

# 咸水非充分灌溉下土壤水盐动态及 对制种玉米生长的影响

袁成福<sup>1</sup>, 冯绍元<sup>2,3</sup>

(1. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013; 2. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009;

3. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 为了探究石羊河流域地下水资源的利用方式, 在甘肃省石羊河流域开展了为期 2 年的制种玉米咸水非充分灌溉田间试验, 试验设置 3 种灌水水平即  $w_1(1ET_c)$ 、 $w_2(2/3ET_c)$ 、 $w_3(1/2ET_c)$ , 3 种盐分水平即  $s_1$ (矿化度  $0.71 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 淡水)、 $s_2$ (矿化度  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )、 $s_3$ (矿化度  $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 共 9 个试验处理, 研究咸水非充分灌溉对土壤水盐动态及制种玉米生长的影响。研究表明: 咸水非充分灌溉条件下, 由于灌溉水量和灌水矿化度不同, 土壤水盐动态表现出不同的特征, 非充分灌溉处理土壤含水量低于充分灌溉处理, 咸水灌溉处理土壤含水量高于淡水灌溉处理; 充分灌溉处理盐分累积较深, 非充分灌溉处理盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤。灌溉水量采用  $2/3 ET_c$  的非充分灌溉方式进行灌溉, 土壤盐分随着水分运移, 盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤, 短时期采用灌水矿化度为  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的微咸水灌溉, 盐分不会在土壤产生大量累积。因此, 在研究区灌溉水量控制在  $2/3 ET_c$  左右, 灌水矿化度不超过  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对制种玉米生长的影响较小, 减产幅度在 11% 以下, 能够达到合理利用地下咸水资源和节水灌溉的目的。

**关键词:** 咸水灌溉; 非充分灌溉; 土壤水盐动态; 制种玉米; 玉米生长; 产量; 石羊河流域

**中图分类号:** S273.5 **文献标志码:** A

## Effect of deficit irrigation with saline water on soil water salt dynamic and seed maize growth

YUAN Cheng-fu<sup>1</sup>, FENG Shao-yuan<sup>2,3</sup>

(1. Jiangxi Water Resources Vocational Institute, Nanchang 330013, China;

2. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;

3. Research Centre for Agricultural Water in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to explore the use mode for groundwater resources and research the effects on soil water salt dynamics and maize growth, the field experiments of deficit irrigation with saline water for seed maize were conducted during 2012 and 2013 in the Shiyang River Basin. Set up total nine treatments included three water levels  $w_1$ ,  $w_2$  and  $w_3$  as  $1ET_c$ ,  $2/3ET_c$  and  $1/2ET_c$  and three salinity levels  $s_1$ ,  $s_2$  and  $s_3$  as  $0.71$ ,  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  respectively. The research results were indicated that under the conditions of deficit irrigation with saline water, due to different irrigation water quantity and salinity level, the soil water salt dynamics have showed different characteristics. The soil water content under deficit irrigation was lower than sufficient irrigation and higher than fresh water irrigation. The salt was accumulated in deeper soil under sufficient irrigation and major accumulated in the surface soil and root zone layer under deficit irrigation. The soil salinity was moved with water under deficit irrigation with water quantity as  $2/3 ET_c$ , and when using the salinity level  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  for irrigation in short term, the soil salinity would not be largely accumulated in the soil. Therefore, if irrigation amount was controlled about  $2/3 ET_c$  and the water salinity level was not more than  $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , the effect on seed maize growth was small and yield decrease was less than 11%. So the purpose of reasonable use saline water and water-saving irrigation could be achieved.

**Keywords:** saline water irrigation; deficit irrigation; soil water salt dynamic; seed maize; maize growth; yield; Shiyang River Basin

石羊河流域地处中国西北干旱内陆区,该地区水资源供需矛盾突出,农业灌溉是该地区的用水大户<sup>[1]</sup>。对于地表水资源严重短缺的干旱地区,地下水是农业灌溉的重要水源。然而,近年来随着对当地地下水资源的过度开发利用,地下水矿化度呈现逐年增长的趋势,其中石羊河下游的民勤湖区地下水矿化度高达  $3 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,并且以每年  $0.12 \sim 0.74 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的速度递增<sup>[2-3]</sup>。在干旱地区长时期利用高矿化度的地下水进行农田灌溉,不仅会导致土壤次生盐碱化,严重影响作物生长,甚至会使土地荒漠化,对人类生存环境造成威胁<sup>[4]</sup>。因此,在干旱地区开展咸水非充分灌溉下土壤水盐动态规律和作物生长规律研究,对该地区合理利用咸水资源和节水灌溉,指导农业生产具有重要意义。国内外关于咸水灌溉和非充分灌溉对土壤水盐运动及作物生长的影响开展过大量的研究工作, Jorenush 及 Valenza 等<sup>[5-6]</sup>研究了不同灌溉定额和矿化度下农田土壤盐分累积规律,研究表明大定额的灌溉会使灌溉水带入的盐分累积在深层土壤,而较小定额的灌溉则会使根区土壤产生盐分累积。吴忠东等<sup>[7]</sup>研究了咸水非充分灌溉条件对土壤水盐分布及冬小麦的影响,研究表明冬小麦主根系区含盐量随着生育期的发展而增加,到麦收后达到最大值,灌浆期缺水处理的土壤含盐量最大。陈素英等<sup>[8]</sup>在华北地区开展了微咸水非充分灌溉试验,研究了微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响。有关学者就咸水非充分灌溉在西北干旱区也开展了一系列的研究工作<sup>[9-11]</sup>。然而,咸水非充分灌溉的影响因气象、土壤、作物品种和咸水使用时间等的差异而不同。制种玉米是甘肃省河西走廊地区的主要经济来源之一,通过在石羊河流域开展为期 2 年的田间试验,研究咸水非充分灌溉对土壤水盐动态及制种玉米生长的影响规律,以期研究区合理利用咸水资源及节水灌溉提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

