

灌溉施肥水平对盐渍化农田水盐分布及玉米产量的影响

蒋 静* 翟登攀 张超波

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要 水资源缺乏和过量施肥影响着干旱半干旱盐渍化地区农业的发展. 研究不同灌溉和施肥量对土壤水盐分布和青贮玉米产量的影响, 可为该区确定适宜的灌溉和施肥量提供依据. 试验于2015和2016年在大同盆地的盐渍化农田进行, 设3种灌溉水平: 土壤水分上限分别为田间持水率(θ_t)的100% (W_1)、90% (W_2)和80% (W_3), 根据各处理灌溉前的土壤平均实际含水率计算灌水量; 2015年设4种施肥水平: 900 (F_1)、750 (F_2)、600 (F_3)和450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_4), 2016年设 F_1 、 F_2 和 F_3 共3种. 试验用化肥为缓释复合肥, 总养分含量48%, 其中N:P₂O₅:K₂O的比例为30:12:6. 结果表明: 土壤表层电导率随施肥量的增加而增大, 施肥水平对平均电导率(EC)和含水率的影响在0~10 cm土层显著, 与 F_1 相比, F_2 的0~10 cm土层平均EC在2015年和2016年分别降低25.6%~42.7%和6.4%~7.7%. 20~80 cm土层的水分含量随施肥量的增加而降低, 与 F_1 相比, 2015年 F_2 、 F_3 和 F_4 处理20~80 cm土层平均土壤含水率分别增加5.9%、16.7%和16.7%, 2016年 F_2 和 F_3 分别增加13.3%和16.7%. 产量在两年中均表现为 F_1 和 F_2 高于 F_3 和 F_4 , W_3 低于 W_1 和 W_2 ; F_1 和 F_2 的产量差异不明显; 与 W_1 相比, W_2 的产量减少低于15%. 因此, 施复合肥600~750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (氮肥含量180~270 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 且灌溉水平为 W_1 和 W_2 时, 可以保证该地区盐渍化土壤种植玉米获得较高的产量, 并且不会造成根系层的盐分积累.

关键词 灌溉; 施肥量; 土壤水分; 电导率; 产量

Effects of irrigation and fertilizer levels on the distribution of water and salt in saline field and maize yield. JIANG Jing*, ZHAI Deng-pan, ZHANG Chao-bo (College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China).

Abstract: Agriculture development in arid and semi-arid saline areas is seriously affected by water resources scarcity and excessive fertilization. Understanding the effects of different irrigation and fertilization levels on soil water and salt distribution and silage maize yield would provide scientific basis for determining appropriate irrigation and fertilization amount. The experiment was carried out in a saline field of the Datong Basin in 2015 and 2016. There were three irrigation levels, with the upper limit of soil moisture being controlled at 100% (W_1), 90% (W_2) and 80% (W_3) of the field water capacity. Irrigation amount was calculated based on the average actual water content before irrigation of each treatment. There were four fertilization levels in 2015, 900 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_1), 750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_2), 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_3), and 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (F_4), and three levels in 2016 (F_1 , F_2 , and F_3). The total nutrient content of the slow-release compound fertilizer was 48%, with a 30:12:6 ratio of N:P₂O₅:K₂O. Results showed that the surface conductivity of soil increased with the increases of fertilizer application levels. The effects of fertilization on soil salinity in 0–10 cm was significant. Compared with F_1 , the average EC of F_2 in 0–10 cm was decreased by 25.6%–42.7% in 2015 and by 6.4%–7.7% in 2016, respectively. The water content in 20–80 cm decreased with

本文由国家自然科学基金项目(51309175)和山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放基金项目(2014001)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51309175) and Open Foundation of Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province (2014001).

2018-12-26 Received, 2019-03-20 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangjing@tyut.edu.cn

the increases of fertilizer application levels. Compared with F_1 , the average soil water content in 20–80 cm soil layer of F_2 , F_3 , and F_4 increased by 5.9%, 16.7% and 16.7% in 2015, and that of F_2 and F_3 increased by 13.3% and 16.7% in 2016, respectively. The yield of F_1 and F_2 was higher than that of F_3 and F_4 , and W_3 was lower than W_1 and W_2 in both years. There was no significant difference in yield between F_1 and F_2 . Compared with W_1 , decrease in yield of W_2 was less than 15%. Therefore, the application of compound fertilizer 600–750 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (nitrogen content 180–270 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and irrigation levels W_1 and W_2 were suggested to ensure high yield of forage maize in saline soil in this area, without salt accumulation in root zone.

Key words: irrigation; fertilizer amount; soil water; electrical conductivity; yield.

中国盐渍土总面积约 3600 万 hm^2 , 占全国可利用土地面积的 4.88%; 耕地中盐渍化面积达到 920.9 万 hm^2 , 占全国耕地面积的 6.62%^[1]. 改良、开发和利用盐渍化土地资源对保持农业可持续发展具有重要意义. 然而, 盐渍化农田传统的地面灌溉方法一直局限为大定额淋洗脱盐, 方法粗放, 灌溉生产效率大幅度降低^[2]. 节水灌溉对土壤水分胁迫和土壤盐分的动态平衡将产生影响, 进而影响作物生长及水分利用效率, 确定合理的灌溉量是维持盐碱地农田水土环境可持续发展的关键因素. 此外, 对于盐碱地, 施用氮肥可以缓解盐分对作物生长的抑制作用, 提高作物产量^[3–5]; 但同时, 氮肥与土壤中的钙、钾离子发生物理化学反应, 导致硝酸根离子及水溶性的盐分大量沉积, 土壤盐渍化程度往往也会因灌溉、施肥等而加剧, 作物对氮肥的吸收利用受到阻碍, 进而影响作物生长和产量^[6–8]. 水肥对作物产量的影响与土壤的盐渍化程度密切相关^[9–12]. 大同盆地是我国内陆干旱苏打型盐碱土的典型区域, 该地区盐碱地形成条件、形成过程和土壤盐分组成基本代表了我国内陆干旱盐碱区的基本情况^[13]. 该地区在盐碱地改良、高产栽培、滴灌、地膜覆盖等方面已进行了较多的研究^[14–15], 而在水肥调控对盐渍化农田土壤水盐环境影响方面的研究较少. 本研究通过青贮玉米田间灌溉试验, 分析不同灌溉量和施肥量对盐渍化农田土壤盐分、水分及玉米产量的影响, 以期为该区域确定合理的灌溉和施肥量提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年和 2016 年 5—9 月在山西省农业科学院农业环境与资源研究所盐碱地改良试验示范基地进行, 该基地位于山西省朔州市怀仁县毛家皂镇, 地处大同盆地中部, 为典型的盐碱地分布地区, 位于 39°54′ N, 113°15′ E, 海拔 1015 m. 日均气温 7.3 $^{\circ}\text{C}$, 平均无霜期 150 d 左右, 年均日照时数

2800 h, 2015 年和 2016 年试验期间降水量分别为 165.4 和 215.6 mm, 降雨量具体分布见图 1, 地下水位埋深达 10 m 左右.

供试土壤主要为壤土, 容重 1.65 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 田间持水率 32% (体积含水率), 0~100 cm 土体各土层土壤基本理化性质见表 1.

