

土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响

曾文治, 徐 驰, 黄介生*, 伍靖伟, 高 真

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 为了研究盐分和氮素交互作用对葵花生长的影响, 采用双因素随机区组设计在内蒙古河套灌区义长试验站开展微区试验, 观测指标包括葵花的出苗率、成熟期株高、叶面积、地上部分干物质量、吸氮量和产量等。试验结果表明土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数是影响葵花生长的主要限制因素, 将土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数由 <0.25% (S_1) 增加至 1% 以上 (S_4) 能够使不同施氮水平下葵花出苗率、株高、叶面积、干物质量和产量的均值分别降低 72.0%、40.0%、58.5%、41.7% 和 76.41%, 并且在不同的施氮量水平下, 葵花的出苗率均与土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数呈线性下降的关系。当土壤盐分水平为 >0.5%~1.0% (S_3) 时, 将施氮量水平由 N_1 (90 kg/hm^2) 增加至 N_3 (180 kg/hm^2) 能够使葵花出苗率、株高、叶面积、干物质量和产量分别增加 16.7%、35.6%、39.1%、69.9% 和 80.0%; 当土壤盐分水平大于 1.0% (S_4) 时, 将施氮量水平由 N_1 增加至 N_3 能够使上述 5 项指标分别增加 45.4%、20.5%、47.4%、42.7% 和 76.2%。但是当土壤初始盐分质量分数小于 0.5% 时, 增施氮肥对上述 5 项指标的影响效果降低。此外, 尽管葵花的吸氮量随氮肥施入量的增加而增加, 但是葵花对氮肥的利用效率还与受到土壤盐分水平的影响, 当土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数小于 0.5% 时, 葵花对氮肥的利用率随施氮量的增加而降低, 而当土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数大于 0.5% 时, 增施氮肥有助于提高葵花对氮肥的利用率。综合考虑收益、环境影响以及农业灌溉措施等因素, 建议适合河套灌区的合理施氮水平为 135 kg/hm^2 。

关键词: 土壤; 盐分; 灌溉; 交互作用; 施氮量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.012

中图分类号: S274.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0086-09

曾文治, 徐 驰, 黄介生, 等. 土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 86-94.

Zeng Wenzhi, Xu Chi, Huang Jiesheng, et al. Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 86-94. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤盐渍化是困扰干旱半干旱地区作物生长和农业发展的重要问题, 一直以来受到人们的广泛关注^[1-3], 统计数据表明, 全球有超过 15 亿 hm^2 的土地存在不同程度的盐渍化问题^[4-5]。土壤中较大的盐分浓度能够通过改变渗透势影响作物对水分和养分的吸收, 从而抑制作物生长^[6]; 此外, 盐渍土中某些特定离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 等) 的浓度过高还会对作物产生毒害作用^[7]。已有的研究表明, 施加氮肥能够缓解盐分对作物生长的有害影响, 但是这

取决于作物的种类, 土壤盐分水平和其他环境因素的影响^[8-9]。Okusanya 和 Ungar^[10]发现盐生植物在氮素亏缺的高盐土壤中对增施氮肥的响应与在氮素亏缺的低盐土壤中的普通植物是相似的; Homaee 等^[11]认为玉米和棉花的干物质量随着土壤盐分的增加而降低, 随着氮肥施用量的增加而增加。

由此可知, 一方面现有的关于盐分和氮素交互作用的研究多开展于土壤氮素亏缺地区, 因此增施氮肥能够显著提高这些地区的玉米、小麦和棉花的产量^[12], 而在这些研究中, 当土壤受盐害程度较轻时, 盲目增施氮肥可能造成浪费, 但是当土壤盐分含量较高时, 少量增施氮肥可能对作物生长的促进作用并不明显^[13]; 另一方面, 过量施用氮肥又有可能加重土壤的盐渍化并且增加土壤盐分对作物生长的抑制作用^[14]。此外, 由于盐分对作物生长的抑制导致作物对氮素的吸收降低, 从而增加了氮素的潜在淋失量, 可能对地下水环境造成污染^[15]。因此, 合理施用氮肥对盐渍土地区增加作物产量和减小土壤和地下水环境的退化有着重要的作用。本文针对内蒙古河套灌区盐渍化土壤中盐分与氮素交

收稿日期: 2013-12-12 修订日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于作物生长模拟的盐渍农田水肥生产函数研究”(51379151), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012206020206)。

作者简介: 曾文治(1989-), 男, 博士生, 主要研究方向为水土资源高效利用。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: zengwenzhi1989@126.com。

※通信作者: 黄介生(1962-)男, 教授, 主要从事水土资源高效利用研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: jshuanga@public.wh.hb.cn

互作用对作物生长的影响问题，开展田间微区试验，通过定量分析盐分与氮素对作物各生长指标的影响，得出不同盐分水平下的最优施氮量，旨在为盐渍化地区高效合理施肥提供借鉴。

1 材料与方 法

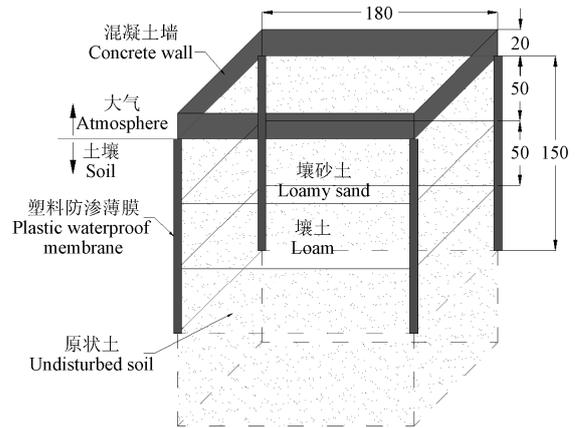
1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区地处 N40°19'~41°18'，E106°20'~109°19'，年降水量为 139~222 mm，且集中在 6—8 月间，年蒸发量高达 2 200~2 400 mm，蒸降比在 10 以上。强烈的蒸发使得地下水以及土壤水不断的向上运移，最终导致土壤水分蒸发后，所携带的盐分在土壤表层聚集。因此河套灌区的土壤盐碱化问题非常严重。研究表明，几乎一半的耕地受到盐碱化的威胁^[16-17]。在 1987 年到 1997 年间，灌区土壤年平均盐分累积量高达 3 000 kg/hm²^[18]。