咸水非充分灌溉田间试验于 2012—2013 年在

中国农业大学石羊河试验站进行,该试验站地处甘肃省武威市凉州区( $102^{\circ}52'E, 37^{\circ}52'N$ ),海拔 1 581 m,属于典型的干旱荒漠地带<sup>[12]</sup>。研究区地下水位埋深 40 m 左右,平均降水量和蒸发量分别为 164.4 mm 和 2 000 mm 左右<sup>[13]</sup>。应用非称重式蒸渗仪进行田间试验,准备测坑小区 18 个,各测坑长 3.33 m、宽 2 m、深 3 m,小区间通过水泥混凝土隔开,坑底为水泥地板,下设排水通道,可以用来监测渗漏量。测坑内土壤平均容重为  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,田间持水率为  $0.30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (体积含水率,下同),饱和含水率为  $0.37 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,土壤基本理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

试验以水分和盐分为研究对象,共设置 3 种灌溉水平: $w_1(1ET_c)$ 、 $w_2(2/3ET_c)$ 、 $w_3(1/2ET_c)$ ,  $ET_c$  为作物的需水量。同时,设置 3 种盐分水平,分别为  $s_1$ (矿化度  $0.71 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,淡水)、 $s_2$ (矿化度  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $s_3$ (矿化度  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )。其中  $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  代表石羊河流域上游、中游、下游典型地区的地下水矿化度。试验共设 9 个处理,分别为  $w_1s_1$ (对照)、 $w_1s_2$ 、 $w_1s_3$ 、 $w_2s_1$ 、 $w_2s_2$ 、 $w_2s_3$ 、 $w_3s_1$ 、 $w_3s_2$  和  $w_3s_3$ ,受试验地条件所限,每个处理 2 个重复,共设置 18 个小区,试验采用裂区排列方式布置。根据制种玉米不同生育阶段,结合当地灌溉经验,设置灌溉制度如表 2、表 3 所示,2013 年各处理灌溉定额减少,是根据 2012 年制种玉米生育期内实际的灌水情况,对灌水定额作了相应的调整。

试验所使用的淡水源于当地地下水,通过水泵直接抽取。地下水主要包含  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  等。本试验灌溉用水根据当地地下水化学组成配置灌溉咸水,配置的咸水是采用质量比为 2:2:1 的  $NaCl$ 、 $MgSO_4$  和  $CaSO_4$  溶液组成,各处理灌溉用水 pH 值呈中性,灌溉水量利用水表控制。供试作物为当地制种玉米(金西北 22 号),2012 年于 4 月 24 日播种,9 月 23 日收获,全生育期 150 d;2013 年于 4 月 20 日播种,9 月 13 日收获,全生育期 146 d。在每年试验之前进行一次大水冲洗试验

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 The soil basic physical and chemical properties

土层深度/cm Soil depth	砂粒/% Sand	粉粒/% Silt	黏粒/% Clay	有机质/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Organic content	国际制土壤质地分类 Textural class of international system
0~20	59.46	28.58	11.96	2.60	砂壤土 Sandy loam
>20~40	58.33	29.47	11.21	2.64	砂壤土 Sandy loam
>40~120	43.35	42.63	14.02	5.69	黏壤土 Clay loam

表2 2012年各处理灌溉制度

Table 2 The irrigation schedule for each treatment in 2012

处理 Treatment	灌水矿化度 Salinity of irrigation water/(g·L <sup>-1</sup> )	灌水定额 Irrigation quota/mm					灌溉定额 Irrigation quota /mm
		06-06	06-30	07-21	08-13	08-31	
w1s1	0.71	120	120	120	120	105.0	585.0
w1s2	3.00	120	120	120	120	105.0	585.0
w1s3	6.00	120	120	120	120	105.0	585.0
w2s1	0.71	80	80	80	80	70.0	390.0
w2s2	3.00	80	80	80	80	70.0	390.0
w2s3	6.00	80	80	80	80	70.0	390.0
w3s1	0.71	60	60	60	60	52.5	292.5
w3s2	3.00	60	60	60	60	52.5	292.5
w3s3	6.00	60	60	60	60	52.5	292.5

注:w1、w2、w3 分别代表作物需水量 ET<sub>c</sub> 的 1、2/3、1/2; s1、s2、s3 分别代表灌溉水矿化度 0.71、3、6 g·L<sup>-1</sup>。下同。

Note: w1, w2, w3 was denoted 1, 2/3, 1/2 of crop water requirements (ET<sub>c</sub>); s1, s2, s3 was denoted irrigation salinity leve as 0.71, 3, 6 g·L<sup>-1</sup>. The same as below.

