

## 微咸水灌溉对土壤盐分及冬小麦和夏玉米产量的影响

毛振强<sup>1,2</sup> 宇振荣<sup>1</sup> 马永良<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094; 2. 中国土地勘测规划院,北京 100029)

**摘要** 1997—2001年间,研究了微咸水灌溉条件下,不同深度原位土壤溶液的电导率及其微咸水灌溉对冬小麦和夏玉米产量的影响。表明:使用微咸水灌溉,0~80 cm土壤溶液的电导率迅速升高,2年后较淡水灌溉处理同一深度土层土壤溶液的电导率高约5~10 mS cm<sup>-1</sup>。在一个生长季节内,550 mm的降雨和250 mm的灌溉水对盐分的最大淋洗深度一般都不超过150 cm。灌溉农田中,盐渍化最严重层是亚表层(20~60 cm)。当20~60 cm土壤溶液的电导率在8 mS cm<sup>-1</sup>以下时,对夏玉米的产量无显著影响;若电导率长期维持在10~15 mS cm<sup>-1</sup>之间且当季的降雨相对较少时,玉米产量将显著降低。当20~60 cm土壤溶液的电导率长期维持在12~15 mS cm<sup>-1</sup>之间,在灌溉量较大的条件下,盐分胁迫所造成的冬小麦产量损失一般在10%左右。

**关键词** 微咸水;灌溉;电导率(EC)

中图分类号 S 274

文章编号 1007-4333(2003)S0-0020-06

文献标识码 A

## Influence of brackish water on the soil salt regime and yield of winter wheat and summer maize

Mao Zhengqiang<sup>1,2</sup>, Yu Zhengrong<sup>1</sup>, Ma Yongliang<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. China Land Survey and Planning Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract** Drought and fresh water shortage are the main limited factors of sustainable agriculture development in the North China Plain (also referred to as the Huang Huai Hai Plain or 3-H Plain). The scarcity of fresh water forces farmers to use shallow saline ground water. The risk of soil salinity would increase. This paper describes the changes of soil salts and crop responses to brackish water irrigation based on field experiments from October 1997 to July 2001. It was found that brackish water irrigation resulted a rapid accumulation of salts, notably in the upper 80 cm soil layer. The maximal electrical conductivity (EC) of 20~40 cm soil layer exceeded 20 mS cm<sup>-1</sup>. The salts were leached from 150 cm during the wet season. With the total precipitation of 550 mm and additional 250 mm irrigation water with high quality, all the salts in 80 cm soil layer of a sandy loam soil were leached. Irrigating with brackish water, the average yields of winter wheat and summer maize were 91% and 92% of the recorded maxima respectively, but only 67% and 89% if non-irrigation. Irrigation with the brackish water for three years, the yield of winter wheat was about 92% of the maximum. The experiments confirmed that brackish water irrigation was economically attractive to farmers for a short term. Ecological hazard may occur in long-term use of the water. The average electrical conductivity lower than 8 mS cm<sup>-1</sup> in the 20~60 cm soil had no significant effect on the yield of summer maize. The yield would significantly decline if the EC was 10~15 mS cm<sup>-1</sup> at dry year. However winter wheat yield would decrease by 10%.

**Key words** Brackish water; Irrigation; electrical conductivity (EC)

随着水资源形势的日益紧迫,在节约用水、努力提高水资源利用效率的同时,全方位、多途径地开发一切可利用的水资源是农业生产可持续性的重要措施。资料表明<sup>[1]</sup>,黄淮海平原地下咸水(>5 g L<sup>-1</sup>)和微咸水(2~5 g L<sup>-1</sup>)覆盖的面积约占整个平原面积的18%,这2种水资源的年补给量分别为3.7×10<sup>9</sup>和54×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。研究表明,这些咸水和微咸水资

