($P < 0.05$), and suitable water and nitrogen supplying were needed in middle saline soil. The yield was significantly affected by the interaction effect of water and nitrogen ($P < 0.01$) in S3, and the yield of W2N1 was significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$), and the higher yield could be obtained when suitable water and less nitrogen were supplied in heavily saline soil. Through the model optimization, the water-saving and nitrogen-controlling management for higher yield of maize in HID were as follows: non-saline soil (irrigation amount of 253.74 ~ 286.26 mm, nitrogen amount of 267.65 ~ 318.85 kg/hm²), moderately saline soil (irrigation amount of 233.25 ~ 268.17 mm, nitrogen amount of 225.22 ~ 272.56 kg/hm²), heavily saline soil (irrigation amount of 196.94 ~ 243.06 mm, nitrogen amount of 179.15 ~ 223.35 kg/hm²).

Key words: maize; salinization farmland; border irrigation; coupling of water and nitrogen; yield effect

0 引言

河套灌区是我国重要的粮食产区,属于典型的干旱地区。灌区盐渍化土地占灌溉农田总面积的50%以上^[1],近年来随着国家对灌区引黄水量实行指令性节水,农业用水不足和土壤盐渍化问题会更加突出^[2],将严重影响灌区粮食的生产安全。此外,当地为了粮食增产或不减产,化肥施用量逐年增加^[3],由于“愈多越好”不科学的施肥方式导致大量的氮素随着灌溉水进入土壤和地下水,造成严重的面源污染^[4]。当前,相对缺水、土壤盐渍化和化肥施用量过多已成为制约灌区粮食安全和环境安全的重要因素,如何在盐渍化土地上合理、高效地利用水、肥资源,以提高粮食生产效率和减小氮素面源污染成为亟需解决的科学问题。

水、肥是干旱地区农业发展和农业生产效率提高的两大关键因素^[5]。TEWOLDE等^[6]研究发现,水、氮亏缺会抑制作物生长,导致产量降低。HAMZEI^[7]研究表明,过量的灌水和施氮会使油菜营养生长过盛,导致其产量下降。说明在非盐渍土地上,水、氮用量与作物产量在一定范围内呈正相关,而过量则会导致产量降低或增产不显著^[8-9],合理的水、氮用量是提高粮食生产效率的主要手段。同样也有学者研究得到水氮交互作用显著影响盐渍土

壤作物产量,适宜的水氮供应有助于提高盐渍土壤作物产量,而当过量灌溉和施氮时,作物的各项生理指标和产量增加不明显或略有下降^[10]。可见,盐渍化土壤下作物产量与水、氮用量的关系与非盐渍土壤相似,但现有的研究大多针对一种或两种盐渍化土壤条件下水氮运筹对产量的影响且注重作物产量对水氮调控的响应^[11],而针对产量对土壤盐渍化程度响应规律的研究较少。CHEN等^[12]研究发现,土壤盐分与施氮量具有交互作用,且这种交互作用随着土壤含盐量的不同而不同。ULERY等^[13]研究表明过量施用氮肥可能会加重土壤的盐分含量并且增加对作物生长的抑制作用。符鲜等^[14]研究发现土壤盐分随着施氮量的增加而增加。由此说明,水、氮和产量在盐渍土壤条件下的关系更为复杂,且这种关系随着土壤盐渍化程度的不同而不同。此外,GHOLAMHOSEINI等^[15]研究表明灌水定额一定时硝态氮淋失量随着施氮量增加而递增。KATERJI等^[16]研究表明,盐分对作物生长的抑制作用会降低作物对氮素的吸收利用,从而增加了氮素淋失的潜在风险。可见,盐渍土壤过量施用氮肥对土壤及地下水环境造成的污染隐患可能会增大,适度减氮可降低氮素面源污染风险。已有研究表明,作物对水分和养分的吸收利用效率在不同程度盐分胁迫下有所差异^[17-19]。河套灌区土壤盐渍化程度较高且差

异较大,当地生产主要根据畦田面积进行灌溉和施氮,而对不同程度盐渍化农田条件下合理的水氮管理还未引起足够重视。因此,针对河套灌区不同程度盐渍化土地,确定合理的水、氮用量对提高粮食产量、高效利用水氮和减小氮素面源污染具有重要现实意义。

本文以河套灌区玉米为研究对象,基于多元回归模型构建不同程度盐渍土壤下玉米产量的水氮耦合模型,通过田间试验和模型模拟结合的方法探究产量效应对不同盐渍土壤水氮调控的响应规律,并进行方案寻优,提出不同程度盐渍土壤下水氮优化方案,以期对盐渍化土地合理灌溉和施氮决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古河套灌区沙壕渠试验站(40°54'40" N, 107°9'57" E, 海拔 1 034 m)。多年平均气温 7.7℃, 年平均日照时数 3 200 h, 全年太阳总辐射约为 6 000 MJ/m², 热量充足。玉米种植面积已达到灌区总播种面积的 1/3 以上。该地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。试验地 2017 年玉米生长季(4—9 月)有效降雨量为 45.0 mm(图 1)。