1.2 试验设计

田间试验于 2012 年 3 月至 10 月在河套灌区义长试验站开展，具体而言，选择了一块约 300 m² 的荒地，设置了 36 个观测微区和一个地下水位观测井，每个观测微区的断面尺寸为 1.8 m×1.8 m，四周距离地表 0~1.5 m，用不透水塑料膜包裹，以防

止水分的侧向流动，下不封底，内填充原状土壤(图 1)。试验开始前(2012 年 5 月)，对每个观测微区 0~100 cm 土层进行取样分析(表 1)，并参照 FAO 对盐渍土壤的分等分级原则^[19]，通过人为添加盐分的方式(盐分来源为研究区地表积盐)将各观测微区 0~20 cm 土层的初始盐分质量分数(g/100g，以百分数计)分为 4 类：S₁：<0.25%；S₂：0.25%~0.5%；S₃：>0.5%~1.0%；S₄：>1.0%。



注：单位 Unit: cm。

图 1 观测微区示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment plot

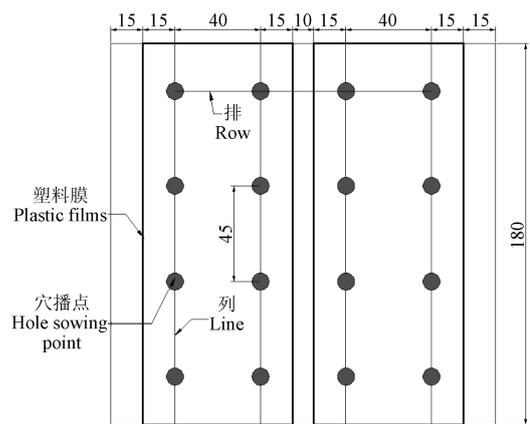
表 1 土壤基本理化性质分析

Table 1 Physical properties of soil profile at YiChang experimental site

土壤分层 Soil depth/cm	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	颗粒组成 Soil particle gradation/%			土壤质地 Soil texture	有机质质量分数 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
		黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand			
0~20	1.35	6.43	19.02	74.55	壤砂土 Loamy sand		
>20~50	1.44	6.45	13.47	80.08	壤砂土 Loamy sand	5.51	8.43
>50~100	1.51	15.18	47.69	37.13	壤土 Loam		

采用双因素随机区组设计，研究因素包括各微区 0~20 cm 土层的初始盐分质量分数和氮肥施用量，其中 0~20 cm 土层的初始盐分质量分数设置 4 个水平，氮肥施用量设置 3 个水平(90、135、180 kg/hm²，以纯 N 计)，3 次重复。所有肥料均以基肥形式一次性开沟均匀施入各观测微区，除了氮肥外，各微区的磷肥(78.59 kg/hm²，以纯 P 计)和钾肥(62.23 kg/hm²，以纯 K 计)的施入量保持一致，施肥种类分别为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。

研究作物选择食葵(LD5009)，覆膜种植，播种时间为 2012 年 6 月 7 日，穴播，每个观测微区播种 16 穴(图 2)，每穴 3 株，间苗后每穴留 1 株。由于各观测微区已经在 2012 年 4 月进行了灌溉，灌溉水量约为 1800 m³/hm²，因此葵花种植后全生育期不进行灌溉，其余耕作措施如除草，防虫等与当地农业耕种经验一致。



注：单位 Unit: cm。

图 2 观测微区播种示意图

Fig.2 Schematic diagram of sunflower sowing

1.3 试验数据收集

试验过程中观测葵花出苗率、叶面积、株高、地上部分干物质、籽粒产量、吸氮量(植株地上部

分全氮含量)等指标。具体而言,在葵花播种后 14 d 内,每天观测并记录各微区的幼苗数量,出苗率通过播种后第 14 天的出苗数量与总播种数的比值计算获得;葵花的叶面积采用 YMJ-C 便携式叶面积仪测量(浙江托普仪器公司);株高通过卷尺测量;葵花成熟后,将各观测微区的葵花地上部分在 70℃ 烘干至质量恒定后称量并记录各观测微区的葵花风干籽粒质量;将葵花地上部分烘干、磨碎过 0.5 mm 筛后根据半微量蒸馏法测量其吸氮量^[20],采用葵花籽粒产量与施氮量的比值作为各微区氮肥利用率的评价指标^[21-22]。