源如果调控得宜,可以在一定时间内部分、甚至完全替代淡水资源,取得良好的经济效益<sup>[2~4]</sup>。

本文利用1997—2001年连续4年的试验数据,分析了不同灌溉条件下土壤的盐分积累情况及其对冬小麦和夏玉米产量的影响,为合理利用微咸水资源提供依据。

收稿日期:2003-09-18

基金项目:中荷合作资助项目(SAIL-SPP 299.399);国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709)

作者简介:毛振强,博士,主要从事土地可持续利用方面的研究。Tel:(010)62046847 转 8016

## 1 材料与方法

试验于 1997-10—2001-08 在中国农业大学曲周试验站进行。曲周属暖温带半湿润季风气候,多年平均气温  $13.2^{\circ}\text{C}$ 。7 月份平均气温  $26.8^{\circ}\text{C}$ ;1 月份平均气温为  $-2.9^{\circ}\text{C}$ ;年总降水量为 514.3 mm,其中 7~9 月的降雨量一般占 60%以上,春季雨量一般仅占年雨量的 10%左右。土壤为盐碱地改良后的褐土化潮土,其主要理化性状见表 1。试验采用随机区组设计,重复 3 次,小区面积为  $8.2\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ ,处理位置多年不变。1997—1999 年和 1999—2001 年试验小麦品种分别为邯 4564 和邯 5316;1998、1999 和 2000 年试验玉米品种分别为掖单 20、冀丰 58 和农大 108。小麦的播种量为  $225\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,平均行距 16.5 cm,播种日期一般为每年的 10 月上旬;

玉米播种量一般为  $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。播种方式均为机播,并在玉米拔节前定苗。1999—2001 年间的部分灌溉情况见表 2。其中处理 A、C 用微咸水灌溉,其余处理灌溉淡水;处理 B 为不施 N 肥,处理 D 为充足灌溉处理,E 为雨养处理(1997—1999 年冬小麦灌溉越冬水),处理 C、F 仅在关键期灌溉(小麦一般在拔节和灌浆前期灌溉,玉米一般在拔节或大喇叭口前灌溉)。严格控制杂草和病虫害,保持非处理因子的一致性。除不施肥的处理外,其他处理的年施 N 量一般约为  $600\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其中,小麦的施 N 约  $450\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,基肥和追肥各半;玉米的施 N 约  $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,一般在拔节期或大喇叭口期灌溉时撒施;各处理秋冬小麦播种前施  $\text{P}_2\text{O}_5$  量分别为 200、140、140 和  $280\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 1 试验地土壤的主要基础理化性状

Table 1 Basic soil properties of the experiment fields

| 土壤层次    | 土壤质地 | 土壤容重/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 全 N/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 速效 N/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全 P/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 全 K/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 有机质/<br>( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 砂粒/ % | 粉粒/ % | 粘粒/ % |
|---------|------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 0~35    | 粉砂壤土 | 1.46                                         | 0.11                                        | 48.7                                          | 7.088                                       | 4.86                                        | 9.080                                       | 9.78  | 77.94 | 12.28 |
| 35~85   | 粉砂壤土 | 1.43                                         | 0.088                                       |                                               | 5.674                                       | 4.747                                       | 7.111                                       | 8.82  | 73.68 | 17.5  |
| 85~145  | 粉砂壤土 | 1.42                                         | 0.076                                       |                                               | 6.324                                       | 4.673                                       | 7.047                                       | 8.66  | 79.59 | 11.75 |
| 145~200 | 粘壤土  | 1.39                                         | 0.071                                       |                                               | 6.169                                       | 4.936                                       | 8.331                                       | 2.83  | 63.1  | 34.07 |