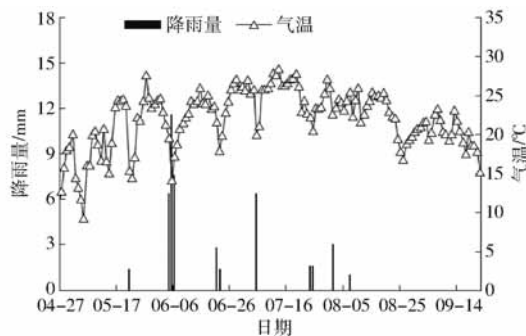


图 1 2017 年玉米生长季降雨量和气温

Fig. 1 Rainfall and air temperature during growing season of maize in 2017

1.2 试验设计

大田试验选取 3 种不同程度盐渍化农田, 参照土壤盐渍化程度划分标准^[20], 将所选 3 块试验田依次划分为非盐渍、中度、重度盐渍化土壤, 依次记为 S1、S2、S3。试验田播种前 0~100 cm 平均土壤电导率和 0~30 cm 土壤养分含量见表 1。试验采用当地常规畦灌, 参照当地玉米种植常规灌水量^[11]和施氮量^[21], 在 S1、S2、S3 试验田上分别设置 3 个灌水量 (W1, 150 mm; W2, 225 mm; W3, 300 mm (常规灌溉量)) 和 3 个施氮量 (N1, 172.5 kg/hm²; N2, 258.8 kg/hm²; N3, 345 kg/hm² (常规施氮量)), 试验共设 27 个处理, 3 次重复。试验小区长 6.5 m, 宽 6 m, 面积为 39 m², 各小区间打 15 cm 高田埂并埋设 1 m 深聚氯乙烯塑料布隔离。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。根据当地生产实践, 播前施基肥磷酸二铵 (含氮质量分数 18%), 施用量为 450 kg/hm²。剩余的氮肥以尿素 (含氮质量分数 46%) 的形式分别在玉米拔节-大喇叭口期及抽雄期灌溉时追施 (施氮量各占 1/2)。全生育期进行 3 次灌水, 灌水量通过水表记录, 具体灌水和施肥设计见表 2, 施氮量为换算后的纯氮素量。

1.3 测定项目与方法

(1) 基本指标的测定

产量测定: 玉米成熟时, 在各小区非边行选取标

表 1 播种前 0~100 cm 土壤电导率和 0~30 cm 土壤养分含量

Tab. 1 Soil electrical conductivity of 0~100 cm depth and soil nutrient content of 0~30 cm depth before sowing

供试 农田	土壤	速效氮	速效磷	速效钾	有机质
	电导率/ (dS·m ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (g·kg ⁻¹)
S1	0.247	43.02	20.56	121.43	11.42
S2	0.839	21.45	9.26	120.61	7.23
S3	1.286	15.13	5.71	130.59	4.54

表 2 玉米灌溉量和施氮量设计

Tab. 2 Design of amounts and dates of water and nitrogen application

处理	灌水定额/mm			灌溉 定额/ mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)		施氮总量/ (kg·hm ⁻²)	因素编码值	
	大喇叭口期	抽雄期	灌浆期		大喇叭口期	抽雄期		灌水量 x ₁	施氮量 x ₂
	(6月29日)	(7月21日)	(8月6日)		(6月29日)	(7月21日)			
高水高氮 (W3N3)	100	100	100	300	172.50	172.50	345.0	1.0	1.0
中水高氮 (W2N3)	75	75	75	225	172.50	172.50	345.0	0.5	1.0
低水高氮 (W1N3)	50	50	50	150	172.50	172.50	345.0	0	1.0
高水中氮 (W3N2)	100	100	100	300	129.40	129.40	258.8	1.0	0.5
中水中氮 (W2N2)	75	75	75	225	129.40	129.40	258.8	0.5	0.5
低水中氮 (W1N2)	50	50	50	150	129.40	129.40	258.8	0	0.5
高水低氮 (W3N1)	100	100	100	300	86.25	86.25	172.5	1.0	0
中水低氮 (W2N1)	75	75	75	225	86.25	86.25	172.5	0.5	0
低水低氮 (W1N1)	50	50	50	150	86.25	86.25	172.5	0	0

准样株 20 株,单独收获考种测产,取平均值。

(2) 相关数据处理方法

数据标准化:采用 min-max 最值归一化方法,对原始数据进行线性变换。设 minA 和 maxA 分别为属性的最小值和最大值,将 A 的一个原始值 X 通过 min-max 标准化映射成在区间 [0, 1] 中的值 X*, 其公式为

$$X^* = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中 X* ——数据标准化值

X ——样本实际值

X_{min} ——样本数据的最小值

X_{max} ——样本数据的最大值

(3) 水氮耦合模型

本试验研究 3 种不同程度盐渍化农田下灌溉量、施氮量与玉米产量之间的回归关系,以产量为目标,以灌溉量和施氮量为自变量,建立水-氮-产量回归模型,用二元二次回归方程进行模型的表达。二元二次回归方程表达式为

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad (2)$$

式中 y ——玉米预测产量, kg/hm²

a₀ ——回归模型的常数项

a₁, a₂ ——回归模型的一次项系数

a₁₂ ——回归模型的交互项系数

a₁₁, a₂₂ ——回归模型的二次项系数

1.4 数据分析

采用 Excel 整理数据和制图,利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同盐渍土条件下水氮处理对产量的影响

作物最终的籽粒产量是评价水氮模式的最核心指标。由表 3 方差分析可知,灌水和施氮显著影响 S1、S2 和 S3 盐渍土玉米产量,且灌水的影响大于施氮。水氮交互效应显著影响 S2 盐渍土玉米产量 (P < 0.05), 极显著影响 S3 盐渍土玉米产量 (P < 0.01), 而对 S1 土壤影响不显著 (P > 0.05)。说明随着土壤盐渍化程度的加重,水氮交互效应对产量的影响增大。