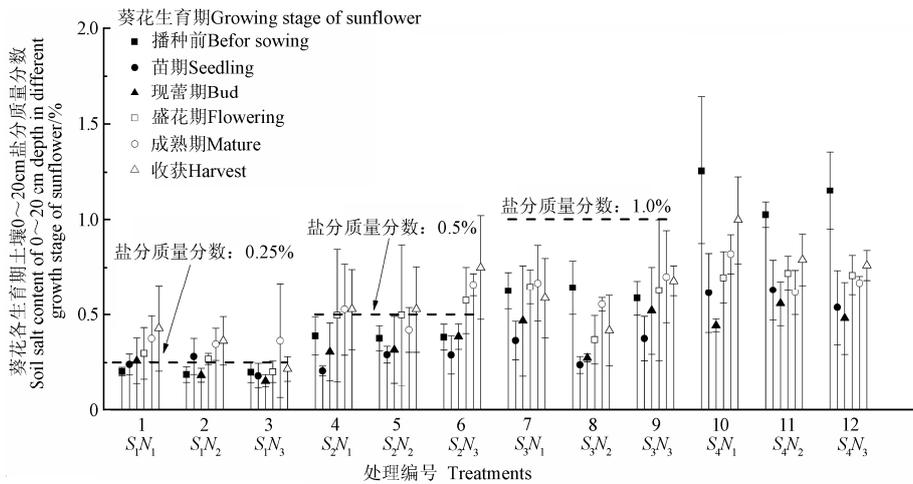
1.4 试验数据处理

利用 SPSS 软件对各研究因素以及其交互作用对葵花生长的影响进行方差分析,通过 LSD 法对各处理之间的差异进行比较^[23]。

2 结果与讨论

2.1 土壤 0~20 cm 盐分随时间变化规律

葵花全生育期内,尽管没有进行人为的灌溉,并且利用地膜减少土壤水分的蒸发,但是在蒸发和降水的作用下,土壤中不同深度的水分和盐分不断地发生变化(图 3)。



注: S₁、S₂、S₃、S₄ 分别表示土壤 0~20 cm 初始盐分水平为 <0.25%、0.25%~0.5%、>0.5%~1.0%、>1.0%; N₁、N₂、N₃ 分别表示施氮量水平为 90、135、180 kg/hm²。
 Note: S₁, S₂, S₃, and S₄ indicate the initial soil salt content of 0~20 cm depth were <0.25%, 0.25%~0.5%, >0.5%~1.0%, and >1.0% respectively; N₁, N₂, N₃ indicate the nitrogen application rates were 90, 135 and 180 kg/hm² respectively.

图 3 葵花生育期土壤 0~20 cm 盐分含量
 Fig.3 Salt content changes of 0-20 cm depth during sunflower's growing period

从图 3 中可以看出,在葵花的花期和成熟期,部分处理中土壤 0~20 cm 的盐分含量并非满足初始设定的盐分变化范围,因此需要进一步讨论将土壤 0~20 cm 初始盐分含量作为研究因素的可行性。一方面,已有的研究表明盐渍农田葵花的根系主要集中于 0~20 cm 土层^[24],在播种前,通过一定的农业耕作措施能够有效的控制 0~20 cm 土层盐分含量,进而创造出利于葵花萌发的土壤环境。另一方面,由于葵花全生育期没有进行人为的灌溉,并且所有观测微区均采用地膜覆盖以减少水分蒸发,可以认为所有观测微区在葵花全生育期的农业耕作措施都是相同的,因此土壤 0~20 cm 盐分的变化规律应该是一致的。在葵花各生育期的土壤取样分析表明,葵花各生育期 0~20 cm 土层的含盐量与播种前 0~20 cm 土层的初始盐分质量分数有着很好的相关关系,其 Pearson 相关系数 (R) 均在 0.72 以上(图 4)。基于以上分析,我们可以认为土壤 0~20 cm 初始

盐分质量分数能够作为分析盐分对葵花生长影响的主要指标之一。

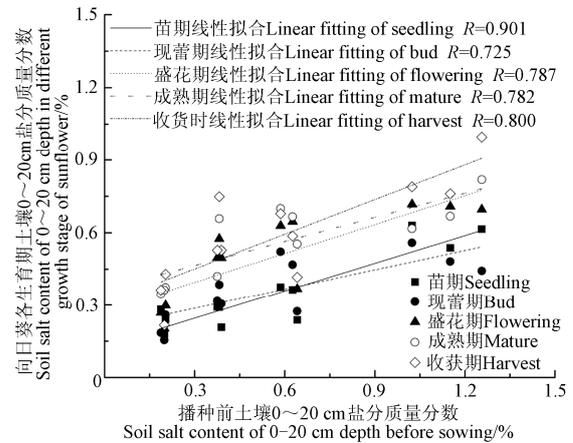


图 4 葵花各生育期土壤 0~20 cm 盐分含量与初始盐分含量的关系
 Fig.4 Relationship of 0-20 cm soil salt content between initial condition and ones in different growing periods of sunflower

2.2 葵花出苗率

SPSS 统计分析的结果表明，与施氮量相比，土壤 0~20 cm 含盐量对葵花出苗率有显著影响 ($P=0.0001$)，葵花出苗率随 0~20 cm 土层初始盐分质量分数的增加而降低，在盐分水平为 S_1 时，葵花能够获得最大的出苗率 (表 2)。在不同的施氮量水平下 ($N_1 \sim N_3$)，土壤盐分水平由 S_1 增加至 S_4 使葵花出苗率分别降低 75.6%、74.5%、66.0%，由此可知，增施氮肥能够在一定程度上缓解盐分对葵花出苗率的抑制作用。但从表 2 中还可以看出，除 S_4 外，其余各土壤盐分水平下的葵花最高出苗率均出现在中等施氮水平 (N_2) 下；而 S_4 处理中，高施氮水平 (N_3) 下的葵花出苗率较中等施氮水平 (N_2) 和低施氮水平 (N_1) 分别增加了 33.32% 和 45.42%。由此可知，尽管增施氮肥能够缓解盐分对葵花出苗的抑制作用，但是当土壤初始盐分水平较低时，这种缓解作用并不明显并且在初始盐分质量分数较低的土壤中过量施用氮肥可能会降低葵花

的出苗率，这与 Esmaili 等^[25]针对高粱的土壤蒸渗仪试验得到的结果是类似的。此外，LSD 多重比较的结果表明，在 4 种盐分水平下，氮肥对葵花出苗率的影响都不显著，表明土壤含盐量是影响葵花出苗率的主要因素。Wang 和 Shannon^[26]对大豆耐盐性的研究也表明，盐分能够通过降低渗透压来延缓或抑制大豆的出苗，并且土壤溶液的电导率等于 3 dS/m 为盐分影响大豆萌发的阈值，因此有学者认为，可以将出苗率作为表征作物对盐分的响应程度 (耐盐程度) 以及在盐渍环境下产量的重要指标^[27]；但是也有学者的研究表明在作物出苗率与耐盐程度之间没有明确的相关关系^[28]。我们的研究发现，在不同施氮水平下，葵花出苗率与 0~20 cm 土层的电导率均可以用线性关系拟合，并且在施氮水平为 N_1 、 N_2 和 N_3 时，葵花出苗率与 0~20 cm 土层的电导率的线性相关系数分别为 0.6874、0.7760 和 0.8025 (图 5)，这进一步说明了 0~20 cm 土层初始盐分质量分数对葵花出苗率的重要影响。