1.2 试验设计

供试玉米品种为‘雅玉青贮 8 号’, 覆膜平作种植, 2015 年和 2016 年播种日期分别为 5 月 29 日和 5 月 10 日, 收获日期分别为 9 月 26 日和 9 月 10 日, 株距为 28 cm, 行距为 60 cm. 试验考虑灌溉和施肥量两种因素, 共设 3 种灌溉水平 W_1 、 W_2 、 W_3 , 土壤水分上限分别为田间持水率的 100%、90% 和 80%, 为尽量使各处理灌水时间相同, 灌水量根据灌水前各处理实际含水率平均值和水分上限差值计算, 拔节期计划湿润层深度为 80 cm, 其他生育期为 100 cm.

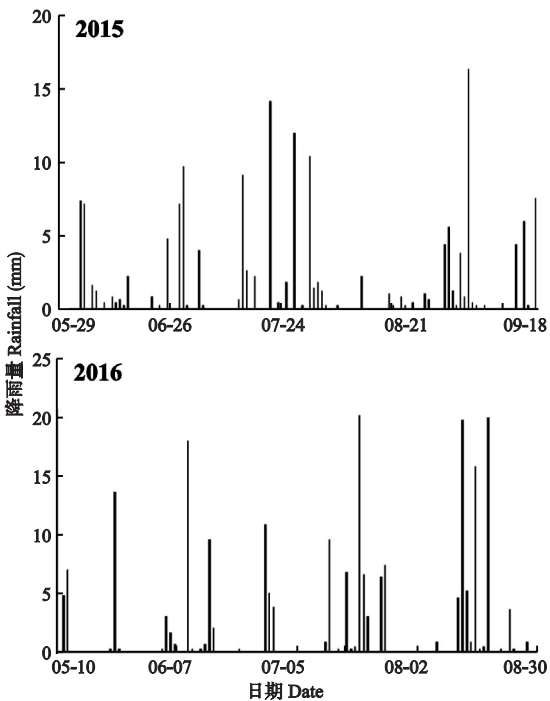


图 1 2015 和 2016 年降雨量分布
Fig.1 Rainfall distribution in 2015 and 2016.

表 1 0~100 cm 土层土壤理化性质
Table 1 Physical and chemical properties in the soil profile of 0~100 cm

土层深度 Soil depth (cm)	各级颗粒占比 Particle percent (%)			有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g·kg ⁻¹)	电导率 EC _{1:5} (dS·m ⁻¹)	pH
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand						
0~20	10.1	34.7	55.2	11.63	0.75	0.34	14.75	7.65	7.76
20~40	11.4	34.7	53.9	13.49	0.57	0.35	14.20	5.07	7.84
40~60	11.9	34.4	53.7	8.46	0.30	0.31	14.12	5.25	8.03
60~80	12.9	40.5	46.6	5.67	0.22	0.41	14.54	5.39	8.58
80~100	8.7	38.8	52.5	5.67	0.22	0.41	14.54	5.40	8.83

表 2 2015—2016 年玉米灌溉制度
Table 2 Irrigation schedule for maize in 2015–2016

处理 Treatment	灌水定额 Irrigation amount (mm)							灌溉定额 Irrigation norm (mm)	
	2015				2016			2015	2016
	06-25	07-12	08-11	09-07	06-09	07-21	08-29		
W ₁	128	160	120	145	96	164	154	553	414
W ₂	100	128	73	113	70	132	122	414	324
W ₃	80	96	40	88	45	100	90	304	235

两年试验春季播种前灌水造墒,灌水定额为 120 m³·a⁻¹.具体灌水时间和灌水量见表 2.结合当地习惯,试验用化肥为缓释复合肥,总养分含量 48%,其中 N:P₂O₅:K₂O 为 30:12:6,2015 年设 4 种施肥水平,分别为 F₁(900 kg·hm⁻²)、F₂(750 kg·hm⁻²)、F₃(600 kg·hm⁻²)、F₄(450 kg·hm⁻²),分别代表化肥普施量的 1.2、1.0、0.8 和 0.6 倍,4 种施肥水平的施氮量分别为 270、225、180 和 135 kg·hm⁻²,全部作为底肥在翻地前撒施,2016 年仅设 F₁、F₂ 和 F₃ 3 种施肥处理.2015 年共计 12 个处理,2016 年共计 9 个处理,每个处理 3 组重复,随机布置.试验小区面积为 35 m²(长 7 m,宽 5 m),每个小区周围均设宽 1.0 m 的缓冲区,种植保护行.

灌溉用水由当地地下水直接抽取,电导率 EC_w 为 0.986 dS·m⁻¹(1.08 g·L⁻¹),利用水表控制水量,3 种水分处理的灌水量见表 2.试验过程中,各小区其他农艺技术措施与当地大田一致.

1.3 观测指标与测定方法

1.3.1 常规气象资料 气象数据由站内自动气象站(Weather Hawk, Campbell Scientific, USA)采集,包括最高气温、最低气温、风速、风向、相对湿度、太阳辐射和降雨量等.

1.3.2 土壤含水量和电导率测定 玉米播种前、收获后及作物生育期内利用土钻取土,深度分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,2015 年取土日期分别为 5 月 29 日(播

种)、6 月 18 日(苗期)、7 月 8 日(拔节)、7 月 29 日(孕穗)、8 月 20 日(抽穗)、9 月 15 日(成熟)和 9 月 26 日(收获),2016 年取土日期分别为 5 月 11 日(播种)、6 月 6 日(五叶)、6 月 28 日(拔节)、7 月 18 日(抽穗)、8 月 3 日(成熟)和 9 月 10 日(收获).一部分土样放入铝盒,采用烘干法测定土壤含水量;另外一部分土样风干、粉碎、过 2 mm 筛后,配制成土水比 1:5 的土壤浸提液,过滤后,利用 SG-3 型电导率仪(SG3-ELK742, Mettler-Toledo International Inc., Switzerland)测定电导率 EC.

1.3.3 青贮玉米产量 每小区取 15 m²,收获后取地上部分所有器官称鲜质量,换算为每公顷产量.

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析.采用双因素(two-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较(α=0.05).

2 结果与分析

2.1 不同灌溉和施肥处理对土壤盐分的影响

2.1.1 生育期平均土壤电导率的垂直分布 由图 2 可知,各处理 0~40 cm 土层 EC 高于 40~100 cm 土层,且在 0~40 cm 范围内越接近表层,EC 越大;而在 40~100 cm 范围内平均 EC 随土层深度的变化不明显.施肥量和灌溉量两种因素主要影响 0~40 cm 土层盐分的分布,40 cm 以下土层的 EC 基本在 0.5 dS·m⁻¹左右.