表 3 不同盐渍土条件下水氮处理对玉米产量影响的方差分析

Tab.3 Variance analysis of effects of water and nitrogen on yield of maize under different saline soil conditions

因素	S1	S2	S3
灌水	63.138 **	66.289 **	114.580 **
施氮	4.203 *	27.238 **	22.877 **
灌水 × 施氮	1.859	2.949 *	5.256 **

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

由图 2 可看出,玉米产量与水氮用量的关系随着土壤盐渍化程度的不同而不同。灌溉影响方面,相同施氮水平下,灌溉量从 W1 增加至 W2 时,在 S1、S2 和 S3 土壤上均表现为 W2 水平的玉米产量显著高于 W1 水平 (P < 0.05), 而当灌溉量从 W2 增加至 W3 时,在 S1 土壤上产量由大到小总体上表现为 W3、W2, 但无显著差异; 在 S2 土壤 N3 条件下 W3 水平较 W2 增产 4.84%, 但差异不显著, 在 N2 条件下 W3 水平产量显著低于 W2 (P < 0.05), 在 N1 条件下 W3 较 W2 减产 8.67%, 但差异不显著; 在 S3 土壤上均表现为 W3 产量较 W2 显著减产 (P < 0.05)。由此说明,相同施氮量下,在 3 种不同程度盐渍土适度增加灌溉量均可显著增产, 而过量灌溉时产量效应有所不同, 表现为在非盐渍土上增产作用并不明显, 在中度盐渍土上仅在较高施氮量条件下还可以继续增产, 但增产效应不显著, 而在中、低施氮量条件下会造成减产, 特别在中等施氮量条件下会显著减产, 在重度盐渍土上过量灌溉均会显著减产。

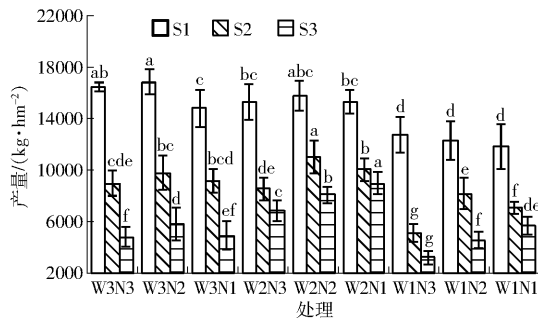


图 2 不同盐渍土条件下水氮处理对玉米产量的影响
Fig.2 Effects of water and nitrogen treatment on maize yield under different saline soil conditions

施氮影响方面,相同灌溉水平下,当施氮量从 N1 增加至 N2 时,在 S1 土壤 W3 条件下 N2 的玉米产量显著高于 N1, 在 W2 和 W1 条件下由大到小表现为 N2、N1, 但差异不显著; 在 S2 盐渍土上,产量由大到小表现为 N2、N1, 这种趋势在 W2、W1 水平下差异显著 (P < 0.05), 而在 W3 水平下差异不显著; 在 S3 土壤 W3 条件下 N2 显著高于 N1 (P < 0.05), 而在 W2、W1 条件下 N2 的产量显著低于 N1 (P < 0.05)。当施氮量从 N2 增至 N3 时,在 S1 土壤 W3 和 W2 条件下 N3 较 N2 分别减产 2.25% 和 2.59% (P > 0.05), 在 W1 条件下 N3 较 N2 增产 4.16% (P > 0.05); 在 S2 土壤 W3 条件下减产不显著, 在 W2 和 W1 条件下 N3 较 N2 分别显著减产 22.67% 和 36.98% (P < 0.05); 在 S3 土壤均表现为 N3 较 N2 显著减产 (P < 0.05)。由此可见,相同灌溉量下,在非盐渍土较高灌溉量下适度增施氮肥能显著

增产,而在中、低灌溉量下增产不明显;在中度盐渍土中、低灌溉量下适度增施氮肥能显著增产,而在较高灌溉量下增产不明显;在重度盐渍土较高灌溉量下适度增施氮肥能显著增产,而在中、低灌溉量下会显著减产。当过量施氮时产量效应在非盐渍土上增产效果不显著甚至有下降趋势,在中度盐渍土上会抑制玉米产量并且在中、低灌溉量下会导致玉米显著减产,在重度盐渍土上过量施氮均会显著减产。

水氮交互影响方面,在 S1 非盐渍土上, W3N2 产量显著高于其余水氮处理(除了与 W3N3、W2N2 差异不显著)($P < 0.05$), W2N2 较 W3N3、W3N2 减产 4.41%、6.56%,差异不显著。在 S2 盐渍土上, W2N2 的产量显著高于其余水氮处理。在 S3 盐渍土上, W2N1 的产量显著高于其余水氮处理, W2N2 次之。可见,适度减氮控水不会显著降低非盐渍土玉米产量,还可以显著提高中度和重度盐渍土玉米产量。

2.2 不同盐渍土条件下水氮耦合产量效应分析及方案优化

2.2.1 水-氮-产量回归方程建立

采用标准化处理后的灌溉量和施氮量数据,对不同盐渍土条件下水、氮和产量数据分别进行二元二次回归模拟,得到 3 种盐渍土条件下产量(y)与灌溉量编码值(x_1)、施氮量编码值(x_2)的回归模型为:

非盐渍土

$$y = 11\,856.786 + 8\,528.983x_1 + 2\,711.550x_2 - 5\,117.067x_1^2 - 2\,158.867x_2^2 + 686.300x_1x_2 \quad (3)$$

中度盐渍土

$$y = 7\,331.797 + 9\,036.283x_1 + 3\,937.417x_2 - 7\,379.133x_1^2 - 6\,032.333x_2^2 + 1\,759.500x_1x_2 \quad (4)$$

重度盐渍土

$$y = 5\,730.369 + 12\,068.717x_1 - 1\,107.383x_2 - 12\,548.067x_1^2 - 1\,635.467x_2^2 - 2\,329.300x_1x_2 \quad (5)$$

对式(3)~(5)进行显著性检验,决定系数分别为 0.962、0.918、0.980,表明预测产量与实测产量

有很好的拟合度。经检验 $F_1 = 15.352$ 、 $P_1 = 0.024$; $F_2 = 20.853$ 、 $P_2 = 0.015$; $F_3 = 30.140$ 、 $P_3 = 0.009$,说明回归关系都达到了显著水平,模型与实际情况拟合很好,能够反映产量与灌溉量和施氮量之间的关系。

方程中 x_1 、 x_2 的二次项系数为负数,在设计范围内产量随着水氮用量的增加而呈开口向下的抛物线变化趋势,灌溉量和施氮量都存在一个最大值,过量投入就会引起减产,造成水、氮的浪费。回归模型的偏回归系数表明,在本试验中灌水作用大于施氮作用,非盐渍土、中度盐渍土条件下水氮均对产量有明显的促进作用;在重度盐渍土条件下灌水对产量有促进作用,施氮对产量为负作用。

2.2.2 单因素效应分析

为了研究不同盐渍土条件下灌溉量和施氮量单个因子对产量的影响,采用降维法对方程(3)~(5)中任意一个因子设为零水平,可得灌溉量与施氮量的单因素产量效应函数 y_w 、 y_n 为:

非盐渍土

$$y_w = 11\,856.786 + 8\,528.983x_1 - 5\,117.067x_1^2 \quad (6)$$

$$y_n = 11\,856.786 + 2\,711.550x_2 - 2\,158.867x_2^2 \quad (7)$$

中度盐渍土

$$y_w = 7\,331.797 + 9\,036.283x_1 - 7\,379.133x_1^2 \quad (8)$$

$$y_n = 7\,331.797 + 3\,937.417x_2 - 6\,032.333x_2^2 \quad (9)$$

重度盐渍土

$$y_w = 5\,730.369 + 12\,068.717x_1 - 12\,548.067x_1^2 \quad (10)$$

$$y_n = 5\,730.369 - 1\,107.383x_2 - 1\,635.467x_2^2 \quad (11)$$

在试验设计的各因素水平范围内,各因子的产量效应如图 3 所示。从图中可以看出,水、氮因素的产量效应均为抛物线,且灌水因素各抛物线的顶点在试验设计水平范围内,表明灌水在不同盐渍土条件下都有明显的增产效应。抛物线顶点对应的便是各因素最适投入量。在本试验中, S1 盐渍土上最适灌溉量为 0.83,换算为实际用量为 274.95 mm, S2

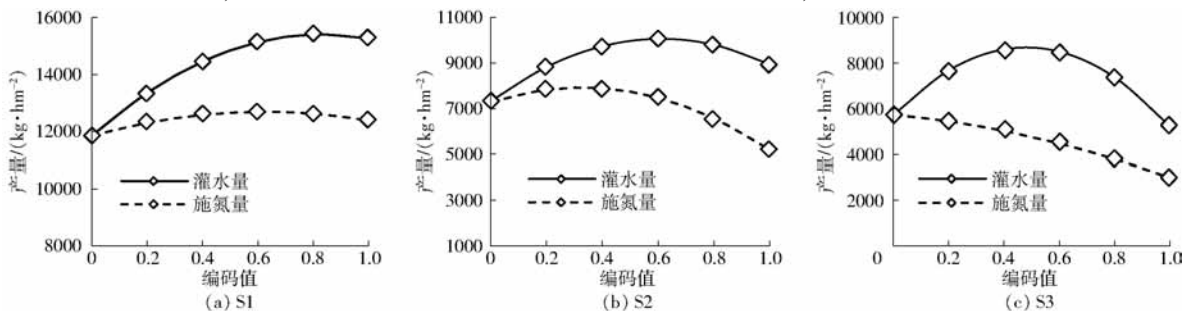


图3 不同盐渍土条件下单因素对产量影响的效应曲线

Fig. 3 Effect curves of single factor on yield under different salinization soils

盐渍土上最适灌水量为 0.61, 换算为实际用量为 241.50 mm, S3 盐渍土上最适灌水量为 0.48, 换算为实际用量为 222.13 mm。施氮因素在 S1、S2 盐渍土条件下各抛物线的顶点在试验设计水平范围内, 表明施氮在 S1、S2 盐渍土上具有增产效应, S1 盐渍土上最适氮素投入量为 0.63, 即 281.18 kg/hm², S2 盐渍土上最适氮素投入量为 0.33, 即 229.42 kg/hm²。而 S3 盐渍土条件下产量效应曲线为开口向下抛物线的递减部分, 抛物线的顶点不在试验设计水平范围内, 施氮在本试验条件下表现为减产效应, 说明在重度盐渍土上应进一步减少施氮量。