表 2 盐分和施氮水平对葵花出苗率的影响
Table 2 Effect of salinity and nitrogen fertilizer on percentage of sunflower emergence

盐分水平 Salinity levels	出苗率 Emergence/%			均值 Mean
	低施氮水平 N_1 (90kg·hm ⁻²)	中等施氮水平 N_2 (135kg·hm ⁻²)	高施氮水平 N_3 (180kg·hm ⁻²)	
S_1 (<0.25%)	93.8ab	97.9a	97.9a	96.5
S_2 (0.25%~0.5%)	91.7ab	91.7ab	91.7ab	91.7
S_3 (>0.5%~1.0%)	62.5c	83.3abc	72.9bc	72.9
S_4 (>1.0%)	22.9d	25.0d	33.3d	27.1
均值 Mean	67.7	74.5	74.0	

注：表中字母 a、b、c、d 为显著性水平 5% 时 LSD 多重比较的检验结果，表示处理间显著性差异 ($P < 0.05$)，下同。
Note: Symbols follow each number indicate the LSD multiple comparison results at 5% significant level ($P < 0.05$). The same as below.

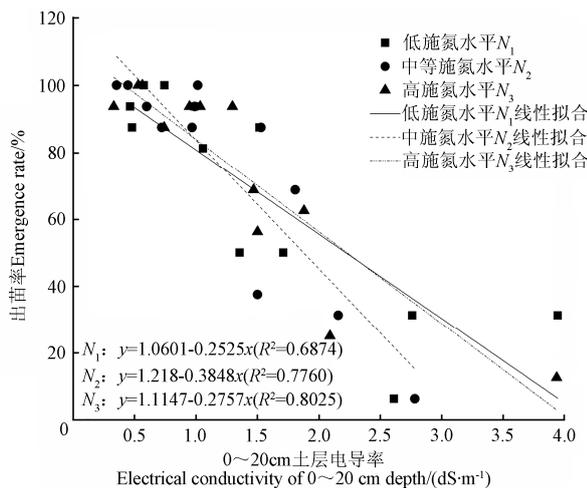


图 5 不同施氮水平下葵花出苗率与 0~20 cm 土层含盐量的关系

Fig.5 Relationship between soil salinity of 0-20 cm depth and emergency under different nitrogen levels

综合考虑盐分和施氮水平对葵花出苗率的影响，我们认为在盐分水平小于 1.0% 时，应采用中等

施氮水平 (N_2)；而在土壤含盐量过高 (S_4) 时，可以采用高施氮水平 (N_3) 来提高葵花的出苗率，Cechin 等^[29]在温室中针对氮肥施用量对葵花生长的影响研究也得到了类似的结论。

2.3 葵花成熟期株高、叶面积和地上部分干物质量

方差分析的结果表明，葵花成熟期的株高受到土壤 0~20 cm 土层盐分含量 ($P=0.0001$)、施氮量 ($P=0.0001$) 以及它们交互作用 ($P=0.0084$) 的影响。盐分影响方面，盐分水平为 S_2 、 S_3 和 S_4 中葵花株高的平均值分别较 S_1 降低了 4.30%，16.91%，40.03% (表 3)。施氮量方面，尽管葵花株高的均值随施氮量的增加而增加，但是在不同的盐分水平下，施氮量对葵花株高的影响程度不同。具体而言，当盐分水平为 S_1 、 S_2 和 S_3 时，施氮量水平从 N_2 (135 kg/hm²) 增加至 N_3 (180 kg/hm²)，葵花株高仅分别增加 1.67%，2.05%，0.48%，但是与 N_1 (90 kg/hm²) 相比，增幅均在 5% 以上 (表 3)。这说明在盐渍土地区，土壤含盐量是影响葵花株高的主要因素，而施氮量对株高的影响，随盐分水平

的不同而不同。当氮素匮乏时, 增施氮肥能够有效促进葵花生长, 但是当土壤氮素基本满足葵花生长要求时, 再增施氮肥对葵花生长促进作用便会降

低。陈伟平等^[13]在针对棉花的研究中, 得到了类似的规律。与此同时, 他们还发现过量增施氮肥会导致棉花株高的降低。

表 3 盐分和施氮量对葵花成熟期株高、叶面积和地上部分干物质质量的影响
Table 3 Effect of salinity and nitrogen on sunflower height, leaf area and above-ground dry weights

项目 Item	盐分水平 Salinity levels	施氮量水平 (以纯 N 计) Nitrogen application rate levels			均值 Mean
		低施氮水平 N_1 (90 kg·hm ⁻²)	中等施氮水平 N_2 (135 kg·hm ⁻²)	高施氮水平 N_3 (180 kg·hm ⁻²)	
株高 Plant height/cm	S_1 (<0.25%)	145.5abc	152.67a	155.2a	151.1
	S_2 (0.25%~0.5%)	138.2bc	146.3abc	149.3ab	144.6
	S_3 (>0.5%~1.0%)	101.7d	137.2c	137.8bc	125.6
	S_4 (>1.0%)	82.8f	89.2ef	99.8de	90.6
	均值 Mean	117.0	131.4	135.5	
叶面积 Leaf area/cm ²	S_1 (<0.25%)	8190.2ab	8218.5ab	9886.9a	8765.2
	S_2 (0.25%~0.5%)	8263.0ab	7972.6ab	8667.7ab	8301.1
	S_3 (>0.5%~1.0%)	4645.4cd	6746.5bc	6459.9bc	5950.6
	S_4 (>1.0%)	2690.6d	4246.4cd	3966.3cd	3634.4
	均值 Mean	5947.3	6796.0	7245.2	
地上部分干物质质量 Above-ground dry weights/(kg·hm ⁻²)	S_1 (<0.25%)	16000.5abcd	17996.0ab	16038.4abcd	16678.3
	S_2 (0.25%~0.5%)	20939.6a	15716.6abcd	13049.4abcde	16568.5
	S_3 (>0.5%~1.0%)	7297.3e	16652.7abc	12377.5bcde	12109.1
	S_4 (>1.0%)	8126.3de	9427.8cde	11597.2bcde	9717.1
	均值 Mean	13091.0	14923.3	13265.6	