表3 2013年各处理灌溉制度

Table 3 The irrigation schedule for each treatment in 2013

处理 Treatment	灌水矿化度 Salinity of irrigation water/(g·L <sup>-1</sup> )	灌水定额 Irrigation quota/mm					灌溉定额 Irrigation quota /mm
		06-05	06-30	07-20	08-10	08-29	
w1s1	0.71	120	120	105.0	105.0	105.0	555.0
w1s2	3.00	120	120	105.0	105.0	105.0	555.0
w1s3	6.00	120	120	105.0	105.0	105.0	555.0
w2s1	0.71	80	80	70.0	70.0	70.0	370.0
w2s2	3.00	80	80	70.0	70.0	70.0	370.0
w2s3	6.00	80	80	70.0	70.0	70.0	370.0
w3s1	0.71	60	60	52.5	52.5	52.5	277.5
w3s2	3.00	60	60	52.5	52.5	52.5	277.5
w3s3	6.00	60	60	52.5	52.5	52.5	277.5

地,灌水定额为 150 mm。制种玉米按父本和母本 1:7 的方式种植,种植密度为每小区 56 株,各种农艺措施参照当地经验进行,记录试验过程中灌水时间、历时、除草以及施肥情况。2012 年制种玉米全生育期降雨量为 130 mm,2013 年制种玉米全生育期降雨量为 64.6 mm。

### 1.3 测定项目与方法

2012—2013 年试验期间分别在制种玉米播种前、收获后以及每次灌水前后通过土钻田间分层获取土样,每个处理均分为 7 层,分别为 0~10、>10~20、>20~40、>40~60、>60~80、>80~100 cm 和 100~120 cm,每次取样完后回填钻孔并做标记,土壤含水率采用烘干法(土样在 105℃烘箱内烘 8 h)测定。土钻取土留部分土样,将土样风干,进行研磨和过 1 mm 筛后,采用 1:5 的土水比配制成土壤饱和浸提液,利用 SG-3 型电导率仪(SG3-ELK742, Mettler-Toledo International Inc., Switzerland)测定其电导率 EC<sub>1:5</sub>,并用公式( $S = 0.0275EC_{1:5} + 0.1366$ )将 EC<sub>1:5</sub> 转化为土壤含盐量<sup>[14]</sup>。制种玉米出苗后每隔 7 d 利用精度为 0.01 m 的钢卷尺测量制种玉米株高

和叶面积长宽,并采用估算法得到叶面积指数。

收获后进行考种,每个处理随机取 6 个穗测定穗长、穗粗;对作物茎秆和果实取样称重,将地上部分(包括茎、叶、果穗)在 105℃下杀青 2 h,然后在 80℃下烘 48 h 得到干物质重,每个处理 6 个重复;从收获的玉米种子中每个处理随机取 6 个重复,每个重复 100 粒,各自称重,取其平均数计算百粒重;每个试验处理的所有玉米进行脱粒并晒干后称重,得到每个处理的产量。

### 1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 2003 软件对试验数据进行处理和制图,应用 SPSS17.0 统计软件对试验数据进行统计分析和显著性检验,处理间差异显著性用多因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分动态

农田中土壤水分动态主要受到灌溉、降雨和作物根系吸水等多种因素的共同影响,其中 2012 年制种玉米全生育期内降雨量为 130 mm,为丰水年份,2013 年制种玉米全生育期内降雨量为 64.5 mm,为

枯水年份。

灌水矿化度相同时,不同灌溉水量处理的土壤水分动态变化过程基本一致。以 2012 年  $0.71 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和 2013 年  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  处理为例,由图 1 可以看出, w1 处理 0~120 cm 土层的平均含水量高于 w2 和 w3 处理,但 w2 处理与 w1 处理含水量差异性不大,而 w3 处理的土壤含水量显著低于 w1 和 w2 处理。可见,灌溉水量采用  $2/3 \text{ ET}_c$  的非充分灌溉方式进行灌溉,土壤水分与充分灌溉处理相比降低较小。

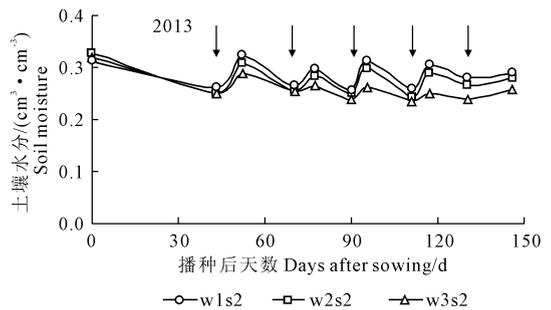
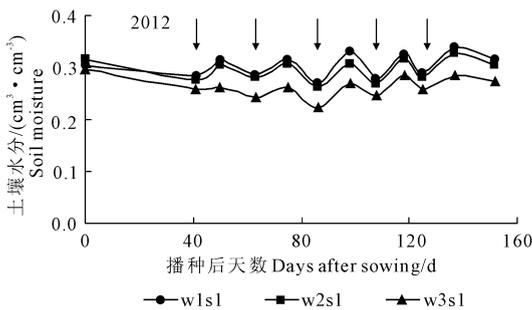
灌溉水量相同时,不同灌水矿化度处理的土壤水分动态变化过程相似,以 2012 年和 2013 年 w3 处理为例,由图 2 可以看出, $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的土壤含水量均高于  $0.71 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  处理,呈现出咸水灌溉处理的土壤含水量高于淡水灌溉处理的现象,与 Ben-Asher 等<sup>[15]</sup>研究表明咸水灌溉带入土体的盐分会使土壤水势降低,会对作物产生盐分胁迫,影响作物对土壤含水量的吸收,从而出现咸水灌溉处理的土壤含水量高于淡水灌溉处理的结论相似。本试验地已经进行了 3 年的咸水灌溉试验, $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的土壤已经累积了一定量的盐分,改变了土壤的理化性质,对作物会产生盐分胁迫,影响作物对土壤水分的吸收。两年咸水灌溉试验中  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的土壤含水量最大,可见长时期采用高灌水矿化度的咸水进行灌溉会使土壤盐分累积量越大,对