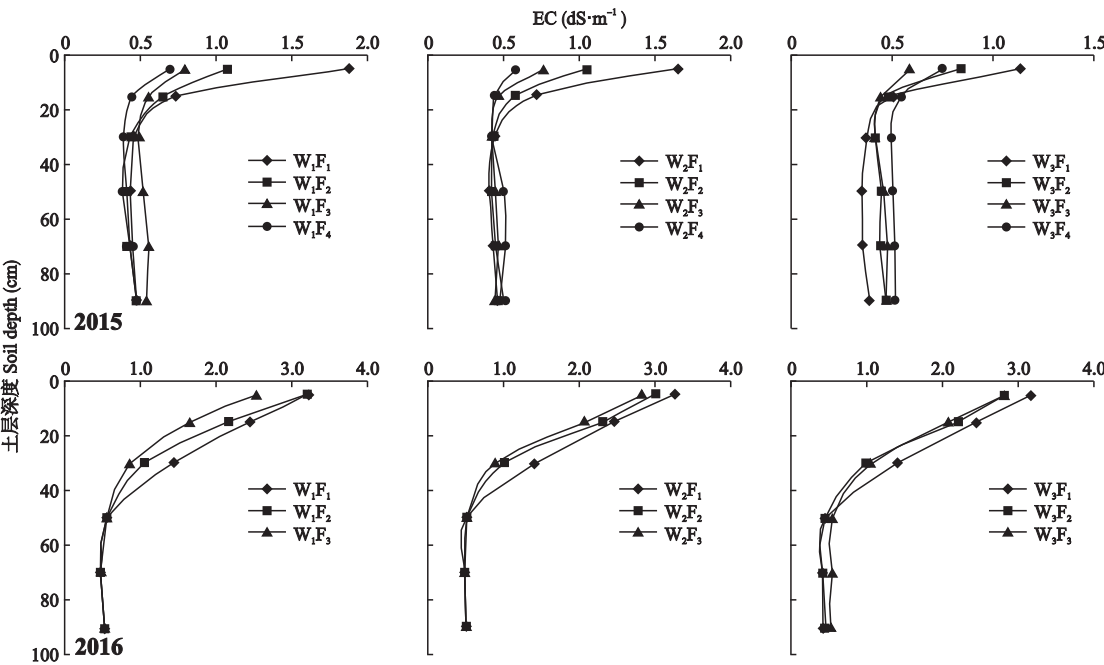


图 2 平均土壤电导率 (EC) 在剖面的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of average electrical conductivity (EC) in soil profile.

施肥量对平均 EC 的影响在 2015 年的 0~10、10~20、40~60 和 60~80 cm 及 2016 年的 80 cm 以上土层呈显著水平 (表 3). W_1 和 W_2 两种水平下, 2015 年 0~20 cm 土层和 2016 年 0~40 cm 土层的 EC 均随着施肥量的提高而明显增大, 其中各处理之间 0~10 cm 表层土壤的平均 EC 差异最为明显.

2015 年 W_1F_1 、 W_2F_1 和 W_3F_1 处理 0~10 cm 土层 EC 分别高达 1.89、1.75 和 1.13 $dS \cdot m^{-1}$, 2016 年达 3.24、3.27 和 3.15 $dS \cdot m^{-1}$, 明显高于相同灌水量下的其他施肥处理. 2015 年 W_1F_2 、 W_2F_2 和 W_3F_2 处理 0~10 cm 土层的 EC 与相同灌水量下的 F_1 处理相比, 分别降低了 42.7%、32.1% 和 25.6%, 2016 年则

表 3 土壤平均电导率和平均含水率的 ANOVA 方差分析结果
Table 3 Results of significance analysis according to ANOVA for soil average electrical conductivity and water content

项目 Item		平均电导率 Average electrical conductivity				平均含水率 Average water content			
		2015		2016		2015		2016	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
施肥 Fertilization	5	871.631	0.000	120.728	0.000	4.531	0.012	11.727	0.001
	15	54.001	0.000	147.945	0.000	0.846	0.483	19.083	0.000
	30	0.070	0.975	388.160	0.000	12.214	0.000	13.071	0.000
	50	6.446	0.002	3.608	0.048	72.364	0.000	45.167	0.000
	70	12.069	0.000	13.000	0.000	46.233	0.000	32.500	0.000
灌水 Irrigation	90	1.931	0.152	1.845	0.187	4.571	0.011	36.077	0.000
	5	140.207	0.000	5.509	0.014	0.219	0.805	5.182	0.017
	15	31.663	0.000	21.089	0.000	0.390	0.681	3.083	0.071
	30	1.461	0.252	5.574	0.013	0.167	0.847	1.500	0.250
	50	0.021	0.979	4.345	0.029	1.727	0.199	2.667	0.097
施肥×灌水 Fertilization× irriagtion	70	0.703	0.505	2.034	0.160	2.100	0.144	9.100	0.002
	90	1.289	0.294	2.728	0.092	0.048	0.954	13.231	0.000
	5	55.533	0.000	19.195	0.000	1.344	0.277	2.182	0.112
	15	16.945	0.000	12.008	0.000	1.431	0.244	0.458	0.765
	30	3.522	0.012	9.382	0.000	0.929	0.492	1.071	0.399
	50	2.373	0.061	3.469	0.029	2.818	0.032	6.667	0.002
	70	3.863	0.008	5.196	0.006	3.833	0.008	1.600	0.217
	90	2.596	0.044	1.840	0.165	2.714	0.037	2.500	0.079

分别降低 7.0%、7.7% 和 6.4%。2015 年, F_3 和 F_4 处理下 0~10 cm 土层的平均 EC 在 0.5~0.8 dS · m⁻¹, 与 F_1 相比分别降低 32.7%~62.8% 和 29.2%~69.2%; 2016 年, 与相同灌水量下的 F_1 相比, F_3 的平均 EC 降低 16.3%~32.0%。

灌水量对平均 EC 的影响在 2015 年的 0~10 和 10~20 cm 及 2016 年的 60 cm 以上土层呈显著水平(表 3)。 F_1 和 F_2 水平下, W_3 的各土层 EC 略高于 W_1 和 W_2 , 仅 W_3F_1 处理的 0~10 cm 土层平均 EC 明显低于 W_1F_1 处理, 其余处理在各土层的平均 EC 差异都低于 20%。在 F_3 和 F_4 水平下, W_3 的各土层平均 EC 则略

低于 W_1 和 W_2 , 3 种灌溉水平下平均 EC 小于 20%。

施肥和灌溉的交互作用对平均土壤电导率的影响仅在 2015 年的 40~60 cm 和 2016 年的 80~100 cm 土层差异不显著, 其余差异显著(表 3)。主要表现为在灌水量大时, 不同施肥量之间电导率的差异更明显。例如 2015 年, 与 F_1 相比, F_2 、 F_3 和 F_4 在 W_1 水平下 0~10 cm 土层的平均电导率分别降低了 39.6%、67.0% 和 74.2%, 在 W_3 水平下则分别降低了 44.7%、42.3% 和 41.1%。