与株高不同, 土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数对葵花叶面积 ($P=0.0001$) 和地上部分干物质 ($P=0.0123$) 的影响显著, 而施氮量和盐分与施氮量的交互作用对叶面积和干物质的影响并不显著。葵花成熟期的叶面积和地上部分干物质随土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数的增加而降低, 具体而言, 当盐分水平由 S_1 增加至 S_4 时, 葵花成熟期叶面积和地上部分干物质质量的均值分别降低了 58.54% 和 41.74% (表 3)。这主要是因为盐分胁迫下, 葵花的光合作用受到抑制, 从而影响了叶面积并且降低了干物质的产量。尽管施氮量对葵花成熟期叶面积和干物质的影响不显著, 增施氮肥仍然能够增加葵花成熟期的叶面积, 当施氮量从 N_1 增加至 N_3 时, 4 种盐分水平下葵花成熟期叶面积分别增加了 20.7%、4.9%、39.1% 和 47.4%, 这也说明在含盐量较高 (S_3 、 S_4) 的土壤中增施氮肥更有利于葵花叶面积的增加。葵花地上部分干物质方面, 当盐分水平为 S_1 时, 干物质峰值在施氮水平 N_2 处获得, 但与施氮水平 N_1 相比仅增加了 12.5%; 而当盐分水平为 S_3 时, 施氮水平 N_2 时的干物质较施氮水平 N_1 时增加了 128.2%, 这说明高盐土壤中增施氮肥能够有效增加葵花干物质质量。此外, 当盐分水平为 S_1 时, N_3 施氮水平下葵花干物质质量较 N_2 施氮水平降低了 10.9%; 当盐分水平为 S_2 时, 葵花干物质质量却随着施氮水平的增加而降低 (表 3)。这表明在盐渍土

地区, 氮肥的施用量应该和作物对氮素的需求量一致^[30], 过量施用氮肥会对作物的产量和品质都产生不好的影响^[31], 针对 *Capsicum annuum* 的研究表明在其苗期过量施氮导致了土壤的盐分增加并且降低了其最终产量^[32]。因此, 根据表 3 的结果, 我们建议在较低盐分水平下 (S_1 、 S_2) 采用低 (N_1) 或中等 (N_2) 施氮量, 而在较高盐分水平下 (S_3 、 S_4) 采用高施氮量 (N_3) 以获得较高的干物质质量。

2.4 葵花吸氮量与氮肥利用率

方差分析结果表明与施氮量相比, 0~20 cm 土层的初始盐分质量分数显著影响葵花对氮肥的吸收 ($P=0.0408$), 而葵花对氮肥的利用率 (NU_aE) 受到 0~20 cm 土层初始盐分质量分数 ($P=0.0001$)、氮肥施用量 ($P=0.0002$) 和两者交互作用 ($P=0.0038$) 的共同影响。增加土壤含盐量对葵花吸氮有抑制作用, 具体而言, 盐分水平 S_4 与 S_1 相比, 葵花吸氮量降低了 31.64%。这主要是因为土壤盐分对渗透势的影响和盐分离子自身的毒害作用造成了作物根系对氮素的吸收量降低^[9]。尽管与土壤含盐量相比, 氮肥施用量对葵花吸氮的影响不显著, 但是 4 种盐分水平下, 增施氮肥均能够促进葵花吸氮量的增加并且这种促进作用在盐分含量较高时表现的更加明显^[33]。当施氮量水平由 N_1 增加至 N_3 时, 4 种盐分水平下的葵花吸氮量分别增加了 20.80%、9.46%、65.75% 和 64.79% (表 4)。

表 4 盐分和施氮量对葵花吸氮量与氮素利用率的影响
Table 4 Effect of salinity and nitrogen on sunflower nitrogen uptake and nitrogen use efficiency

项目 Item	盐分水平 Salinity levels	施氮量水平 (以纯 N 计) Nitrogen application rate levels (N)			均值 Mean
		低施氮水平 N_1 (90kg·hm ⁻²)	中等施氮水平 N_2 (135kg·hm ⁻²)	高施氮水平 N_3 (180kg·hm ⁻²)	
葵花吸氮量 Nitrogen uptake/(kg·hm ⁻²)	S_1 (<0.25%)	55.9ab	59.8ab	67.6ab	61.1
	S_2 (0.25%~0.5%)	55.9ab	56.1ab	61.1ab	57.7
	S_3 (>0.5%~1.0%)	33.1b	52.0ab	54.9ab	46.7
	S_4 (>1.0%)	30.8b	43.7ab	58.0ab	41.8
	均值 Mean	43.9	52.9	58.6	
氮肥利用率 NU_aE Nitrogen use efficiency/(kg·kg ⁻¹)	S_1 (<0.25%)	66.0a	44.3b	33.5bc	47.9
	S_2 (0.25%~0.5%)	60.9a	42.8b	28.0c	43.9
	S_3 (>0.5%~1.0%)	31.9bc	32.1bc	28.7c	30.9
	S_4 (>1.0%)	8.2d	10.9d	11.3d	10.1
	均值 Mean	41.7	32.5	25.4	

氮肥利用率 (NU_aE) 为葵花产量与施氮量的比值, 是从经济性角度衡量作物对氮肥利用效率的指标^[34]。从表 4 中可以看出, 3 种施氮量水平下的氮肥利用率均随着土壤盐分盐量的增加而降低, 含盐量水平由 S_1 增加至 S_4 使得 3 种施氮量水平下的氮肥利用率分别降低了 87.61%、75.47%和 66.32%。而不同含盐量水平下, 增施氮肥对葵花氮肥利用率的影响不同, 当土壤含盐量水平为 S_1 和 S_2 时, NU_aE 随着施氮量的增加而减小, 但是当土壤盐分水平为 S_3 和 S_4 时, NU_aE 随着施氮量的增加表现出小幅上升的规律。这说明当盐分水平较低时, 应该将采用较低水平的施氮量, 而当盐分水平较高时, 可以采用中等或较高水平施氮量以增加葵花对氮肥的利用率。