注:表中数据为胡克林(2000)于 1999 年测定的 3 个土壤剖面的平均值。

试验中使用的深层淡水约 100~120 m,电导率  $1.11 \sim 1.55\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;浅层微咸水深度约 10~20 m,电导率  $5.40 \sim 5.47\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。试验期间每周用中子仪测定 1 次各处理的含水量;中雨后和灌溉前、后分别加测 1 次,测定深度分别为距地表 20、40、60、80、100、120、160 和 200 cm。为观测不同灌溉水质条件下土壤的盐分状况,每隔 1 周用土壤溶液提取器分别在 20、40、60、80、100、140 和 180 cm 深度处提取处理 A、D 的原位溶液,用电导仪测定其电导率。由于不同年份试验目的的差异,本研究的 2 个主要处理 A、D 的灌溉定额和灌溉频率在 1999-10 前并不完全一致,灌溉微咸水的处理 A 的灌溉定额和灌溉量小于处理 D;但从 1999 年小麦生长季节以后,2 处理的灌溉除水质有所差异外,灌溉时间和定额完全一致。1999-10 前,处理 A、C 除灌溉的冬小麦越冬水外,其余均为微咸水;1999—2001 年间处理 A、C 除标出的几次外,

灌溉水质均为微咸水;其他处理均灌溉淡水。

## 2 试验结果

### 2.1 浅层地下水水位的动态

在黄淮海平原,地下水位的深浅是影响土壤积盐过程最重要的因素<sup>[1]</sup>。图 1 显示了试验期间地下水位埋深的变化。可以看出,绝大多数时间内地下水位埋深都大于 3 m。1999-06—2000-06,地下水位大幅度下降。而试验地下水位观测井的最大观测深度仅为 4.2 m,在这段时间里没有确切的记录数据。由于 2000 年夏秋季节降雨多达 517 mm,同时实验地的灌溉定额又较高,2000-08—2001-04 地下水位恢复到 2.5~3.0 m。试验地土壤为砂壤土,反盐的临界深度为 2.0~2.2 m。当地下水埋深大于 3 m 时,地下水中的盐分不可能自然上升到耕层,但对深层土壤的盐分状况仍有一定程度的影响。

表 2 实验各处理及其 1999—2001 年间部分灌溉情况  
Table 2 Treatments and part of the irrigations from 1999 to 2001

| 灌溉日期       | 处理<br>A | 处理<br>B | 处理<br>C | 处理<br>D | 处理<br>E | 处理<br>F |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1999-11-16 | 75(淡水)  | 75      |         | 75      | 75      |         |
| -12-05     | 68(淡水)  | 68      | 68(淡水)  | 68      |         | 68      |
| 2000-03-31 | 60      | 60      |         | 60      |         |         |
| -04-05     | 60      | 60      | 60      | 60      |         | 60      |
| -05-10     | 90      | 90      | 90      | 90      |         | 90      |
| -06-15     | 75      | 75      |         | 75      |         |         |
| -08-24     | 60      | 60      | 60      | 60      |         | 60      |
| -10-13     | 60      | 60      |         | 60      |         |         |
| -12-17     | 50      | 50      | 50      | 50      |         | 50      |
| 2001-04-05 | 50      | 50      | 50      | 50      |         | 50      |
| -05-04     | 50      | 50      |         | 50      |         |         |
| -05-17     | 50      | 50      | 50      | 50      |         | 50      |
| -06-15     | 50      | 50      |         | 50      |         |         |

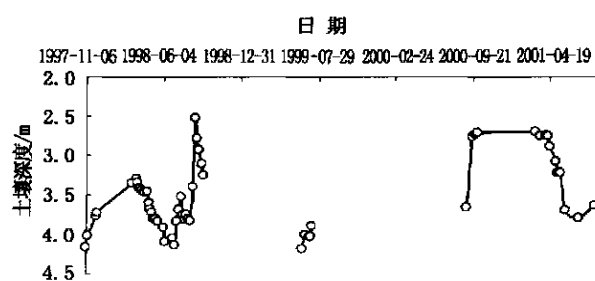


图 1 试验地地下水位的动态变化  
Fig. 1 The dynamic change of ground-water levels in the experiment field