作物产生盐分胁迫越严重,从而抑制作物根系吸水,使更多的水分残留在土壤中,因此  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的咸水不宜作为长时期进行灌溉的水源。 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的微咸水长时期进行灌溉,土壤也会累积一定量的盐分,对作物生长产生一定的胁迫,但这种胁迫作用是否造成作物大面积的减产,对土壤水分的长时期响应还需进一步的试验研究。

## 2.2 土壤盐分动态

图 3 是 2012 和 2013 年制种玉米收获后与播种前各土层土壤盐分累积量,其中 0~20 cm 为表层土壤,20~60 cm 为根系吸水层土壤,60~120 cm 为深层土壤。土壤盐分动态变化主要受到灌溉水量、灌水矿化度和作物根系吸水等因素的影响。

从图 3 可以看出,淡水灌溉条件下,两年试验各土层盐分累积量相差不大,各土层盐分累积量也较小。2012 年制种玉米收获后与播种前相比,各处理表层土壤和根系吸水层土壤均呈现出少量积盐的现象,其中 w2s1 处理根系吸水层土壤积盐量最大( $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),2013 年各处理根系吸水层也具有类似的规律,而两年试验中各处理深层土壤整体表现出脱盐的现象,这主要是因为淡水灌溉条件下,盐分累积主要受灌溉水量和土面蒸发的影响,充分灌溉处理的盐分能够被淋洗的较深,非充分灌溉处理的盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤。



注:箭头代表灌溉。下同 Note: Arrow denotes irrigation. The same as below.

图 1 相同灌水矿化度不同灌溉水量处理土壤水分动态

Fig.1 Dynamics of soil water content under same salinity level and different irrigation quantity treatments

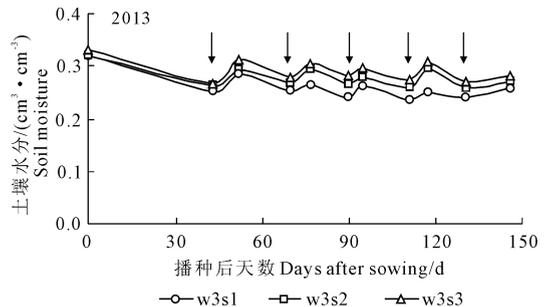
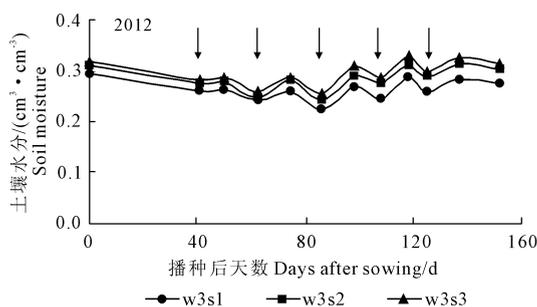


图 2 相同灌溉水量不同灌水矿化度处理土壤水分动态变化

Fig.2 Dynamics of soil water content under same irrigation quantity and different salinity level treatments