2.1.2 不同生育期土壤盐分变化 图 3、图 4 为各处理播种、拔节、抽穗和收获期的土壤 EC 垂直分布,

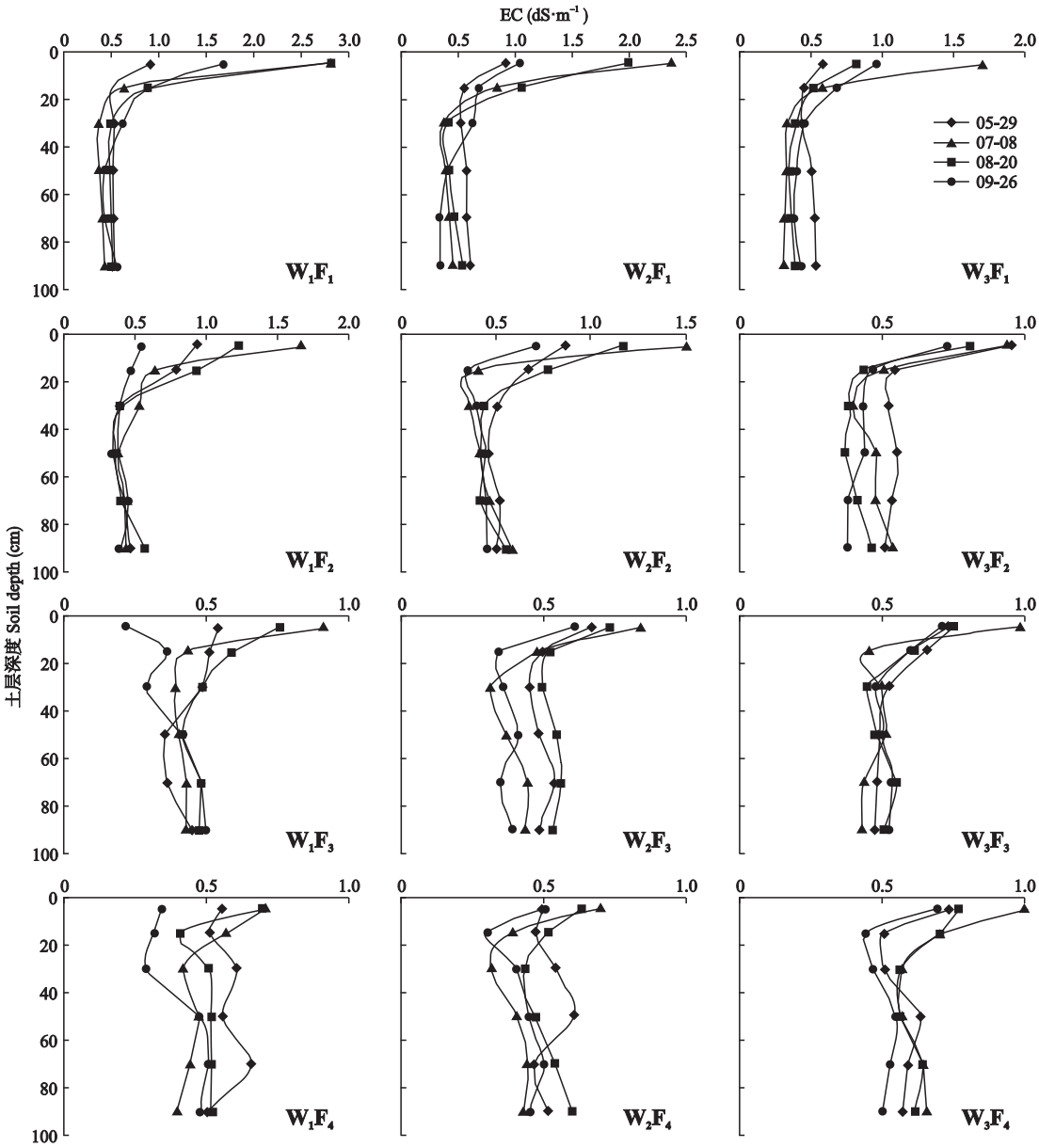


图 3 2015 年不同生育期土壤盐分分布

Fig.3 Soil salt distribution at different growth stages in 2015.

EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity. 下同 The same below.

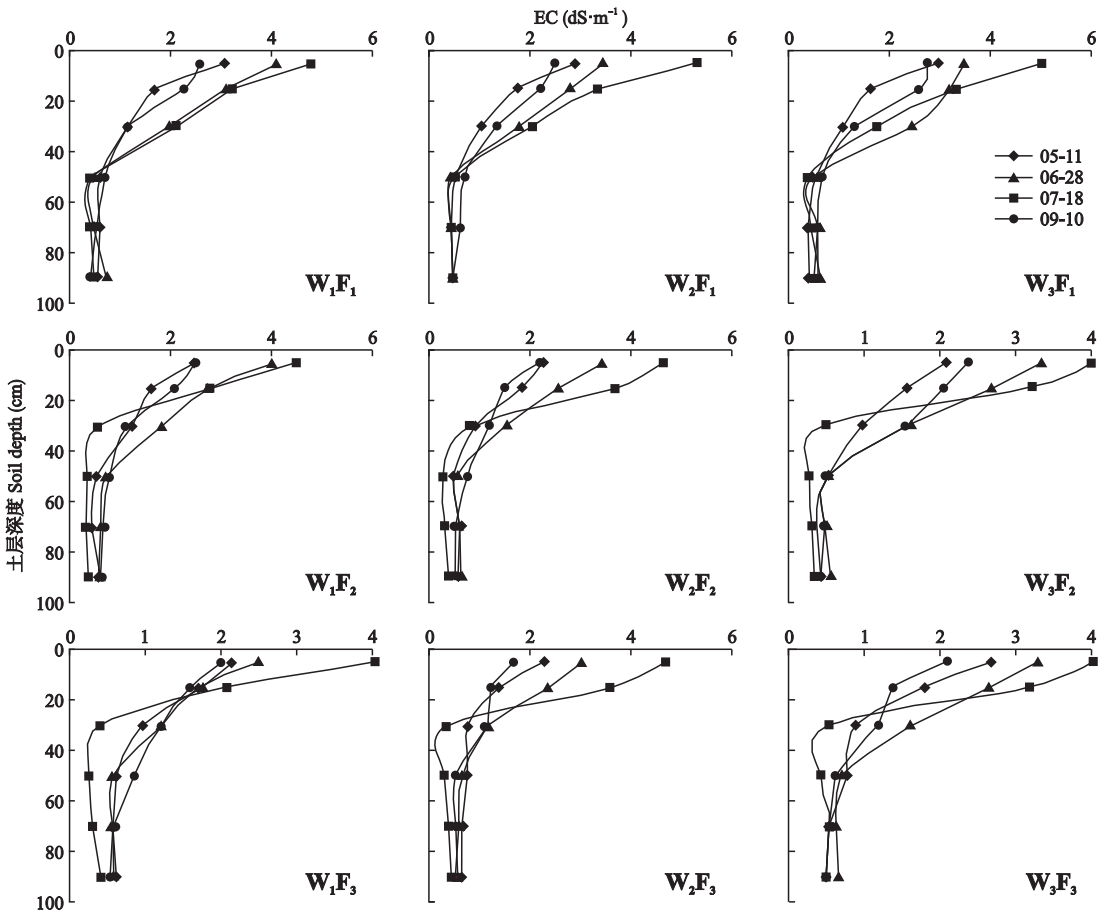


图 4 2016 年不同生育期土壤盐分分布
Fig.4 Soil salt distribution at different growth stages in 2016.