## 2.2 不同灌溉条件下土壤溶液的电导率

原位土壤溶液的电导率 ( $EC, mS \cdot cm^{-1}$ ) 直接反映了土壤溶液中盐分浓度的大小和作物受盐胁迫的程度。图 2A~F 显示了处理 A、D 不同时期 20、40、60、100、140 和 180 cm 处土壤溶液的电导率变化情况。从图 2 可以看出: 试验前, 处理 A、D 各层土壤溶液的电导率均在  $3.5 \sim 4 mS \cdot cm^{-1}$  左右。但是, 由于灌溉水水质的差异, 随着试验的进行和连续使用微咸水, 处理 A 各层土壤溶液的电导率明显高与处理 D 相应土层土壤溶液的电导率。淡水灌溉条件下 (处理 D), 尽管土壤溶液的电导率随季节转变和土壤水分状况的变化也有一定的变化, 但各土层土壤溶液的电导率一般在  $4 mS \cdot cm^{-1}$  左右浮动, 很少超过  $7 mS \cdot cm^{-1}$ 。

处理 A 在第 1 次使用微咸水灌溉 (左数第 2 次灌溉, 第 1 次是越冬期使用的淡水) 后 1 星期, 0~20

cm 土壤溶液的电导率即迅速从  $4.28$  上升到  $11.38 mS \cdot cm^{-1}$ , 约是同时间处理 D 相应土层溶液电导率的 2.5 倍。2000 年秋季前的大多数时间内的电导率均在  $7 mS \cdot cm^{-1}$  以上。由于不同深度土壤受外界影响不同, 不同深度土层盐分的增加速度也不相同。3 次微咸水灌溉后 (约在第 1 次微咸水灌溉 6 个月后) 40 cm 深度处土壤溶液的电导率上升到  $10 mS \cdot cm^{-1}$ ; 第 1 次微咸水灌溉 1 年后 60 和 80 cm 深度土壤溶液的电导率上升到  $10 mS \cdot cm^{-1}$ ; 而 100 cm 以下各土层土壤溶液的电导率尽管也略有上升, 但在极端多雨的 2000-07 之前, 基本都稳定在  $5 mS \cdot cm^{-1}$  左右。由此可见, 一般情况下, 受微咸水灌溉影响的主要是 0~100 cm 以内的各土层。只有在水分非常丰富的条件下 (如 2000-06—10, 总降雨量达 579 mm, 一次降雨的最大降雨量达 333 mm), 100 cm 以下各土层的水盐状况才会受到显著的影响。总的来看, 微咸水灌溉 2 年后, 100 cm 以下土层中土壤溶液的电导率与淡水灌溉处理的差异一般不超过  $2 mS \cdot cm^{-1}$ , 40~80 cm 土层溶液电导率的差异一般可达  $5 \sim 7 mS \cdot cm^{-1}$ ; 0~20 cm 土层由于受外界的影响较大, 差异变化也较达, 降雨后差异较小, 土壤中水分严重消耗后最大差异可达到  $8 \sim 10 mS \cdot cm^{-1}$ 。

盐渍土剖面的一个显著特点是盐分的表聚现象<sup>[1]</sup>。但是, 本试验的结果表明, 灌溉微咸水土壤溶液的最大电导率一般并不是表层 (0~20 cm), 而是亚表层 (20~60 cm)。例如, 1999-06—2000-06, 处理 A 表层 (0~20 cm) 土壤溶液的电导率为  $6 \sim 12 mS \cdot cm^{-1}$ ; 20~40 和 40~60 cm 土层的电导率分别为  $10 \sim 20$  和  $7 \sim 14 mS \cdot cm^{-1}$ , 1999-09—2000-06 12 次测定的 20、40、60、80、100、140 和 180 cm 深度处土壤溶液的平均电导率分别为 9.26、14.3、13.4、11.4、7.06、5.96 和  $5.95 mS \cdot cm^{-1}$ 。这主要是由于农田中茂密的植被和各种农艺措施的影响, 土壤水分的损失主要是通过植物的蒸腾作用, 直接通过土壤表面蒸发散失的水分十分有限; 同时, 灌溉和自然降水不断将表层土壤的盐分向下淋洗。而典型的盐渍土一般植被覆盖率较低, 地下水的埋藏深度相对较浅, 主要是通过毛管上升水的蒸发作用扩散到大气中的, “气散盐存”的过程造成了盐分表聚典型剖面。