2.2.3 单因素边际效应分析

边际产量反映了各因素最适投入量和单位水平投入量变化对产量增加或降低速率的影响, 各因素在不同盐分水平时的边际产量可通过对回归子模型式(6)~(11)求一阶偏导得出, 灌水量、施氮量的边际效应方程为:

非盐渍土

$$dy_w/dx_1 = 8528.983 - 10234.134x_1 \quad (12)$$

$$dy_n/dx_2 = 2711.550 - 4317.734x_2 \quad (13)$$

中度盐渍土

$$dy_w/dx_1 = 9036.283 - 14758.266x_1 \quad (14)$$

$$dy_n/dx_2 = 3937.417 - 12064.666x_2 \quad (15)$$

重度盐渍土

$$dy_w/dx_1 = 12068.717 - 25096.134x_1 \quad (16)$$

$$dy_n/dx_2 = -1107.383 - 3270.934x_2 \quad (17)$$

根据两因素边际函数绘制出对应的边际效应图(图4)。从图中可以看出, 随着灌水量和施氮量的增加, 边际玉米产量效应均呈现递减趋势。图4纵坐标值大于零表示因素可促进玉米产量, 小于零表示会抑制玉米产量。S1土壤上, 当 $x_1 \leq 0.83$ 时, 灌水会促进玉米增产, 当 $x_1 > 0.83$ 时, 灌水会抑制玉米产量; 当 $x_2 \leq 0.63$ 时, 施氮会促进玉米增产, 当 $x_2 > 0.63$ 时, 施氮会抑制玉米产量。S2盐渍土上, 当 $x_1 \leq 0.61$ 时, 灌水会促进玉米增产, 当 $x_1 > 0.61$ 时, 灌水会抑制玉米产量; 当 $x_2 \leq 0.33$ 时, 施氮会促进玉米增产, 当 $x_2 > 0.33$ 时, 施氮会抑制玉米产量。

S3盐渍土上, 当 $x_1 \leq 0.48$ 时, 灌水会促进玉米增产, 当 $x_1 > 0.48$ 时, 灌水会抑制玉米产量; 当 $x_2 > 0$ 时, 边际效应均为负数, 说明在试验设计水平范围内施氮会抑制玉米产量, 可见重度盐渍土上应减少氮肥的施用量。

2.2.4 水氮二因素交互效应分析

玉米产量受水氮二因素共同影响, 它们之间存在相互促进或相互抑制的关系。图5为灌水量和施氮量对玉米产量的互作效应三维关系图。可以看出, 在S1、S2和S3土壤上, 灌水量对玉米产量效应均呈抛物线形, 当施氮量相同时, 随着灌水量的增加, 灌水的曲面坡度变化较快, 产量均先相对大幅提高, 而到达最高点后下降幅度随着土壤盐渍程度的不同而不同, 具体表现为在S1土壤上小幅度降低, S2土壤上中等幅度降低, 而S3土壤上大幅度降低。在S1和S2土壤上施氮量对玉米产量效应呈抛物线形, 当灌水量相同时, 随着施氮量增加, 曲面坡度变化较慢, 产量均先缓慢增加, 达到最高点后规律有所不同, 表现为S1产量缓慢减小, 而S2产量快速减小。在S3土壤上施氮量对玉米产量效应呈开口向下抛物线的递减部分, 产量随着施氮量的增加而减小。S1、S2和S3土壤玉米最低产量分别出现在水氮用量都取较低水平、灌水量较低水平且施氮量较高水平和水氮用量较高水平的情况。S1、S2和S3土壤玉米最高产量分别出现在灌水施氮的中高水平、灌水施氮的中等水平和灌水中等水平且施氮较低水平。由此说明, 灌水量与施氮量之间有很好的耦合作用, 二因素的调控非常重要, 非盐渍土上在水分条件较好的情况下供应适宜的氮素才可得到最大的产量效益, 中度盐渍土上供应适宜的水分和氮素才可得到最大的产量效益, 重度盐渍土上供应适宜的水分和较低的氮肥才可得到较大的产量效益。

2.2.5 基于频率分析法的组合方案寻优

为得出不同盐渍土条件下, 玉米不同目标产量的最优水氮组合方案, 参考薛亮等^[22]和李仙岳等^[23]研究方法, 采用频数法对式(3)~(5)进一步分析, 在0~1之间等距离取6个水平(0、0.2、0.4、