在整个生育期 EC 的变化主要集中于 40 cm 以上土层,40 cm 以下土层盐分的波动较小。

灌水量相同时,施肥量的增大使土壤电导率增大,且对拔节和抽穗期 0~10 cm 土层 EC 的影响明显.2015 年, W_1 时, F_1 和 F_2 处理 0~10 cm 土层 EC 在拔节期分别为 1.67 和 0.91 $dS \cdot m^{-1}$, 抽穗期分别为 1.24 和 0.76 $dS \cdot m^{-1}$; W_2 时, F_1 和 F_2 处理 0~10 cm 土层 EC 在拔节期分别为 1.50 和 0.83 $dS \cdot m^{-1}$, 抽穗期分别为 1.17 和 0.73 $dS \cdot m^{-1}$, F_3 和 F_4 处理各生育期 EC 均低于 1.0 $dS \cdot m^{-1}$; W_3 时, 0~10 cm 土层 EC 除 W_3F_1 处理拔节期高于 1.0 $dS \cdot m^{-1}$ 外, 其他处理各生育期 EC 均低于 1.0 $dS \cdot m^{-1}$; 2015 年, 与 F_1 相比, F_2 、 F_3 和 F_4 的 EC 在拔节期分别降低 35.4%~44.7%、42.3%~67.0% 和 41.1%~74.4%, 在抽穗期分别降低 0.9%~56.1%、9.2%~72.9% 和 5.9%~75.0% (图 3). 2016 年 W_1F_1 、 W_2F_1 、 W_1F_2 和 W_2F_2 处理 0~10 cm 拔节期的 EC 在 2~4 $dS \cdot m^{-1}$, 与 F_1 相比, F_2 和 F_3 的 EC 在拔节期分别降低 0.0%~2.4% 和 5.1%~39.1%; 抽穗期 0~10 cm 的 EC 在 4.0~6.0

$dS \cdot m^{-1}$, F_2 和 F_3 的 EC 分别降低 5.7%~19.3% 和 11.9%~19.7% (图 4)。

施肥量相同时, 不同灌溉水平的电导率仅在 2015 年拔节和抽穗期及 2016 年拔节期存在明显差异. 2015 年抽穗时, F_1 和 F_2 施肥水平下, 0~10 cm 的 EC 随灌水量的减少有所降低, 与 W_1 相比, W_2 和 W_3 的 0~10 cm 土层 EC 分别降低 4.7%~28.6% 和 34.2%~70.8%; F_3 和 F_4 施肥水平下, 不同灌水量处理间土壤 EC 的差异无明显规律 (图 3). 2016 年拔节期, F_1 和 F_3 时, 与 W_1 相比, W_2 和 W_3 的 0~10 cm 土层 EC 分别降低 4.8%~28.6% 和 34.2%~70.8%, F_3 施肥水平下, 不同灌水量处理间土壤 EC 无明显规律 (图 4)。

2.2 不同灌溉和施肥处理对土壤水分分布的影响
2.2.1 生育期平均土壤含水率的垂直分布 试验地土壤 0~100 cm 土层初始土壤含水率在 0.18 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 左右, 各处理初始土壤含水率差异不显著 (图 5). 不同施肥水平对平均土壤含水率的影响在 2015 年的 10~20 cm 土层不显著, 在其他土层显著,

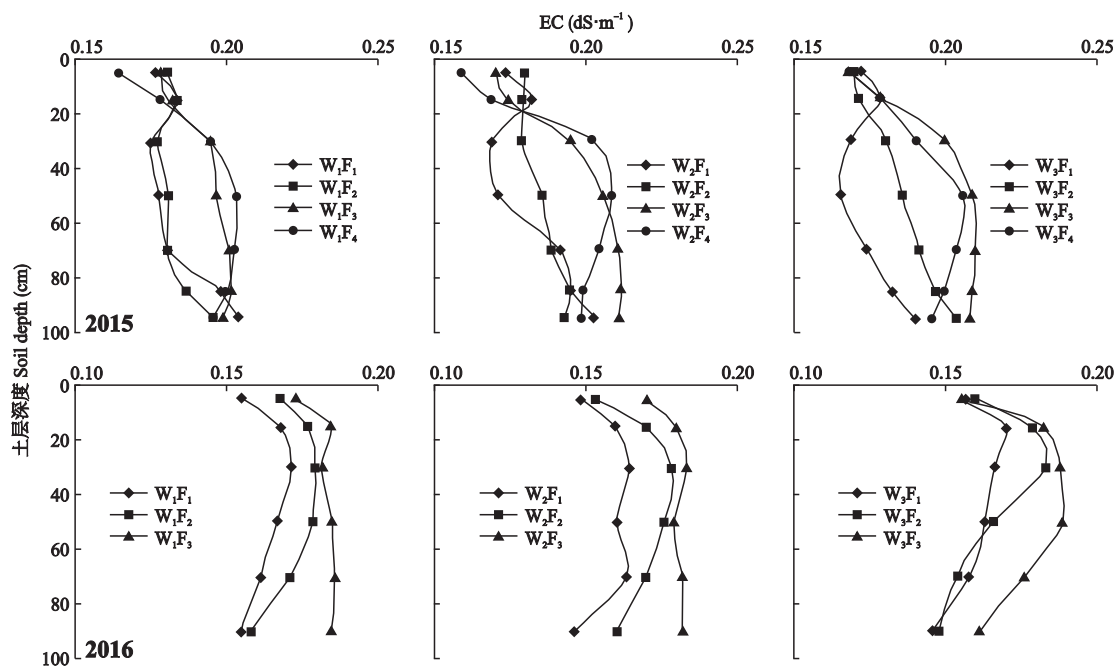


图 5 平均土壤含水率在剖面的垂直分布
Fig.5 Vertical distribution of average soil water content in profile.

在 2016 年的各土层均显著 (表 3). 在 3 种灌溉水平下, 20~80 cm 土层平均土壤含水率表现为 $F_1 < F_2 < F_3 < F_4$. 可见施肥量增大, 有助于该土层的土壤水分被作物利用, 与 F_1 相比, 2015 年 F_2 、 F_3 和 F_4 处理 20~80 cm 土层平均土壤含水率分别增加 5.9%、16.7% 和 16.7%, 2016 年 F_2 和 F_3 分别增加 13.3% 和 16.7%.

不同灌水量对平均土壤含水率的影响在 2015 年不显著, 在 2016 年的 0~10、60~80 和 80~100 cm 土层显著 (表 3). 2015 年不同灌水量下平均土壤含水率的差异没有明显规律. 2016 年, 3 种施肥量下, 0~10 cm 土层的平均土壤含水率表现为 W_1 高于 W_2 和 W_3 ; 而 60~80 和 80~100 cm 土层则表现为 W_3 低于 W_1 和 W_2 , 并且在 F_2 和 F_3 施肥水平时更明显, 与 W_1 相比, W_3 处理 80~100 cm 的平均含水率在 F_1 、 F_2 和 F_3 水平下分别降低 5.9%、6.1% 和 11.7%. 施肥和灌溉的交互作用对平均土壤含水率的影响在 2015 年的 40~60、60~80 和 80~100 cm 及 2016 年的 40~60 和 80~100 cm 土层显著.