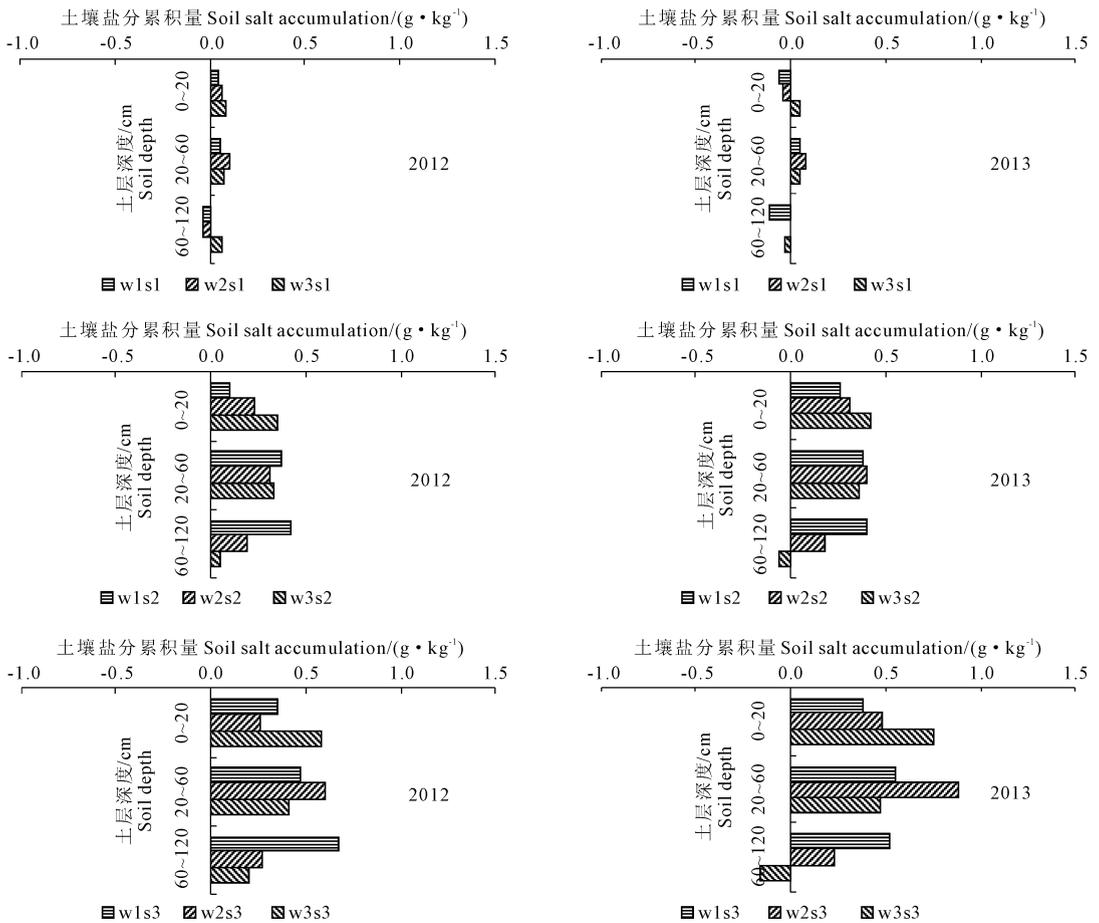


图 3 2012 和 2013 年各处理土壤盐分累积量

Fig. 3 Soil salt cumulant for each treatment in 2012 and 2013

3 g·L<sup>-1</sup>和 6 g·L<sup>-1</sup>咸水灌溉条件下,两年试验各土层盐分累积量发生了变化,以 w3s2 处理为例,2012 年表层土壤和根系吸水层土壤的盐分累积量分别为 0.352 和 0.323 g·kg<sup>-1</sup>,2013 年相同土层的盐分累积量分别比 2012 年增加了 0.062 g·kg<sup>-1</sup>和 0.034 g·kg<sup>-1</sup>,而在深层土壤中 2013 年盐分累积量比 2012 年减少了 0.109 g·kg<sup>-1</sup>,其它各处理也具有类似的规律,这主要是因为 2013 年各咸水灌溉处理与 2012 年相比已经累积了一定量的盐分,2013 年制种玉米生育期间的降雨量也较小,在作物根系吸水和土面蒸发共同作用下盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤。两年试验中各处理收获后与播种前相比,各土层整体上呈现积盐的现象,以 2012 年 6 g·L<sup>-1</sup>咸水灌溉处理为例,表层土壤积盐量最大的是 w3s3 处理(0.581 g·kg<sup>-1</sup>),根系吸水层盐分累积量最大的是 w2s3 处理(0.607 g·kg<sup>-1</sup>),深层土壤盐分累积量最大的是 w1s3 处理(0.676 g·kg<sup>-1</sup>),其它处理也具有类似的规律,这说明咸水灌溉条件下盐分累积受灌溉水量、作物根系吸水和土面蒸发共同作用下,充分灌溉处理盐分累积较深,非充分灌溉处理

盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤,其中 2013 年重度缺水 w3s3 处理由于每次灌水量较小,灌水量很难达到深层土壤,且水盐胁迫严重,抑制作物根系吸水,在土面蒸发作用下,深层土壤盐分向上转移,表层和根系吸水层土壤达到 0.746 g·kg<sup>-1</sup>和 0.474 g·kg<sup>-1</sup>的积盐量。可见,高灌水矿化度的咸水灌溉在土壤中累积的盐分越厉害,若长时期使用高灌水矿化度的咸水进行农田灌溉则会使土壤产生盐碱化,影响作物的正常生长。由于 3 g·L<sup>-1</sup>处理在土壤中的盐分含量较少,在该研究区短时期使用 3 g·L<sup>-1</sup>的微咸水进行农田灌溉,盐分不会在土壤中产生大量累积,但长时期进行农田灌溉,对土壤盐分的长时期响应还需要进一步的试验研究。

### 2.3 株高和叶面积指数

株高是表征作物纵向生长指标能力的指标之一。不同处理制种玉米生育期内株高变化显著,制种玉米抽穗期前,植株生长迅速,株高值增加较快,抽穗期后株高基本停止,株高值基本维持不变。以轻度缺水灌溉 w2 处理为例,由图 4 可以看出,不同灌水矿化度处理株高差异性显著,咸水灌溉处理对