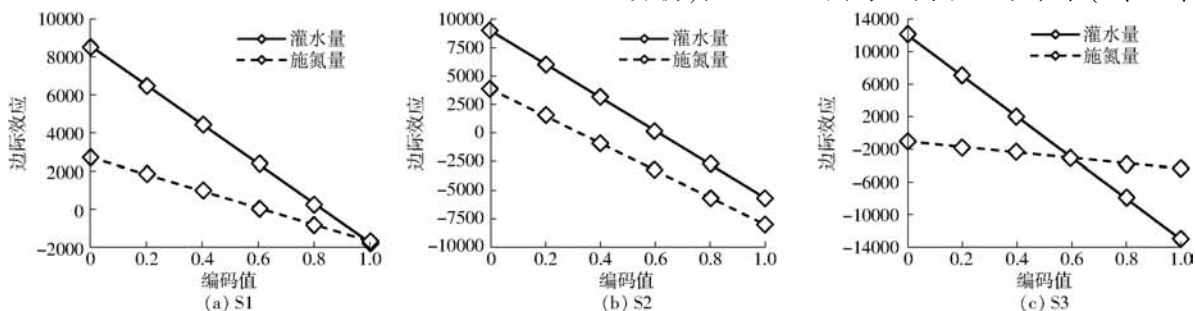


图4 产量边际效应分析
Fig.4 Analysis of marginal effect of yield

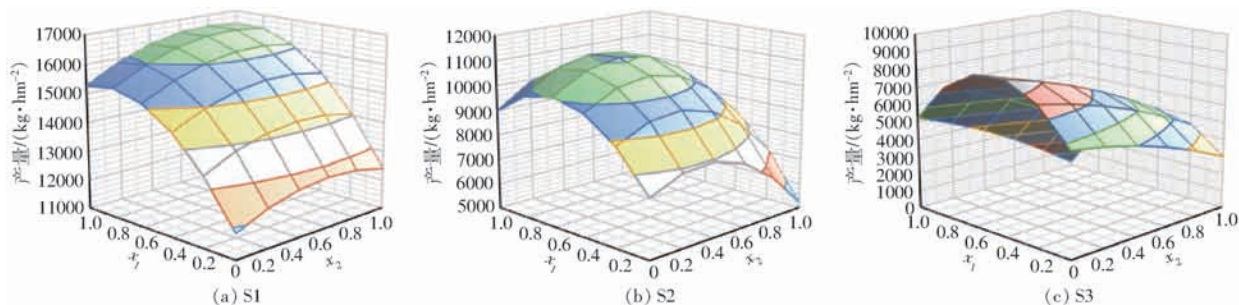


图5 不同盐渍土条件下水氮交互效应对产量的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen and irrigation on maize yield under different salinization soil

0.6、0.8、1.0)。通过水氮二因素回归模型模拟求得36套组合方案,其中在非盐渍土上,目标产量大于平均产量方案有22套,目标产量大于16000 kg/hm²的方案有12套;在中度盐渍土上,目标产量大于平均产量方案有21套,目标产量大于10000 kg/hm²的方案有14套;在重度盐渍土上,目标产量大于平均产量的方案有18套,目标产量大于7000 kg/hm²的方案有9套。其优化组合方案见表4,寻优过程中均值、标准差和95%置信区间的计算公式从略。由表4可知,在不同盐渍土条件下得到不同目标产量的优化水氮组合方案:①目标产量为大于平均产

量时,非盐渍土上,灌水量244.56~273.63 mm,施氮量239.01~291.05 kg/hm²;中度盐渍土上,灌水量228.11~263.32 mm,施氮量221.79~264.49 kg/hm²;重度盐渍土上,灌水量194.26~232.40 mm,施氮量200.94~243.73 kg/hm²。②目标产量为各盐渍土上较高产量时,非盐渍土上,灌水量253.74~286.26 mm,施氮量267.65~318.85 kg/hm²;中度盐渍土上,灌水量233.25~268.17 mm,施氮量225.22~272.56 kg/hm²;重度盐渍土上,灌水量196.94~243.06 mm,施氮量179.15~223.35 kg/hm²。

表4 目标产量寻优方案

Tab. 4 Schemes for optimizing maize target yields

目标产量	非盐渍土		中度盐渍土		重度盐渍土	
	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)
大于平均产量	244.56~273.63	239.01~291.05	228.11~263.32	221.79~264.49	194.26~232.40	200.94~243.73
大于16000 kg/hm ²	253.74~286.26	267.65~318.85				
大于10000 kg/hm ²			233.25~268.17	225.22~272.56		
大于7000 kg/hm ²					196.94~243.06	179.15~223.35

3 讨论

土壤水分、养分、盐分是影响盐渍土作物产量的3个主要因子,三者的关系随着土壤盐渍化程度的不同而不同。因此,在不同程度盐渍化土壤上通过合理的灌溉施氮模式来调节土壤水分、氮素、盐分的状况是实现作物高产的重要途径。在非盐渍土或者盐分含量较低的土壤上,水、氮是玉米产量的主要限制因子^[5],适宜的水氮供应对作物的生长和增产具有显著的耦合效应^[10-11,24]。吕丽华等^[24]研究表明,在非盐渍土壤供水条件较好的情况下,水分不是氮肥肥效发挥的限制因素,氮肥对产量的贡献较大,而在供水条件较差的情况下,水分是限制氮肥肥效发挥的主要因素,增施氮肥对增产无效,甚至引起减产。本研究发现,在非盐渍土壤灌溉量较高的条件下适度增施氮肥能显著增产,而在中、低灌溉量条件下增施氮肥的增产效果不明显,本研究结果中施氮

量与产量的关系与吕丽华等^[24]研究结果一致。李仙岳等^[23]研究表明,产量随水氮用量的增加均呈先增加后减小的趋势,灌水的增产作用大于施氮,过量灌溉或施氮不会显著增加玉米产量,最高产量出现在高水中氮处理,本研究中非盐渍土玉米产量与水氮用量关系的结果与李仙岳等^[23]研究结果相似。这是因为土壤水分是土壤养分释放的基础,施氮能提高作物的水分利用率,但肥料供应过多会使作物“徒长”,对产量形成不利^[25-26]。可见,在非盐渍土或者盐分含量较低的土壤上,在保证水分条件较好的情况下,供应适宜的氮素才可得到最大的产量效益,而过量的供应水氮会造成资源的浪费。