2.5 葵花产量与经济性分析

为了分析不同土壤盐分水平下的最优施氮量, 定义净收益 (net economic profit, NEP) 的计算方法如式 (1) ~式 (3) 所示。

$$R=Y \times P \quad (1)$$

$$TC=NA \times NP \quad (2)$$

$$NEP=R-TC \quad (3)$$

式中: R 为毛收益, 元/hm²; Y 为葵花的产量, kg/hm²; P 为试验种植的葵花品种 (LD5009) 在当地的最低价格, 9.60 元/kg; NA 为施用肥料的质量, kg/hm²; NP 为施用肥料的单价, 元/kg; TC 为总费用, 元/hm²。在费用计算中只考虑施肥的费用, 每 50 kg 的尿素、磷酸二铵和硫酸钾在 2012 年的价格分别为 106.5、177.5 和 191.5 元。其他的费用如除草剂和杀虫剂等在各处理中均相同, 因此计算时将其忽略。

不同盐分和施氮量下葵花的产量与净收益如表 5 所示。从中可以看出, 葵花的产量随土壤初始盐分质量分数的增加显著降低 ($P=0.0001$), 在 3 种施氮水平下, 土壤盐分水平从 S_1 增加至 S_4 使得葵花产量分别降低了 87.61%, 75.46%和 66.32%。而当土壤初始盐分质量分数小于 0.5%时, 将氮肥施用量从 N_1 增加至 N_3 对葵花产量的增加影响很小, 但是当土壤初始盐分质量分数大于 0.5%时, 增施氮肥能够有效增加葵花产量, 具体而言, 土壤盐分水平为 S_3 和 S_4 时, 将施氮量水平由 N_1 增加至 N_3 可分别提高葵花产量 80.83%和 176.23%。

表 5 盐分和施氮量对葵花产量和净收益的影响
Table 5 Effect of salinity and nitrogen on sunflower yield and net economic profit

项目 Item	盐分水平 Salinity levels	施氮量水平 (以纯 N 计) Nitrogen application rate levels (N)			均值 Mean
		低施氮水平 N_1 (90kg·hm ⁻²)	中等施氮水平 N_2 (135kg·hm ⁻²)	高施氮水平 N_3 (180kg·hm ⁻²)	
葵花风干后籽粒产量 Air-dried seed yield of sunflower/(kg·hm ⁻²)	S_1 (<0.25%)	5935.64ab	5972.99ab	6030.59a	5979.74
	S_2 (0.25%~0.5%)	5480.47ab	5776.46ab	5548.25ab	5601.73
	S_3 (>0.5%~1.0%)	2871.31cd	4335.03bc	5169.45ab	4125.26
	S_4 (>1.0%)	735.24e	1465.57de	2030.98de	1410.60
	均值 Mean	3755.66	4387.51	4694.82	
净收益 NEP Net economic profit/(10 ⁴ 元·hm ⁻²)	S_1 (<0.25%)	5.49a	5.51a	5.54a	5.51
	S_2 (0.25%~0.5%)	5.06a	5.32a	4.60a	4.99
	S_3 (>0.5%~1.0%)	2.55bc	3.94ab	4.72a	3.73
	S_4 (>1.0%)	0.50d	1.18cd	1.70cd	1.13
	均值 Mean	3.40	3.99	4.14	

与产量类似, 葵花净收益的均值随盐分水平的增加而降低, 随施氮量的增加而增加。具体而言,

当盐分水平由 S_1 增加至 S_4 时, 净收益的均值降低 79.5%而将施氮量由 N_1 增加至 N_3 能够增加净收益

的均值 21.8%。但是当盐分水平为 S_1 时, 将施氮量由 N_1 增加至 N_2 和 N_3 仅分别增加净收益的 0.4% 和 0.9%, 而当盐分水平为 S_4 时, 将施氮量由 N_1 增加至 N_2 和 N_3 可分别增加净收益的 136.0% 和 240.0%。这说明在含盐量较高的土壤中增施氮肥能够更加有效的增加净收益, 这与前文对干物质质量的分析结果是一致的。此外, 从表 5 中还发现, 在 N_3 施氮水平下, 尽管盐分水平 S_2 下的葵花籽粒产量 (5548.3 kg/hm^2) 高于盐分水平 S_3 (5169.5 kg/hm^2), 但是盐分水平 S_2 下的净收益却较盐分水平 S_3 下降了 2.5%, 这也进一步说明在较低含盐量下 (S_1 、 S_2) 大量施用氮肥 (N_3) 是不经济的, 这与 Rostamza 等^[35] 针对 *Pennisetum americanum* L. 的研究结论一致。

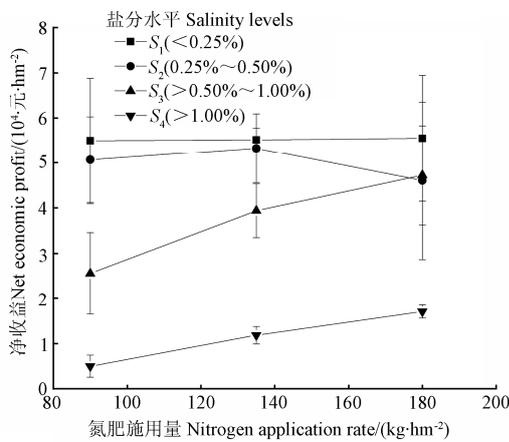


图 6 不同盐分和施氮量水平下葵花净收益

Fig.6 Net economic profit in different soil salinity levels vary from nitrogen application rates