制种玉米株高的影响主要体现在拔节期以后,生育期末期,2012年 w2s2、w2s3 处理分别比 w2s1 处理降低了 5.25 cm 和 8.25 cm,2013年相同对比情况下则降低了 11.88 cm 和 18.63 cm,其它灌水处理也具有类似的规律。2012年各处理差异性比 2013年较小,主要是因为制种玉米生育期内降雨量较大,一定程度上影响了各处理株高之间的差异性。

叶片是作物进行光合作用、蒸腾作用等生理活动的重要器官,叶面积的消长是衡量作物个体和群体生长发育好坏的重要标志。以轻度缺水灌溉 w2 处理为例,由图 5 可以看出,各处理叶面积指数变化规律与制种玉米株高变化规律类似,生育期末期,2012年 w2s2、w2s3 处理分别比 w2s1 处理降低了  $0.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$ ,2013年相同对比情况下则降低了  $0.67 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$  和  $0.84 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由此可见,咸水灌溉会降低作物的株高和叶面积指数,且灌水矿化度越大对作物生长的影响越明显,若长时期采用高灌水矿化度的咸水进行灌溉,会严重影响作物的生长。

## 2.4 产量及其构成因素

表 4 为两年试验制种玉米产量及其构成因素。表 4 结果表明,相同灌水量不同灌水矿化度条件下,随着灌水矿化度的增大,制种玉米出现不同程度的

减产,2012年减产幅度为 2.2% ~ 11.5%,2013年减产幅度为 2.0% ~ 14.8%。3种灌水水平下,不同灌水矿化度的咸水灌溉处理表现出相似的规律。以轻度缺水灌溉处理为例,2012年  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的咸水灌溉处理比淡水灌溉处理减产 2.2%,而  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的咸水灌溉处理比淡水灌溉处理减产幅度高达 11.5%,2013年  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的咸水灌溉处理比淡水灌溉处理减产 2.0%, $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的咸水灌溉处理比淡水灌溉处理减产幅度高达 13.0%。说明在该研究区适度的咸水灌溉制种玉米的产量接近淡水灌溉的产量,但如果灌水矿化度过高则会造成制种玉米大幅度减产。因此,控制灌水矿化度是制定适宜咸水灌溉制度的关键因素之一。另外,相同灌水矿化度不同灌水量条件下,随着缺水程度的增加,3种盐分水平下的制种玉米具有类似的减产规律,即缺水程度越严重,减产幅度越大。水盐联合胁迫下,2012年 w2s2、w2s3 和 w3s2 和 w3s3 分别比 w1s1 减产 6.3%、15.2%、31.2% 和 34.4%;2013年 w2s2、w2s3、w3s2 和 w3s3 分别比 w1s1 减产 10.9%、20.8%、33.5% 和 39.0%。由此可见,若在研究区进行灌溉,灌溉水矿化度控制在  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,灌溉水量不低于  $2/3 \text{ ET}_c$ ,不会造成制种玉米大幅度减产。