2.2.2 不同生育期土壤贮水量变化 灌溉水平相同时, 施肥量对 0~100 cm 土层贮水量的影响从拔节期开始出现, 且 2016 年各处理之间的差异比 2015 年明显 (图 6). 2015 年, 拔节期以后的土壤贮水量均表现为 F_3 和 F_4 处理高于 F_1 和 F_2 处理, 与 F_1 相比, F_3 的贮水量在 W_1 、 W_2 和 W_3 下分别高 4.3%~16.2%、7.4%~17.4% 和 9.1%~22.0%; 2016 年, W_1 和 W_2 水

平下土壤贮水量从拔节开始后的各生育期均随施肥量的减小而增大, 在 W_1 和 W_2 水平下, 与 F_1 相比, F_2 的贮水量分别高 2.8%~13.4% 和 3.8%~18.8%, F_3 的贮水量分别高 9.6%~22.5% 和 9.2%~25.8%; W_3 水平下, 土壤贮水量也表现为 F_3 处理明显高于 F_1 和 F_2 处理, 与 F_1 相比, F_3 的贮水量高 3.6%~19.8%, 而 F_1 和 F_2 处理间差异不显著.

不同灌溉水平对土壤贮水量的影响在 2015 年不明显, 在 F_1 水平下, W_3 的贮水量低于 W_1 和 W_2 处理, 与 W_1 相比, W_3 的贮水量低 0.8%~12.0%; 其他施肥水平下, 不同灌溉水平间土壤贮水量的差异无明显规律. 2016 年, 在 F_2 和 F_3 水平下, W_3 的贮水量低于 W_1 和 W_2 处理, 但其差异低于 15%; 在 F_1 水平下, 3 种灌水量之间的贮水量差异无明显规律 (图 6).

2.3 不同灌溉和施肥处理对青贮玉米产量的影响

灌溉量对玉米产量的影响在 2015 年和 2016 年都不显著; 施肥量对产量的影响在 2015 年显著, 在 2016 年不显著; 灌溉和施肥的交互作用在两年试验中均不显著 (表 4).

2015 年, F_1 的产量随灌溉量的减少而降低 (图 7), 与 W_1 相比, W_2 和 W_3 的产量分别降低 1.8% 和 15.4%. F_2 、 F_3 和 F_4 时, 产量表现为 $W_2 > W_1 > W_3$, 而与 W_2 相比, W_1 产量降低 2.4%~6.8%, W_3 产量降低 8.9%~29.5%. 2016 年, 与 W_1 相比, W_2 产量减少低于 10%, 而 W_3 产量降低明显, F_1 、 F_2 、 F_3 下产量分别降

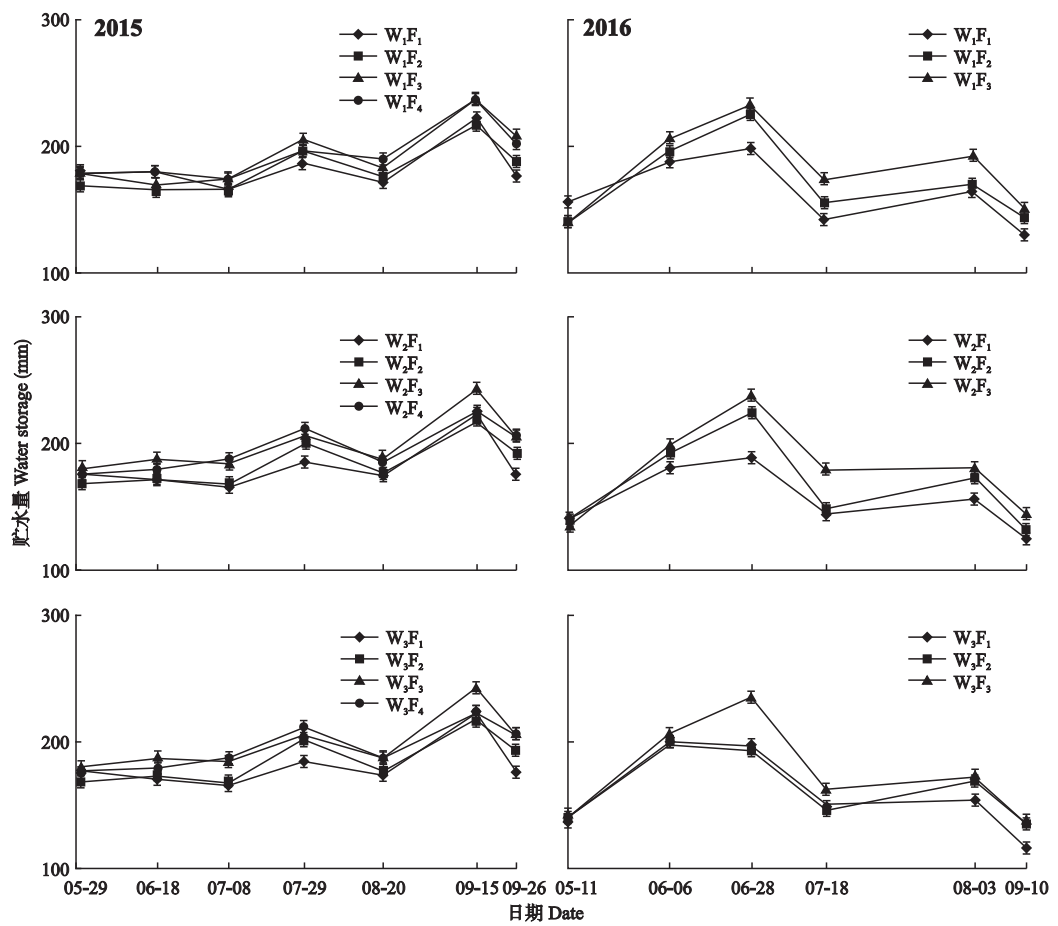


图 6 不同生育期 0~100 cm 土层土壤贮水量变化
Fig.6 Changes of soil water storage in 0–100 cm layer at different growth stages.

低 17.5%、10.0%和 6.0%。

2015 年,不同灌溉水平下,施肥对产量的影响略有不同. W_1 灌溉水平时,两年产量都随施肥量的减少而降低,与 F_1 处理相比, F_2 、 F_3 和 F_4 的产量 2015 年分别降低 1.8%、12.2%和 21.9%,2016 年, F_2 和 F_3 的产量分别降低 4.9%和 15.4%. W_2 和 W_3 时,2015 年产量表现为 $F_2 > F_1 > F_3 > F_4$,与 F_1 相比, F_2 产量减少 7.3%~13.5%, F_3 和 F_4 的产量分别减少 7.0%~13.4%和 18.5%~33.3%;2016 年, F_2 和 F_1 间产量差异小于 4.0%,而 F_3 处理的产量降低 3.6%~11.2%。从以上分析可知,3 种灌溉水平下, F_2 和 F_1 的产量相

表 4 产量的 ANOVA 方差分析结果
Table 4 Results of significance analysis according to ANOVA for yield

项目 Item	2015		2016	
	F	P	F	P
灌水 Irrigation	2.78	0.08	1.97	0.17
施肥 Fertilization	4.32	0.01	2.04	0.16
灌水×施肥 Irrigation×fertilization	0.18	0.98	0.25	0.91