为了从收益角度确定最优施氮量, 将不同盐分和施氮量水平下的净收益绘于图 6。从中可以看出, 盐分水平为 S_1 时, 3 种施氮水平下的收益值相差很小, 而盐分水平分别为 S_2 、 S_3 、 S_4 时的最大收益值分别在施氮量水平 N_2 、 N_3 、 N_3 处获得。考虑到高施氮量对环境的负面影响^[36], 我们建议在盐分水平小于 0.5% 时 (S_1 、 S_2), 选择中等施氮水平 (N_2) 或低施氮水平 (N_1), 而在盐分水平大于 0.5% 时 (S_3 、 S_4), 可以考虑采用高施氮水平 (N_3)。此外, 由于河套灌区多采用大水漫灌的方式淋洗土壤盐分, 并且多数耕地的盐分水平小于 0.5%^[37], 因此综合考虑经济、环境因素和当地实际, 我们建议河套灌区葵花地的氮肥施用量为 135 kg/hm^2 。

3 结论

通过微区试验, 研究了土壤 0~20 cm 含盐量和施氮量对葵花生长的影响规律, 得到以下结论:

1) 土壤 0~20 cm 初始盐分质量分数对葵花的出苗率, 成熟期株高, 叶面积和产量有着明显的抑

制作用, 与氮肥施用量相比, 土壤初始盐分质量分数是葵花生长的主要影响因素。土壤盐分水平由 S_1 (0~0.25%) 增加至 S_4 (>1.0%) 使不同施氮水平下葵花出苗率、株高、叶面积和产量的均值分别降低 71.95%、40.04%、58.54% 和 76.41%。

2) 增施氮肥能够在一定程度上缓解盐分对葵花生长的不利影响, 但是这种缓解作用随着土壤含盐量的不同而不同: 当土壤盐分水平小于 0.5% 时, 增加氮肥施用量对葵花出苗率、株高、叶面积和干物质质量的促进作用并不明显; 当土壤盐分水平大于 0.5% 时, 葵花的出苗率、株高、叶面积和干物质质量随着氮肥施用量的增加而增加。

3) 葵花的吸氮量随氮肥施入量的增加而增加, 随土壤盐分含量的增加而降低; 当土壤盐分水平小于 0.5% 时, 葵花对氮肥的利用率随施氮量的增加而降低, 而当土壤盐分水平大于 0.5% 时, 增施氮肥有助于提高葵花对氮肥的利用率。

综合考虑经济、环境和当地灌溉方式等因素, 建议适合河套灌区的合理施氮水平为 135 kg/hm^2 。

[参 考 文 献]

- [1] 田德龙, 史海滨, 王长生, 等. 盐渍化土壤向日葵水-肥耦合试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 100-104.
Tian Delong, Shi Haibin, Wang Changsheng, et al. Coupling effect of soil water and fertilizer on sunflower in saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 100-104. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈亚新, 魏占民, 史海滨, 等. 作物-水-盐的联合胁迫与响应模型的研究评估[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 1-6.
Chen Yaxin, Wei Zhanmin, Shi Haibin, et al. Evaluation of crop-water-salt stress and response model researches[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31-35.
Li Liang, Shi Haibin, Jia Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 31-35. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yuan J F, Feng G, Ma H Y, et al. Effect of nitrate on root development and nitrogen uptake of suaeda physophora under NaCl salinity[J]. Pedosphere, 2010, 20(4): 536-544.
- [5] Al-khateeb S A. Effect of salinity and temperature on germination, growth and ion relations of Panicum turgidum Forssk[J]. Bioresource Technol, 2006, 97(2): 292-298.

- [6] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2008, 59: 651—688.
- [7] Grattan C M G S R. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1992, 38(4): 275—300.
- [8] Tuna A L, Kayab C, Ashraf M, et al. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress[J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 59(2): 173—178.
- [9] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: Some new advances[J]. *Crit Rev Plant Sci*, 2002, 21(1): 1—30.
- [10] Okusanya O T, Ungar I A. The growth and mineral composition of three species of *Spergularia* as affected by salinity and nutrients as high salinity[J]. *Am J Bot*, 1984, 71(3): 439—447.
- [11] Homaee M, Feddes R A, Dirksen C. A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(6): 1764—1772.
- [12] Soliman M S, Shalabi H G, Campbell W F. Interaction of salinity, nitrogen and phosphorous fertilization on wheat[J]. *J Plant Nutr*, 1994, 17(7): 1163—1173.
- [13] Chen W P, Hou Z A, Wu L S, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment[J]. *Plant Soil*, 2010, 326(1/2): 61—73.
- [14] Ceccoli G, Senn M E, Bustos D, et al. Genetic variability for responses to short- and long-term salt stress in vegetative sunflower plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 882—890.
- [15] Katerji N, Mastroianni M, Lahmer F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance[J]. *Eur J Agron*, 2012, 38: 1—9.
- [16] Zeng W Z, Xu C, Wu J W, et al. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(1): 44—58.
- [17] Zeng W Z, Huang J S, Wu J W, et al. Modeling soil salt and nitrogen transport under different fertigation practices with Hydrus-1D[J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2013, 5(5): 592—599.
- [18] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜, 等. 内蒙古河套灌区秋浇对不同农田土壤盐分淋失的影响[J]. *农村生态环境*, 2003, 19(3): 31—34.
Feng Zhaozhong, Wang Xiaoke, Feng Zongwei, et al. Influence of autumn irrigation on soil salt leaching of different farmlands in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. *Rural Eco-envrion*, 2003, 19(3): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [19] Fao (1985) Chapter 7: Salty Soils. *Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation*[M]. Available: <http://www.fao.org/docrep/R4082E/r4082e08.htm>, 2013-01-10.
- [20] Pontes F V M, Carneiro M C, Vaitsman D S, et al. A simplified version of the total kjeldahl nitrogen method using an ammonia extraction ultrasound-assisted purge-and-trap system and ion chromatography for analyses of geological samples[J]. *Anal Chim Acta*, 2009, 632(2): 284—288.
- [21] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. *Plant Soil*, 1981, 58(1/2/3): 177—204.
- [22] Sowers K E, Pan W L, Miller B C, et al. Nitrogen use efficiency of spilt nitrogen applications in soft white winter wheat[J]. *Agronomie*, 1994, 86(6): 942—948.
- [23] Liu R X, Kuang J, Gong Q, et al. Principal component regression analysis with spss[J]. *Comput Meth Prog Bio*, 2003, 71(2): 141—147.
- [24] 胡守忠, 乔冬梅, 史海滨. 油料向日葵根系生态与生理特性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(6): 192—197.
Hu, Shouzhong, Qiao, Dongmei, Shi, Haibin. Analysis on root ecological and physiological characteristics of sunflower[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(6): 192—197. (in Chinese with English abstract)
- [25] Esmaili E, Kapourchal S A, Malakouti M J, et al. Interactive effect of salinity and two nitrogen fertilizers on growth and composition of sorghum[J]. *Plant Soil and Environment*, 2008, 54(12): 537—546.
- [26] Wang D, Shannon M C. Emergence seedling growth of soybean cultivars and maturity groups under salinity[J]. *Plant Soil*, 1999, 214(1/2): 117—124.
- [27] Foolad M R, Lin G Y, Chen F Q. Comparison of QTLs for seed germination under non-stress, cold stress and salt stress in tomato[J]. *Plant Breeding*, 1999, 118(2): 167—173.
- [28] Ashraf M, Sultana R. Combination effect of NaCl salinity and nitrogen form on mineral composition of sunflower plants[J]. *Biol Plantarum*, 2000, 43(4): 615—619.
- [29] Cechin I, De F Tima Fumis T. Effect of nitrogen supply on growth and photosynthesis of sunflower plants grown in the greenhouse[J]. *Plant Sci*, 2004, 166(5): 1379—1385.
- [30] Jafarinia M, Shariati M. Effects of salt stress on photosystem II of canola plant (*Barassica napus*, L.) probing by chlorophyll a fluorescence measurements[J]. *Iranian Journal of Science and Technology Transaction a-Science*, 2012, 36(A1): 71—76.
- [31] Antonopoulos V Z. Simulation of water and nitrogen balances of irrigated and fertilized corn-crop soil[J]. *J Irrig Drain E-Asce*, 2001, 127(2): 77—83.
- [32] Villa-castorena M, Ulery A L, Catalan-valencia E A, et al. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67(6): 1781—1789.
- [33] Silveira J A G, Melo A R B, Viegas R A, et al. Salinity-induced effects on nitrogen assimilation related to growth in cowpea plants[J]. *Environ Exp Bot*, 2001, 46(2): 171—179.
- [34] Vanlauwe B, Kihara J, Chivenge P, et al. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management[J]. *Plant Soil*, 2011, 339(1/2): 35—50.