2000-07-07 降水 242.2 mm, 使 0~40 cm 土层中的盐分基本淋出。0~20 和 20~40 cm 土层土壤溶液的电导率都基本恢复到甚至低于微咸水灌溉前的水平; 而 60 cm 土壤溶液的电导率仍然显著地高于

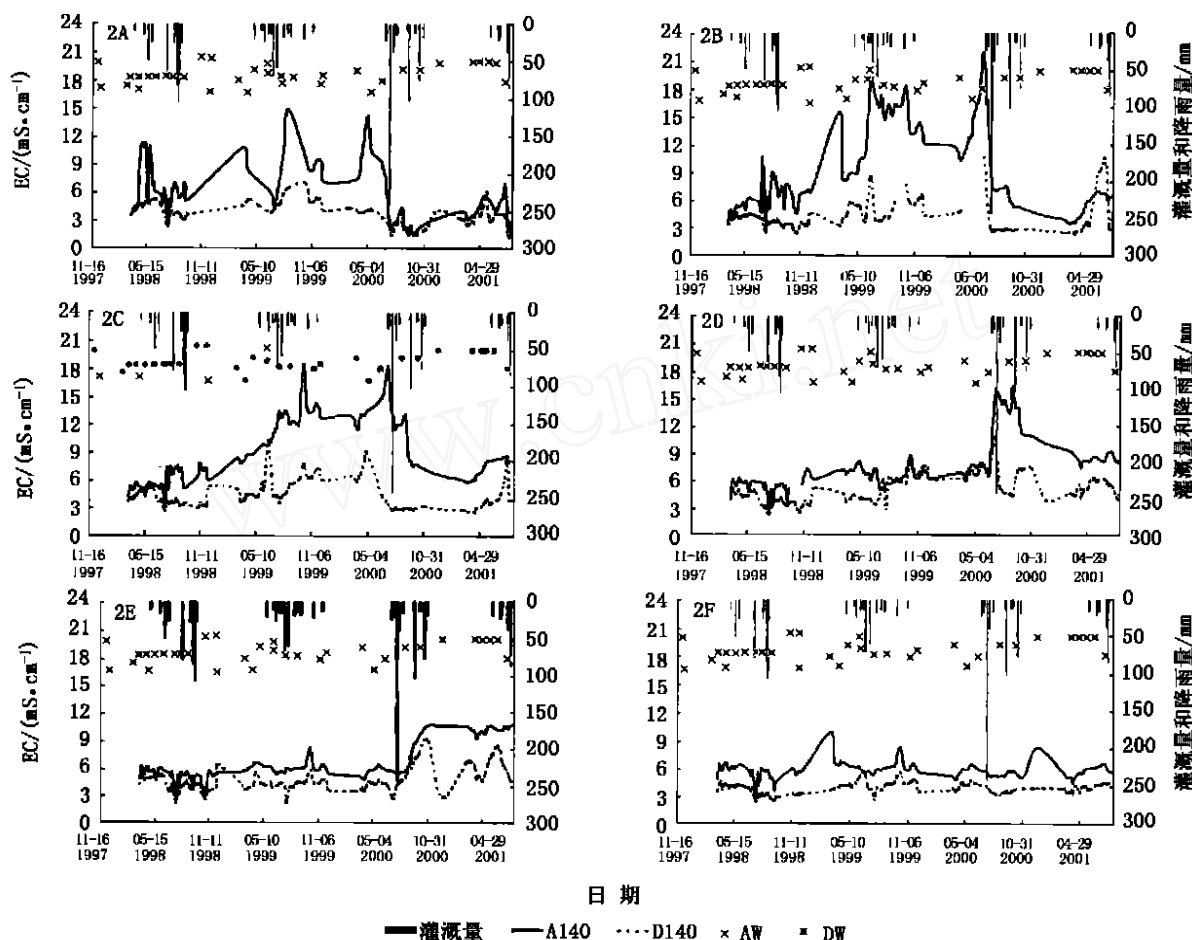


图2 不同灌溉水质条件下土壤溶液电导率的对比

Fig. 2 The EC of the soil solution at different soil depth of treatment A and D

(A20 和 D20 分别表示处理 A、D 在 20 cm 深土层的土壤提取液的电导率, Aw 和 Dw 分别表示处理 A、D 的灌溉量和灌溉时间)