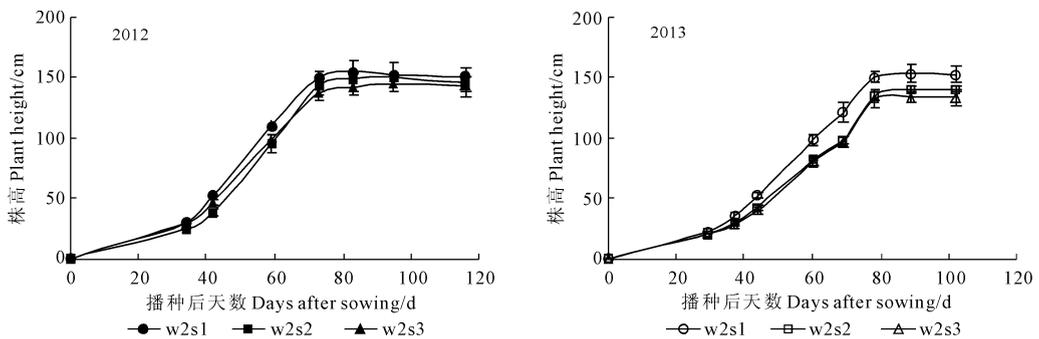


图 4 制种玉米株高

Fig.4 The height of seed maize

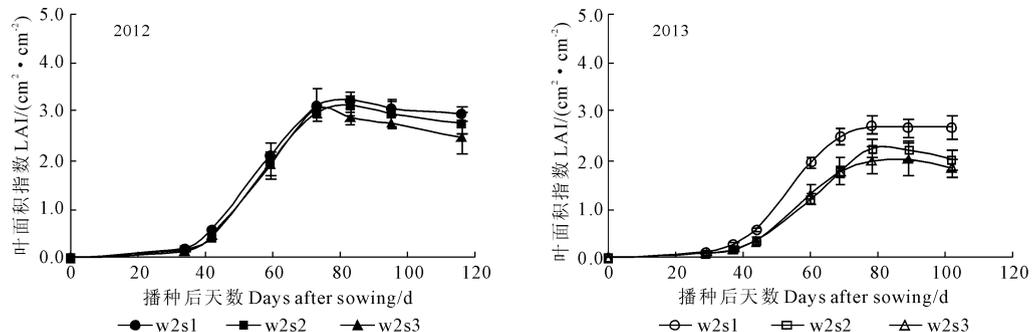


图 5 制种玉米叶面积指数

Fig.5 LAI of seed maize

表5为两年试验制种玉米产量及其构成因素方差分析结果,以2013年为例,灌溉水量只对穗长的影响显著( $P < 0.05$ ),灌水矿化度对穗长、穗粗、干

物质、产量的影响均显著,二者的交互作用只对穗长、产量显著,其余均不显著。可见,不同的灌溉水量和灌水矿化度对制种玉米产量的影响显著。

表4 产量及其构成因素

Table 4 The yield and its component factors

产量指标 Yield index	年份 Year	w1			w2			w3		
		s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3
穗长/cm Ear length	2012	146.5	139.2	136.6	133.0	135.8	133.7	130.4	130.9	128.6
	2013	142.5	134.9	129.4	131.7	129.5	121.9	120.3	119.5	114.5
穗粗/cm Ear diameter	2012	43.3	44.2	42.6	42.3	42.1	41.2	40.4	40.0	41.5
	2013	41.1	43.2	40.4	38.6	36.5	35.0	35.5	36.6	36.7
百粒重/g 100-grains weight	2012	45.7	45.2	44.0	44.2	43.9	44.2	42.2	42.4	40.6
	2013	40.5	39.7	37.9	38.7	38.2	37.8	37.5	37.7	36.8
干物质重/g Dry matter weight	2012	267.3	264.8	253.5	244.6	231.1	237.1	214.4	200.7	216.3
	2013	242.0	240.1	237.9	235.2	227.8	218.9	203.8	176.3	174.6
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield	2012	6767.8	6507.7	6440.1	6487.5	6341.0	5741.0	4885.9	4659.5	4436.1
	2013	6425.0	6050.4	5962.9	5846.6	5765.3	5082.4	4600.7	4269.2	3915.8

表5 产量及其构成因素的方差分析结果

Table 5 The ANOVA results of yield and its component factors

产量指标 Yield index		2012		2013	
		F-值 F-Value	P-值 P-Value	F-值 F-Value	P-值 P-Value
穗长 Ear length /cm	w	4.01	0.04	4.27	0.03
	s	0.47	0.64	4.71	0.02
	w × s	0.44	0.78	5.35	0.00
穗粗 Ear diameter /cm	w	8.23	0.00	1.27	0.30
	s	0.11	0.89	7.46	0.00
	w × s	1.13	0.38	2.38	0.08
百粒重 100-grains weight/g	w	120.64	0.00	0.96	0.40
	s	13.85	0.00	2.41	0.12
	w × s	5.33	0.01	1.76	0.18
干物质重 Dry matter weight/g	w	5.64	0.01	1.78	0.19
	s	0.27	0.77	19.9	0.00
	w × s	0.14	0.97	1.56	0.21
产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	w	76.65	0.00	1.24	0.31
	s	4.52	0.04	37.06	0.00
	w × s	0.46	0.76	8.52	0.00

注:  $P < 0.05$  的水平下显著; w 代表灌溉水量, s 代表灌溉水矿化度。

Note: The difference is significant at  $P < 0.05$ . w is represented the irrigation quantity, s is represented the irrigation salinity level.

### 3 结论

通过在石羊河流域开展为期2年的咸水非充分灌溉试验,研究了咸水非充分灌溉对土壤水盐动态及制种玉米生长的影响,主要结论如下:

(1) 咸水非充分灌溉条件下,由于灌溉水量和灌水矿化度不同,对土壤水分动态有明显的影响。灌水矿化度相同条件下,非充分灌溉的土壤含水量低于充分灌溉处理;灌水水量相同条件下,咸水灌溉处理土壤含水量高于淡水灌溉处理。

(2) 2012和2013年制种玉米收获后与播种前相比各土层盐分累积动态变化表明:在研究区灌溉水量采用 $2/3 ET_c$ 的非充分灌溉方式进行灌溉,土壤盐分主要累积在表层土壤和根系吸水层土壤;短时期采用 $3 g \cdot L^{-1}$ 的微咸水进行灌溉,盐分不会在土壤中产生大量累积。

(3) 在研究区进行灌溉,灌溉水矿化度控制在 $3 g \cdot L^{-1}$ 以下,灌溉水量不低于 $2/3 ET_c$ ,对制种玉米的株高和叶面积指数影响较小,减产幅度也较小,能够达到合理利用地下咸水资源和节水灌溉的目的。

### 参考文献:

- [1] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等.气候变化和农业发展对石羊河流域地下水水位的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):121-128.
- [2] 黄翠华,薛 娟,彭 飞,等.不同矿化度地下水灌溉对民勤土壤环境的影响[J].中国沙漠,2013,33(2):590-595.
- [3] 刘建凯,汪有科.石羊河流域生态环境问题与综合治理[J].水土保持研究,2006,13(6):153-155.
- [4] 孙 月,毛晓敏,杨秀英,等.西北灌区地下水矿化度变化及其对作物的影响[J].农业工程学报,2010,26(2):103-108.
- [5] Jorenush M H, Sepaskhah A R. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions[J]. Agriculture Water Management, 2003,61(2):125-141.