- [35] Rostamza M, Chaichi M R, Jahansouz, et al. Forage quality, water use and nitrogen utilization efficiencies of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.) grown under different soil moisture and nitrogen levels[J]. *Agr Water Manage*, 2011, 98(10): 1607–1614.
- [36] Kanzari S, Hachicha M, Bouhlila R, et al. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (Bou Hajla, Kairouan): Salinization risk of soils and aquifers[J]. *Comput Electron Agr*, 2012, 86: 34–42.
- [37] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 853–858.
- Hao Fanghua, Sun Wen, Zeng Ayan, et al. Simulation of N transfer under different irrigation and fertilization scenarios in the Hetao irrigation area using HYDRUS-1D model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 853–858. (in Chinese with English abstract)

Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth

Zeng Wenzhi, Xu Chi, Huang Jiesheng*, Wu Jingwei, Gao Zhen

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: For understanding the interaction effect of salinity and nitrogen on sunflower growth, complete block design experiments were conducted in Hetao Irrigation District of China, and the observation index included sunflower emergency rate, plant height, leaf area, above-ground dry weights, nitrogen uptake, and yield. To be more specific, 14 days after sowing, we observed the number of sunflower seedlings daily, and their emergence rate was calculated by dividing the number of seedlings 14 days after sowing by the total seeds of sunflowers. Furthermore, the leaf area was measured by a portable leaf area meter (YMJ-C, TuoPu, China), and plant height was measured by tape. After the sunflowers were harvested, sunflower seeds were weighed after air-drying (moisture <8%), and then sieved to remove debris; two uniform plants from each lysimeter were manually uprooted at maturity for nitrogen uptake analysis and determination of biological yield. These plants were partitioned into flower disks, stems, leaves, seeds, and roots, were weighed after drying at 70°C to a constant weight, and the biological yield of each component was recorded. In order to determine nitrogen uptake, samples of each plant part were grinded and screened through a 0.5 mm sieve. Total nitrogen concentration was determined by the micro-Kjeldahl method, and the ratio between seed yield and nitrogen application was selected as the evaluation indicator for nitrogen use efficiency of each micro-plot. The experimental results indicated that soil salinity significantly affects sunflower growth, and that the soil salinity level of S₄ (>1%) could reduce 72.0% emergency rate, 40.0% plant height, 58.5% leaf area, and 76.4% yield related to the S₁(0-0.25%) salinity level. Furthermore, sunflower emergence has a negative linear relationship with soil salinity in different nitrogen application rates. A nitrogen fertilizer application could alleviate the adverse effects of salinity on sunflower growth to some extent. To be more specific, at the S₃ salinity level (0.5%-1.0%), increasing the nitrogen application rate from N₁(90 kg/hm²) to N₃(180 kg/hm²) could increase the emergence rate, plant height, leaf area, dry matter amount, and seed yield to 16.7%, 35.6%, 39.1%, 69.9%, and 80.0% respectively. Furthermore, when the salinity level was above 1.0%, these 5 indicators increased 45.4%, 20.5%, 47.4%, 42.7%, and 76.2% respectively. However, this relationship was not obvious when the soil salt content was smaller than 0.5%. In addition, although sunflower nitrogen uptake increased with nitrogen application, the nitrogen use efficiency (NU_aE) was also affected by the soil salinity level. More exactly, when the soil salt content was smaller than 0.5%, the NU_aE decreased with the nitrogen application, and the opposite phenomenon occurred when the soil salt content was larger than 0.5%. Moreover, taking economic profits, environment production, and irrigation schedule into consideration, we suggested the optimal nitrogen application rate for sunflower growth in the Hetao Irrigation District was 135 kg/hm².

Key words: soils; salts; irrigation; interaction; nitrogen application rate

(责任编辑: 刘丽英)