在中度盐渍化土壤上盐分也成为玉米产量的主要限制因子,水、氮、盐三者共同影响玉米产量^[10,27]。通过合理的水氮管理来改善盐渍土作物生长的农田水土环境,可为作物高产提供有利条件。石玉等^[28]研究表明,随着灌水量的增加土壤硝态氮

淋溶量增大,80~140 cm 土层的硝态氮含量表现为 W3(高水)显著高于其他处理。因此,在相同施氮量下较高灌水量的淋洗作用相比中、低灌水量会淋失更多的氮素,在中、低施氮量条件下过量灌溉会造成氮素亏缺,导致玉米减产,而较高施氮量可以缓解过量灌溉对氮素淋失的促进作用,在保障作物养分供应的同时又获得了更多的水分资源,从而在一定程度上还可以促进产量的提高。可见,在盐渍化灌区适度地减少灌水量虽然不利于盐分淋洗,但可以减小养分淋失和促进作物根系深扎^[29],更有利于地下水浅埋区作物利用根际深层水氮资源。符鲜等^[14]研究表明盐渍化土壤上土壤盐分随着施氮量的增加而相对增加。因此,本试验在相同灌溉量下增施氮肥会相对增加土壤盐分,但由于较高的灌溉量对盐分的淋洗作用更强,在同等施氮量条件下可以相对缓解增施氮肥对土壤盐分的增加,从而较高灌水量条件下过量施氮对产量的抑制作用不显著,而由于在中、低灌水量下淋洗作用较弱,过量的施氮可能会显著增大土壤盐分含量,进而导致玉米显著减产。徐昭等^[27]研究发现,在河套灌区盐渍土壤上适度地减少水氮用量可改善盐渍土壤通透性、促进生根机制、减轻土壤盐分胁迫等,这为作物生长发育和高产提供了较好的基础,最终中水中氮处理产量最高。本研究中最高产量出现在灌水施氮的中等水平, W2N2 的产量显著高于其余水氮处理 ($P < 0.05$),本研究结果与上述研究结果一致。可见,在土壤盐渍化程度达到中度时,水氮调控非常必要,供应适宜的水分和氮素才可得到最大的产量效益。

随着土壤盐渍化程度的加重,盐分因子对作物生长及产量的影响越来越大。PESSARAKLI^[19]认为,在低盐环境下,氮素缺乏对作物的影响比盐分大,施加养分对作物增产是正效应;在中度盐分下,两者可能相互独立,都是限制作物生长的因子;在高盐环境下,盐分可能是作物生长的主要限制因子,氮素对作物影响不大。因此,在保障适宜作物生长所需的水、氮资源前提下,通过合理的灌溉和施氮来相对降低土壤含盐量是重度盐渍土壤上增产的主要途径。此外,由于重度盐渍土壤通透性较差的物理特性^[30],改善土壤通透性也是增产的又一关键要素。在重度盐渍土上适宜地增加灌溉量有利于淋洗盐分,而过量灌溉虽然淋洗了更多的盐分,但过量灌溉会造成土壤的通水透水能力降低,从而影响玉米产量。因此,本试验出现了产量随着灌水量的增加先大幅提高后又大幅度降低的结果。CHEN 等^[12]研究表明,在中、低水平盐分土壤上氮素吸收随施氮量增加而增加,而过量施氮对氮素吸收的促进不显著,

在较高盐分土壤上,氮吸收与施氮量无关,主要受土壤盐分的影响。在重度盐渍土壤上,增施氮肥会相对增大土壤盐分含量^[14],抑制玉米产量。因此,产量随着施氮量的增加总体上呈逐渐减少的趋势。但由于较高的灌溉量对盐分的淋洗能力较强,适度增施氮肥对盐分的促进作用不明显,从而本研究出现了在较高灌溉量下适度增施氮肥可显著提高玉米产量的现象。本研究中最高产量出现在灌水中等水平且施氮较低水平时, W2N1 的产量显著高于其余水氮处理 ($P < 0.05$)。可见,在重度盐渍化土壤上,供应适宜水分的前提下供给较少的氮肥才可得到较大的产量效益,在河套灌区常规水氮用量的基础上适度控水大幅减氮,在显著提高玉米产量的同时还可以大幅降低氮淋溶和氨挥发损失等污染环境的风险。

光合作用是产量的直接来源,提高光合作用效率是提高产量最重要的可行途径^[31]。合理的水氮模式通过改善作物农田水土环境、冠层发育、光合特性及生理适应等方面来促进光合作用效率,进而提高籽粒产量。关于系统探讨盐渍化农田玉米光合作用效率对水氮调控的响应来揭示水氮耦合的增产稳产机理,还有待进一步研究。本试验结果表明,随着土壤盐渍化程度的加重,水氮交互效应对产量的影响增大。这说明水氮耦合在盐渍化土壤上相比非盐渍土壤具有优越性,在盐渍化土壤上采取合理水氮调控措施十分必要。河套地区气候干旱,降雨量非常小,主要还是以灌溉为主,所以灌溉效应的年际变化较小,一年试验得到的结论仍有一定的指导意义。