(下转第73页)

量下降不显著,水分利用效率显著提高<sup>[13]</sup>。本试验结果表明,滴灌冬小麦拔节至成熟期间每次滴水量在  $225 \sim 900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  的范围内,随着滴水量增加,增加总耗水量和土层湿润深度,主要直接增加  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层含水量,间接减少  $60 \sim 140 \text{ cm}$  土层储水消耗量;总滴水量为  $3\,450 \sim 3\,675 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  (其中,拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期各  $450 \sim 675 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 获得产量  $6\,737.4 \sim 8\,604.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

本研究 2014—2015 年试验因 6 月上旬降雨量大,与 2013—2014 年相比,各处理少灌灌浆水。 $W_4$ 、 $W_3$  处理在灌浆初期发生严重倒伏、后期贪青,营养器官储存物质向子粒转移受阻,大幅度降低千粒重,产量和水分利用效率明显下降。可见,在选择抗倒伏性强的高产品种基础上,适时适量施氮肥和灌水是实现滴灌冬小麦节水高产的关键技术。

冬小麦总耗水由生育期间降水量、灌水量和土壤储水消耗量三部分组成。其中,2013—2014 年、2014—2015 年在产量形成关键期(4—6 月)的降水量分别为  $71.6$ 、 $62.5 \text{ mm}$ ,分别占小麦整个生育期间总降水量的  $50.8\%$ 、 $49.2\%$ ,加上每次降水量很少,湿润土层浅,小麦根系难于吸收利用。因此,降水量对新疆冬小麦产量形成作用很小。在土壤储水量一致条件下,影响小麦产量形成主要是灌水量。而冬小麦总灌水量由冬前灌水(出苗水、越冬水)和春灌(拔节水、孕穗水、开花水、灌浆水)组成。本文仅研究了春季不同滴水量对冬小麦干物质积累、产量及水分利用效率的影响。有关减少出苗水和越冬水量对冬小麦产量和水分利用效率的影响有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 王荣栋,王新武,符林,等.关于滴灌小麦栽培的几个问题[J].新疆农业科学,2010,47(7):1412-1415.
  - [2] 李久生,张建君,薛克宗,等.滴灌施肥灌溉原理与应用[M].北京:中国农业科技出版社:1-2.
  - [3] Wood M L, Finger L. Influence of irrigation method on water use and production of perennial pastures in northern Victoria[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2001,46:1605-1614.
  - [4] Alexiou I, Kalfountzos D, Kotsopoulos S, et al. Comparison of subsurface and surface drip irrigation of cotton crop[C]//Proceedings of the 9th National Congress of the Hellenic Hydrotechnical Association. The ssaloniki, Greece, 2003:199-206.
  - [5] Arafa Y E, Wasif E A, Mehawed H E. Maximizing use efficiency in wheat yields based on drip irrigation systems[J]. Aust J Basic Appl Sci, 2009,3:790-796.
  - [6] 谢小清,章建新,段丽娜,等.滴灌量对冬小麦根系时空分布及水分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2015,35(7):971-979.
  - [7] 薛丽华,陈兴武,胡锐,等.不同滴水量对冬小麦根系时空分布及耗水特征的影响[J].华北农学报,2014,29(5):200-206.
  - [8] 薛丽华,谢小清,段丽娜,等.滴灌次数对冬小麦根系生长及时空分布的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):1-9.
  - [9] 位国峰,刘义国,姜雯,等.不同滴灌量对冬小麦干物重及产量的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(5):67-70,99.
  - [10] 刘义国,位国峰,高健,等.不同滴灌量对冬小麦旗叶衰老及产量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(10):96-101.
  - [11] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agric Water Manag, 2010, 97: 1139-1145.
  - [12] 张胜全,方保停,王志敏,等.春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响[J].生态学报,2009,29(4):235-244.
  - [13] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙江流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013,39(9):1687-1692.
- 
- [6] Valenza A, Grillot J C, Danzy J. Influence of groundwater on the degradation of irrigated soils in semi-arid region, the inner delta of the Niger River Mail[J]. Hydrogeology Journal, 2000,8(4):417-429.
  - [7] 吴忠东,王全九.微咸水非充分灌溉对土壤水盐分布与冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(9):36-42.
  - [8] 陈素英,张喜英,邵立威,等.微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):580-585.
  - [9] 王诗景,黄冠华,杨建国,等.微咸水灌溉对土壤水盐动态及春小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(5):27-33.
  - [10] 蒋静,冯绍元,孙振华,等.咸水非充分灌溉对土壤水盐分布及玉米产量的影响[J].应用生态学报,2008,19(12):2637-2642.
  - [11] 杨树青,杨金忠,史海滨.微咸水灌溉对作物生长及土壤盐分影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2008,(7):32-35.
  - [12] 赵志才,冯绍元,霍再林,等.咸水灌溉条件下土壤水盐分布特征[J].应用生态学报,2010,21(4):945-951.
  - [13] 江冠军,刘芳,唐泽军.石羊河流域井灌区土壤水分渗层渗漏研究[J].灌溉排水学报,2009,28(6):91-93.
  - [14] 蒋静,冯绍元,王永胜,等.灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响[J].中国农业科学,2010,43(11):2270-2279.
  - [15] Ben-Asher J, van Dam J C. Irrigation of grapevines with saline water II. Mathematical simulation of vine growth and yield[J]. Agriculture Water Management, 2006,83(1-2):22-29.

(上接第 65 页)