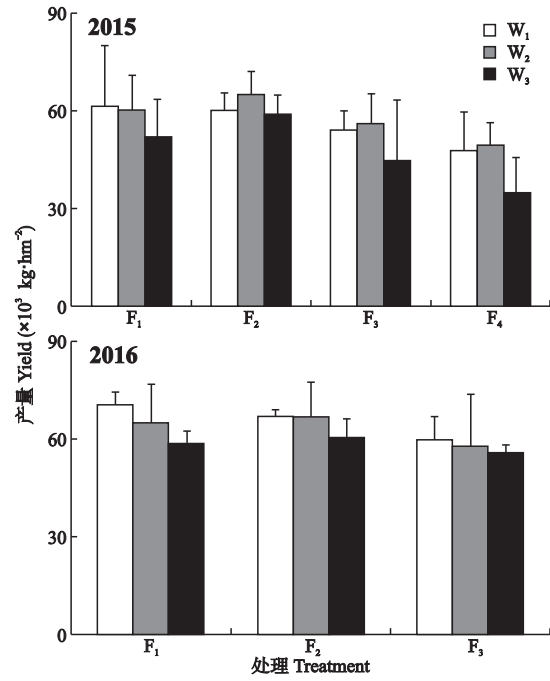


图 7 2015 和 2016 年各处理产量
Fig.7 Yield under different treatments in 2015 and 2016.

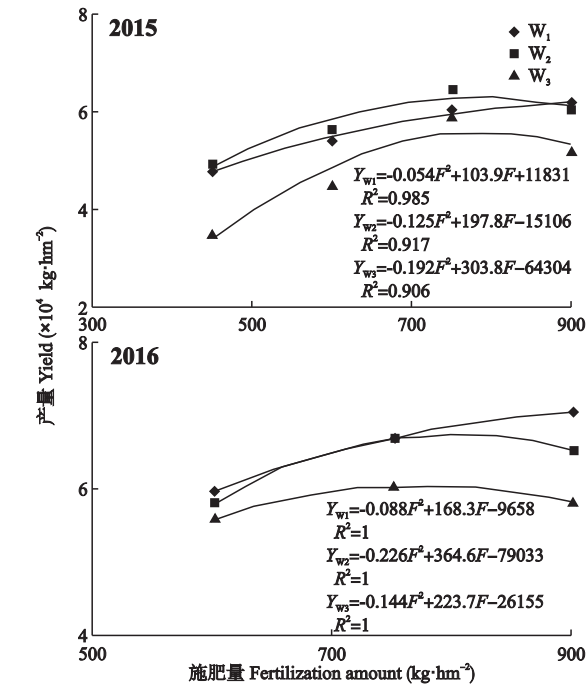


图 8 产量和施肥量的关系
Fig.8 Relationship between yield and fertilization amount.

差都低于 10%。

通过对两年试验数据进行产量和施肥量的多项式拟合发现,对于盐碱土,获得最高产量的施肥量随灌水量的增大而增加,且灌水量越大获得最高产量所需的施肥量越大,但所能获得的最高产量随灌水量的减少而降低(图 8). W_1 、 W_2 和 W_3 在 2015 年获得最高产量所需施肥量分别为 962、792 和 791 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2016 年分别为 952、807、777 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.根据拟合结果,施肥量低于上述值时,产量随施肥量的增大而增大;高于上述值时,产量随施肥量的增大而减小。

3 讨 论

闫建文等^[6]通过大田试验得出,轻度盐分土壤的电导率随着施氮量的增加而降低;中度盐分土壤的电导率随着施氮量的增加而增加.与以上研究一致,本研究发现,地面畦灌条件下,施肥量为普通施肥量的 1.2 倍时,0~20 cm 土壤电导率在生育期内明显增加,并高于其他施肥水平;而 4 种施肥水平下 0~20 cm 土层收获后电导率都降低至与播种期相近的水平.侯振安等^[7]研究表明,滴灌条件下不同施肥方式对土壤水盐分布无影响.而本研究中施肥方式对土壤水盐分布的影响明显,主要是由于本研究中灌溉方式和土壤的盐碱化程度较严重造成的.苏里坦等^[16]研究表明,增加灌水量有利于 0~40 cm 土层

脱盐,且增加灌水量可以促进盐分峰值向土层下方移动.本研究中, F_1 和 F_2 水平下,0~20 cm 土壤电导率随灌水量的增大而减小,灌水量增大有助于将肥料和盐分向深层淋洗,在水分的溶解下,更多的养分被作物吸收利用.在作物生育期内蒸发及根系吸水的作用下,盐渍化土壤的盐分表聚,施肥量的增大会导致盐分的积累程度更加严重.此外,各处理在收获时的电导率都降到播种时的水平,且不同灌溉水平对土壤电导率的影响并不明显.可见,适当节水控肥对于控制盐渍化土壤作物生育期的土壤盐分是可行的.对比两年的土壤电导率(图 3),2016 年土壤表层的电导率较 2015 年出现了明显的升高,可见冬季返盐现象严重,应当适当加大冬灌或春浇的灌溉量以淋洗盐分,控制土壤盐分逐年升高的趋势。

本研究表明,施肥对土壤水分的影响在不同土层有所不同.2015 年,灌水处理为 W_1 和 W_2 时, F_1 和 F_2 明显提高了表层 0~20 cm 土壤的含水率;2016 年,各处理 0~20 cm 土层含水率没有明显规律.相关研究表明,在作物生育期内由于肥料表施,氮素通过硝化作用以各种硝酸盐的形式存在于土壤中,导致水溶性盐分在土壤中大量累积,盐离子可以引起土壤分散和膨胀,导致土壤性质退化,致使表层土壤板结、通透性降低,土壤吸湿系数增大^[17-21],说明盐渍土通过水汽吸附作用可使其含水量增大.本研究中 2015 年 F_1 和 F_2 处理表层 0~20 cm 的电导率显著高于 F_3 和 F_4 处理,且在抽穗期高达 $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$,因此 0~20 cm 土层的含水率高于 F_3 和 F_4 处理,与前人研究结果基本一致;而 2016 年,3 种施肥水平下 0~20 cm 盐分积累都较明显,该土层各处理含水率也无明显规律.本研究中 3 种灌水量下, F_1 和 F_2 处理 20~80 cm 土层的土壤含水率明显低于 F_3 和 F_4 处理,且 0~100 cm 的贮水量从拔节期开始也表现为 F_1 和 F_2 处理低于 F_3 和 F_4 处理.闫建文等^[6]通过大田试验得出,轻度盐分土壤的土壤含水率随施氮量的增加而降低,本研究结果与其基本一致.玉米根系主要分布在 0~80 cm 土层^[22],合理的施肥量可以促进作物对深层土壤水分的吸收,土壤剖面水分含量也将随之下降,因此 20~80 cm 土层的土壤平均含水率和 0~100 cm 土层的贮水量随施肥量的增加而降低。

相关研究表明,施加氮肥能否缓解盐分对作物生长的有害影响取决于作物的种类、土壤盐分水平和其他环境因素^[23-25].闫建文^[2]在河套灌区盐碱地的研究发现,施氮、水氮交互对玉米产量均为正效应,水分的增产效应大于氮肥.代建龙等^[26]研究表

明,施肥能提高盐胁迫下棉花产量,低盐胁迫下的施肥效果好于中度盐胁迫.本研究结果也表明,适当增施氮肥在一定程度上可以提高青贮玉米产量,但增产效果有一定的阈值范围,且在不同灌溉水平下,增产范围和幅度也存在差异.当灌溉水平由 W_1 减少到 W_2 时,青贮玉米的产量不会明显降低,而当灌水水平为 W_3 时,施肥量减少时鲜产量降低明显.施肥量减少至 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量降低显著;但施肥量由 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量增加低于 10%.拟合分析表明,2015 年,增加施肥量的增产效果在 W_3 水平下优于 W_1 和 W_2 ;而 2016 年,增加施肥量的增产效果表现为 W_1 和 W_2 优于 W_3 ,这是由于 2015 年土壤电导率较低,盐分胁迫不明显,增施肥料在一定程度上缓解了水分亏缺对作物的影响;而 2016 年各处理电导率较高,此时灌水量的降低使作物处于水盐双重胁迫状态,且不利于盐分的淋洗,因此增施氮肥的增产作用随灌水量的降低而减弱.