处理 D 同一土层溶液的电导率和试验前的电导率。由此可见,一次供给 250 mm 左右淡水,可淡化的土层深度大约为 50 cm。

另外,2000 年夏秋季节丰富的降水迅速改变了整个土体的盐分状况:在 0~100 cm 以内各层土壤溶液电导率降低的同时,100~140 cm 土层土壤溶液的电导率从  $5.5 \sim 6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  上升到  $10 \sim 11 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。这是因为上层土壤中的盐分被水分冲洗到该层,导致盐分在土壤中大量积累,溶液电导率迅速升高。2000-07-07 第 1 次的大雨后,60~100 cm 土层也发生了类似现象,但是,随后的 2 次大雨的淋洗,将大多数盐分冲洗到 100~140 cm 的深度。由于深层土壤中的水分运动过程比较缓慢,大多数盐分很难被淋出 140 cm 深的土体。由此可见,在一个生长季节内,770 mm 的水分(2000-06-10 的降水量和灌溉量分别为 579 和 195 mm)可淋洗的土壤深度大约为

150 cm。受该季降水的影响,试验地地下水位埋深上升到 2 m 左右,接近临界深度。在毛管上升水和土壤水分状况恶化、土壤溶液浓缩的综合影响下,2001 年春天,处理 A、D 的 0~60 cm 土壤溶液的电导率均出现了上升现象。

由于灌溉、降雨等外界因子和土壤中水分的消耗过程的影响,0~60 cm 土壤的干湿交替十分频繁,土壤溶液电导率随季节更替、降雨和灌溉有规律地波动。趋势可分为 2 种:一是受季节更替影响的长期波动;二是受灌溉和降雨过程影响的短期波动。就短期变化来说,土壤溶液的电导率在灌溉和降雨后由于土壤水分的增加和盐分的淋洗而降低;在下次灌溉或降雨前,随土壤水分的消耗和土壤溶液的浓缩而增大。从长期波动来看,由于研究区域的不同季节间干湿变化比较明显,随着干湿季节的交替,每年 6—11 月由于雨水的淋洗,土壤溶液的电导

率随盐分的淋失逐渐降低;每年 12 月到次年 6 月初,随着土壤水分状况的恶化土壤溶液的电导率逐渐升高。在农田中,由于各种农艺措施的影响,盐分的长期波动在一个年分内并不十分明显,只有在多年的变化趋势中才能比较明显地表现出来。由于不同层次土壤受外界影响大小不同,本研究的 7 个土层的盐分状况大致可分为 3 类:1) 强烈变动型(0~20 cm),表层土壤受外界条件的影响最大,随土壤的干湿交替,土壤溶液的稀释和浓缩,其电导率迅速变化;2) 逐渐积累型(20~80 cm),一般的降水过程和常规的灌溉不足以将土壤中的盐分洗出土体,土壤盐分在某些层次中逐渐积累下来,土壤溶液的电导率逐渐上升;3) 相对稳定型(100 cm 以下各土层),一般的降水过程和常规的灌溉用水量很难影响的土

层,土壤中的盐分含量相对稳定。

### 2.3 不同灌溉措施对作物产量的影响

作物产量是评价各种因子对作物胁迫作用大小的最重要指标。本文用的相对产量( $CRY$ )可直接衡量各种灌溉措施对经济产量的综合影响:

$$CRY = 100 \times Y_i / Y \quad (1)$$

式中: $Y$ 为当年水肥适宜下作物的产量; $Y_i$ 为限制因子 $i$ 存在条件下的产量。当 $CRY$ 大于(小于)100时,说明该因子在研究的水平上有益于(不利于)产量的提高; $CRY$ 与100的差的直接反映了不同因子在研究水平上对作物产量影响的大小和方向。表3列出了各处理冬小麦和夏玉米不同时期的产量和相对产量。