4 结束语

在不同程度盐渍化农田上采取合理的水氮用量是实现玉米高产和减小氮素污染的重要途径。在非盐渍土壤上,在保证水分条件较好的情况下,供应适宜的氮素才可得到最大的产量效益, W3N2 处理的产量最高,但 W2N2 处理的玉米产量与 W3N2 和 W3N3 差异不显著 ($P > 0.05$)。在土壤盐渍化程度达到中度时, W2N2 处理的产量显著高于其余水氮处理 ($P < 0.05$),需供应适宜的水分和氮素才可得到最大的产量效益。在重度盐渍土壤上, W2N1 处理的玉米产量显著高于其余水氮处理 ($P < 0.05$),在供应适宜水分的前提下供给较少氮肥才可得到较大的产量效益。因此,河套灌区非盐渍土和中度盐渍土玉米应在当地常规水氮用量的基础上适度地减少水氮用量,而重度盐渍土玉米应适度控水和大幅减氮,这样既能保证稳产高产又能减小氮素面源污染的风险。

参 考 文 献

- [1] FENG Zhaozhong, WANG Xiaoke, FENG Zongwei. 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] SUN Guanfang, ZHU Yan, YE Ming, et al. Development and application of long-term root zone salt balance model for predicting soil salinity in arid shallow water table area[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213(3):486-498.
- [3] 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.
- [4] WU Yong, SHI Xiaohong, LI Changyou, et al. Simulation of hydrology and nutrient transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China[J]. *Water*, 2017, 9(3):169.
- [5] BADR M A, ELTOHAMV W A, ZAGHLOUL A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(3):9-15.
- [6] TEWOLDE H, FERNANDEZ C J. Vegetative and reproductive dry weight inhibition in nitrogen- and phosphorus-deficient Pima cotton[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(2-3):219-232.
- [7] HAMZEI J. Seed, oil, and protein yields of canola under combinations of irrigation and nitrogen application[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(4):1152-1158.
- [8] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13):98-105.
- SONG Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(13):98-105. (in Chinese)
- [9] 刘世全, 曹红霞, 杨慧, 等. 水氮供应与番茄产量和生长性状的关联性分析[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(22):4445-4452.
- LIU Shiquan, CAO Hongxia, YANG Hui, et al. The correlation analysis between tomato yield, growth characters and water and nitrogen supply[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22):4445-4452. (in Chinese)
- [10] 王振华, 朱延凯, 张金珠, 等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6):296-308.
- WANG Zhenhua, ZHU Yankai, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of water and nitrogen fertilization on physiological characteristics and yield of cotton under drip irrigation in mildly salinized soil [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6):296-308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180635&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.035. (in Chinese)
- [11] 闫建文. 盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.
- YAN Jianwen. Study on the water and nitrogen migration regularity and efficient utilization of maize in the salinity soil [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3):661-667.
- FU Xian, YANG Shuqing, LIU Deping, et al. Responses of soil microbes to N fertilizers in two saline soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3):661-667. (in Chinese)
- [15] GHOLAMHOSEINI M, AGHAALIKHANI M, SANAVY S A M M, et al. Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 126:9-18.
- [16] 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.
- [17] ZHAO Xiaoning, 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.
- [18] ZENG Wenzhi, XU Chi, HUANG Jiasheng, 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.
- [19] PESSARAKLI M. Handbook of plant and crop stress, second edition[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [20] 史海滨. 盐渍化土壤水热盐迁移与节水灌溉理论研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.
- [21] 王自奎. 小麦/玉米间作复合群体光能和水传输利用试验与模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- WANG Zikui. Light and water transmission and utilization in wheat/maize strip intercropping system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

- [22] 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.
XUE Liang, ZHOU Chunju, LEI Yangli, et al. Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3):91-94. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):261-270.
LI Xianyue, DING Zongjiang, YAN Jianwen, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):261-270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.031. (in Chinese)
- [24] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19):3839-3849.
LÜ Lihua, DONG Zhiqiang, ZHANG Jingting, et al. Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19):3839-3849. (in Chinese)
- [25] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22):111-120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22):111-120. (in Chinese)
- [26] WANG Yanzhe, ZHANG Xiying, LIU Xiuwei, et al. The effects of nitrogen supply and water regime on instantaneous WUE, time-integrated WUE and carbon isotope discrimination in winter wheat[J]. Field Crops Research, 2013, 144(1):236-244.
- [27] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):281-291.
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Effect of limited irrigation and nitrogen rate on radiation utilization efficiency and yield of maize in salinization farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):281-291. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.034. (in Chinese)
- [28] 石玉, 于振文, 何建宁, 等. 不同测墒补灌水平对小麦水氮利用及土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2):445-452.
SHI Yu, YU Zhenwen, HE Jianning, et al. Effects of supplemental irrigation by monitoring soil moisture on the water-nitrogen utilization of wheat and soil NO_3^- -N leaching[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2):445-452. (in Chinese)
- [29] 刘世全, 曹红霞, 张建青, 等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7):1362-1371.
LIU Shiquan, CAO Hongxia, ZHANG Jianqing, et al. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of small pumpkin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7):1362-1371. (in Chinese)
- [30] 李金彪. 物料掺拌对滨海重度盐渍土理化性质及植物生长的影响[D]. 南京:南京林业大学, 2015.
LI Jinbiao. Material mixed influence on severe coastal saline soil physicochemical properties and the growth of plants[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [31] TAYLOR S H, LONG S P. Slow induction of photosynthesis on shade to sun transitions in wheat may cost at least 21% of productivity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2017, 372(1730):20160543.