4 结 论

F_1 施肥处理时,3 种灌水量下 0~20 cm 土层盐分积累明显高于其他处理;而不同灌溉水平间 0~20 cm 土层的电导率没有明显差异.各处理收获时的电导率都可降到播种时的水平.因此,在作物生育期内适当节水控肥可以在一定程度上控制盐分积累,但由于冬季返盐严重,为控制盐分逐年升高,应适当加大冬灌或春浇的灌溉量以淋洗盐分.施肥量对 20~80 cm 土层土壤含水率的影响明显.在 3 种灌溉水平下,20~80 cm 平均土壤含水率和贮水量表现为 $F_1 < F_2 < F_3 < F_4$.2015 年不同灌水量下平均土壤含水率的差别没有明显规律.2016 年,3 种施肥量下,0~10 cm 的平均土壤含水率表现为 W_1 高于 W_2 和 W_3 ;而 60~80 和 80~100 cm 土层则表现为 W_3 低于 W_1 和 W_2 . W_1 时,青贮玉米鲜质量随施肥量的减少而降低; W_2 和 W_3 时,与 F_1 相比, F_2 产量减少低于 10%, F_3 和 F_4 的产量降低明显.施复合肥 $600 \sim 750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (氮肥含量 $180 \sim 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),且灌水水平为 W_1 和 W_2 时,青贮玉米产量与 $W_1 F_1$ 相比降低少于 15%.

参考文献

- [1] Wang J-L (王佳丽), Huang X-J (黄贤金), Zhong T-Y (钟太洋), *et al.* Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2011, **66**(5): 673–684 (in Chinese)
- [2] Yan J-W (闫建文). Study on the Water and Nitrogen Migration Regularity and Efficient Utilization of Maize in the Salinity Soil. PhD Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [3] Ahmad R, Jabeen N. Demonstration of crop improvement in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by the use of organic fertilizers under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 2009, **41**: 1373–1384
- [4] Albassam BA. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, **24**: 1325–1335
- [5] Min W, Hou Z, Ma LJ. Effects of water salinity and N application rate on water- and N-use efficiency of cotton under drip irrigation. *Journal of Arid Land*, 2014, **6**: 454–467
- [6] Yan J-W (闫建文), Shi H-B (史海滨). Effect of nitrogen fertilizer on yield of wheat and soil moisture and salinity of different salinity soils. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2014, **3**(4/5): 50–53 (in Chinese)
- [7] Hou Z-A (侯振安), Li P-F (李品芳), Lyu X (吕新), *et al.* Distributions of water, salinity, and nitrogen in cotton root zone by different fertigation strategies. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(3): 549–557 (in Chinese)
- [8] Magdalena VC, April LU, Ernesto AC. Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plant. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 1781–1789
- [9] Chen W, Hou Z, Wu L, *et al.* Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment. *Plant and Soil*, 2010, **326**: 61–73
- [10] Zeng W-Z (曾文治), Xu C (徐 驰), Huang J-S (黄介生), *et al.* Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(3): 86–94 (in Chinese)
- [11] Zhang DM, Li WJ, Xin CS, *et al.* Lint yield and nitrogen use efficiency of field-grown cotton vary with soil salinity and nitrogen application rate. *Field Crops Research*, 2012, **138**: 63–70
- [12] Fang D-P (方栋平), Zhang F-C (张富仓), Li J (李静), *et al.* Effects of irrigation amount and various fertigation methods on yield and quality of cucumber in greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(6): 1735–1742 (in Chinese)
- [13] Wang B (王 斌), Zhang Q (张 强), Huang G-J (黄高鉴), *et al.* Study on high yield cultivation techniques of maize in inland soda-saline-alkali soil in Datong Basin. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2014(23): 9–11 (in Chinese)
- [14] Li L (李 磊), Zhang Q (张 强), Feng Y-C (冯悦晨), *et al.* All-film double-furrow sowing improving water and salt conditions and increasing maize yield in saline soil of cold and arid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(5): 96–103 (in Chinese)
- [15] Sun Y (孙 杨). Study on the Regulation of Water and

Salt Transport for Saline and Sodict Soil under Drip Irrigation in Datong Basin. PhD Thesis. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016 (in Chinese)

[16] Su L-T (苏里坦), Anbudu S-L-M (阿不都·沙拉木), Song Y-D (宋郁东). Effects of drip irrigation volume on soil water-salt transfer and its redistribution. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2011, **28**(1): 79-84 (in Chinese)

[17] Zhang J-P (张俊鹏), Feng L (冯 棣), Cao C-Y (曹彩云), *et al.* Effects of saline water irrigation on water consumption characteristics and water use efficiency of cotton. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2016, **47**(6): 107-112 (in Chinese)

[18] Ji Q-Y (季泉毅), Feng S-Y (冯绍元), Yuan C-F (袁成福), *et al.* Influences of saline water irrigation on soil physical properties in Shiyang River Basin. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* (排灌机械工程学报), 2014, **32**(9): 802-807 (in Chinese)

[19] Wang Q-J (王全九), Shan Y-Y (单鱼洋). Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2015, **46**(12): 117-126 (in Chinese)

[20] Jiang J, Feng SY, Ma JJ, *et al.* Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. *Field Crops Research*, 2016, **196**: 85-97

[21] Li X-G (李小刚), Cao J (曹 靖), Li F-M (李凤民). Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(1): 64-72 (in Chinese)

[22] Liu J-M (刘晶淼), An S-Q (安顺清), Liao R-W (廖荣伟), *et al.* Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2009, **17**(3): 517-521 (in Chinese)

[23] Tuna AL, 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. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59**: 173-178

[24] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: Some new advances. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2002, **21**: 1-30

[25] Homae M, Feddes RA, Dirksen C. A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**: 1764-1772

[26] Dai J-L (代建龙), Lu H-Q (卢合全), Li Z-H (李振怀), *et al.* Effects of fertilization on cotton growth and nitrogen use efficiency under salinity stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(12): 3453-3458 (in Chinese)

作者简介 蒋 静,女,1984 年生,博士,副教授. 主要从事水土资源与环境研究. E-mail: jiangjing@ tyut.edu.cn

责任编辑 张凤丽