表3 不同处理冬小麦和夏玉米的实际产量及相对产量

Table 3 Actual and relative yields of winter wheat and summer maize during past years

| 项 目 | 实际产量/<br>(kg $\cdot$ hm $^{-2}$ ) | 相对<br>产量/ % | 实际产量/<br>(kg $\cdot$ hm $^{-2}$ ) | 相对<br>产量/ % | 实际产量/<br>(kg $\cdot$ hm $^{-2}$ ) | 相对<br>产量/ % | 实际产量/<br>(kg $\cdot$ hm $^{-2}$ ) | 相对<br>产量/ % |
|-----|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
|     | 1997—1998 年小麦                     |             | 1998 年玉米                          |             | 1998—1999 年小麦                     |             | 1999 年玉米                          |             |
| A   | 6 532                             | 94.2        | 10 364.8                          | 105.1       | 7 173.8                           | 88.1        | 5 651.5                           | 77.6        |
| B   | 5 643                             | 81.4        | 9 460.8                           | 96.0        | 5 943.5                           | 73.0        | 4 842.8                           | 66.5        |
| C   | 7 074                             | 102.1       |                                   |             | 6 605.0                           | 81.1        | 6 875.0                           | 94.4        |
| D   | 6 931                             | 100.0       | 9 858.1                           | 100.0       | 8 147.0                           | 100.0       | 7 281.6                           | 100.0       |
| E   | 6 513                             | 94.0        |                                   |             |                                   |             | 6 416.8                           | 88.1        |
| F   | 6 485                             | 93.6        | 10 977.1                          | 111.4       | 7 680.9                           | 94.3        | 6 698.8                           | 92.0        |
|     | 1999—2000 年小麦                     |             | 2000 年玉米                          |             | 小麦平均产量                            |             | 玉米平均产量                            |             |
| A   | 8 947.7                           | 91.9        | 8 587.3                           | 90.6        | 7 551.3                           | 91.3        | 8 201.2                           | 92.4        |
| B   | 7 905.8                           | 81.2        |                                   |             | 6 497.3                           | 78.5        | 7 151.8                           | 80.5        |
| C   | 8 737.5                           | 89.7        | 8 074.5                           | 85.2        | 7 472.3                           | 90.3        | 7 474.8                           | 84.2        |
| D   | 9 740.0                           | 100.0       | 9 481.5                           | 100.0       | 8 272.8                           | 100.0       | 8 873.7                           | 100.0       |
| E   | 4 576.8                           | 47.0        | 9 469.3                           | 99.9        | 5 544.9                           | 67.0        | 7 943.0                           | 89.5        |
| F   | 7 691.1                           | 79.0        |                                   |             | 7 285.6                           | 88.1        | 8 838.0                           | 99.6        |

从表3看出:在连续的6个生长季节内,雨养处理冬小麦和夏玉米的平均产量分别只有充足灌溉处理的67%和89.5%;而同期使用微咸水灌溉量较大的处理A的相对产量则分别达到了91.3%和92.4%,微咸水灌溉量较小的处理C也达到了90.3%和84.2%。由于1999—2000年冬小麦生长季节内降雨量仅26.4 mm,即使在连续5个生长季节内使用微咸水,处理A当年冬小麦的产量仍然达到了等量淡水处理的90%左右,是雨养处理产量的近2倍。由于冬小麦生长季节内比较干旱,水分胁迫比较严重,微咸水灌溉有效地缓解了冬小麦的水分胁迫,其产量水平远较不灌溉的处理高,连续3年

内使用微咸水灌溉,在灌溉量较大的条件下,由于盐分积累所造成冬小麦的平均产量损失大约在10%左右。玉米的生长季节恰逢研究地区降水比较丰富的时期,自然降雨过程淋洗了部分的盐分,部分缓解了盐分胁迫造成的产量损失,3年内平均产量损失约在10%~15%之间,与不灌溉的处理相当。

一般认为,当土壤饱和浸提液的电导率( $EC_e$ )超过4 mS  $\cdot$  cm $^{-1}$ 时,土壤即发生轻度盐渍化现象<sup>[1]</sup>。冬小麦是中度耐盐作物,当 $EC_e$ 超过6 mS  $\cdot$  cm $^{-1}$ 时,每上升1 mS  $\cdot$  cm $^{-1}$ ,冬小麦的产量减少7%;<sup>[5]</sup>玉米对盐分胁迫比较敏感,当 $EC_e$ 达到1.7、2.5、3.8和5.9 mS  $\cdot$  cm $^{-1}$ 时,玉米的产量损失分别大约为0、

10 %、25 %和 50 %<sup>[6]</sup>;而玉米所能忍受的最大  $EC_e$  值为  $10 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。但是,本试验结果表明:即使当土壤溶液的电导率长期高达  $9 \sim 20 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,处理 A 的小麦产量仍达处理 D 的 90 %左右,玉米产量也可以达到处理 D 的 77.6 %。这种差异主要是由采样和测定方法的不同所引起的。本研究测定的是原位土壤提取液,而文献中比较常见的  $EC_e$ 、 $EC1 \ 1$  和  $EC1 \ 5$  是在实验室中用风干土样加水至饱和或适当比例测定的。而实际上,旱地土壤水分一般不会达到饱和状态,更不可能达到土水比 1:1 或 1:5 的水平。用  $EC_e$ 、 $EC1 \ 1$  和  $EC1 \ 5$  表示的土壤盐分状况低估了作物对盐分的忍耐力,或者高估了盐分的胁迫水平。因此,有学者建议用田间收集土壤原液的电导率( $EC$ )或用电极法在土壤原位观测的电导率<sup>[7,8]</sup>作为作物受害指标。

由于 0 ~ 20 cm 土壤溶液的电导率受外界的影响而变化较大,而 20 ~ 60 cm 土壤溶液的电导率在一个生长季节内相对稳定,可用 20 ~ 60 cm 土壤溶液的电导率大致确定冬小麦和夏玉米不同盐分条件下的产量损失。对比表 3 和图 2 可以看出:当 20 ~ 60 cm 土壤溶液的电导率在  $8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  以下时,对夏玉米的产量无显著影响(1998 年结果);当电导率长期维持在  $10 \sim 15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  之间且当季的降雨相对较少时,玉米产量将显著降低(1999 年结果)。土壤

溶液电导率长期维持在  $12 \sim 15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  之间,在灌溉量较大的条件下,盐分胁迫所造成的冬小麦产量损失一般在 10 %左右,不超过 15 %。

## 参 考 文 献

- [1] 石元春、辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理[M]. 石家庄:河北人民出版社,1983
- [2] Fang S, Chen X. Using shallow saline groundwater for irrigation and regulation for soil salt-water regime [J]. Irrigation and Drainage Systems, 1997, 11:1 ~ 14
- [3] Fang Sheng, Wolter H W. The "four water" concept in China [M]. GRID Issue 2, 1993
- [4] Fang Sheng, Xuefeng S. Effective approaches for relaxing the crisis of groundwater. Proceedings of the Workshop on Water Management: India's Groundwater Challenge. Ahmedabad. 1993
- [5] 谢承陶. 盐碱土的改良和作物的耐盐性[M]. 北京:北京农业大学出版社,1993
- [6] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements[M]. FAO irrigation & drainage paper 24. Rome. 1977, 76 ~ 81
- [7] Rhoades J D, Chanduvi F, Lesch. S. Soil salinity assessment, Method and interpretation of electrical conductivity measurements[A]. FAO irrigation and drainage paper 57. Rome, 1999
- [8] 李韵珠, 王文新. 四极电导率仪在盐渍土上的应用[A]. 见:石元春主编. 盐渍土的水盐运动[C]. 北京:北京农业大学出版社,1986