

# 作物对盐分的吸收及其 盐害的预测预报\*

李加宏 俞仁培

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

**摘要** 通过温室和田间试验,研究小麦和甜菜在盐胁迫下的生长及其对盐分的吸收。结果表明,小麦耐盐性略低于甜菜;Na<sup>+</sup>抑制小麦和甜菜对K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>的吸收;小麦和甜菜的相对干物质重与土壤含盐量的关系符合Maas-Hoffman模型;小麦和甜菜叶Na<sup>+</sup>含量与土壤含盐量呈显著正相关,且与干物质重的关系也符合Maas-Hoffman模型。文中提出了利用作物叶的Na<sup>+</sup>含量与相对干物质重之间的Maas-Hoffman模型监测与诊断作物盐害的方法,并且较理想地对田间小麦和甜菜的盐害进行了预测预报。

**关键词** 小麦,甜菜, Maas-Hoffman模型, 盐害预报

**中图分类号** S156.4

全球现有盐渍土  $9.55 \times 10^8$  公顷<sup>[1]</sup>。在灌区,土壤盐渍化面积正以惊人的速度发展<sup>[2]</sup>。土壤盐渍化已成为一个世界性的问题<sup>[3]</sup>。为使盐渍土有更多的产出,解决人口增加与粮食需求之间的矛盾,不少学者从事盐渍土的研究,除了改良盐渍土以适应作物的生长,另一方面也加紧研究作物的耐盐性以进行适应种植。Maas 和 Hoffman 在研究了作物耐盐性与土壤含盐量的关系后,于 1977 年提出了作物耐盐性与土壤含盐量关系的 Maas-Hoffman 模型<sup>[4]</sup>。Van Genuchten 和 Hoffman 于 1984 年采用非直线最小二乘法回归,对 Maas-Hoffman 模型中参数的求法进行了改进<sup>[2]</sup>。Caro 和 Cruz 等(1991)发现,西红柿叶、茎干重及株高与培养基的 EC<sub>s</sub> 关系也符合上述模型。但是,其结果随所选参数而变。在用 EC<sub>s</sub> 与产量关系评价两种不同耐盐性西红柿时,耐盐性高的西红柿模型斜率低于耐盐性低的。当用 EC<sub>s</sub> 与植株叶、茎干重和株高的关系评价二者的耐盐性时,则它们的斜率相似<sup>[5]</sup>。Rush 和 Epstein(1981)曾建议,用西红柿叶片中 Na<sup>+</sup> 的累积量为耐盐性的指标<sup>[6]</sup>。国内尚少这方面的研究,有关利用作物含盐量进行盐量预测预报的报道更少。本文作者对小麦和甜菜的盐分吸收特性及其与耐盐性的关系进行了比较研究,提出利用作物叶片中 Na<sup>+</sup> 含量与相对干物质重建立的 Maas-Hoffman 模型,可以监测、诊断叶中 Na<sup>+</sup> 含量,从而预测预报作物遭受盐害的程度。

\* 中国科学院南京土壤研究所所长基金(No. 5930503)资助。

收稿日期:1996-09-11; 收到修改稿日期:1997-12-22

# 1 材料与方 法

## 1.1 供试土壤

采自河南封五县,发育于黄河冲积物的非盐化潮土,其 < 0.01mm 的物理性粘粒含量为 33.6%。土壤的化学性质见表 1。

表1 供试土壤的化学性质

Table 1 Chemical properties of the tested soil

pH	EC (s/m)	全盐 Total salt (g/kg)	离子组成 (cmol/kg) Ionic composition (cmol/kg)							
			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
8.44	0.015	0.74	0.59	0.03	0.06	0.02	0.01	0.21	0.38	0.25

## 1.2 供试作物

小麦品种为“85 中 33”;甜菜为“工农 301”,分别由河南省和山西省农科院提供。

## 1.3 温室作物耐盐试验

用直径 15cm、高 18cm 的盆钵,按容重 1.5g/cm<sup>3</sup> 分层装入 15cm 高土壤。根据表 2 处理方案准确加入不同 NaCl 含量的溶液。同时每盆加入尿素 0.85g、磷酸二铵 0.34g。由插入盆钵的玻璃管供蒸馏水,保持各处理水分相同。每盆定苗 8 株。小麦试验周期为 1993 年 4 月 1 日至 5 月 13 日。甜菜为 1993 年 3 月 25 日至 5 月 19 日。试验重复三次。

表2 温室作物耐盐试验处理

Table 2 Treatments of the greenhouse experiment for salt tolerance of crops

	处 理 Treatment					
小 麦	GW <sub>0</sub>	GW <sub>1</sub>	GW <sub>2</sub>	GW <sub>3</sub>	GW <sub>4</sub>	GW <sub>5</sub>
甜 菜	GS <sub>0</sub>	GS <sub>1</sub>	GS <sub>2</sub>	GS <sub>3</sub>	GS <sub>4</sub>	GS <sub>5</sub>
土壤 NaCl 加入量 (g/kg 土)	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
土壤总含盐量 (g/kg 土)	0.74	1.74	2.24	2.74	3.24	3.74

注: G-Greenhouse (温室); W-Wheat (小麦); S-Sugar beet (甜菜)。

## 1.4 田间灌溉试验

将内径 49cm、高 108cm 底部密封的特制水泥管 24 根埋入土中。内衬特制的密封塑料袋。底层装入 13cm 高细石子,上垫玻璃丝布一层,然后按土壤容重 1.5g/cm<sup>3</sup> 分层装土 85cm,其中表层 20cm 混施磷酸二铵 3.7g、尿素 9.0g。每管共用土 238kg。土柱中央插入内径 4cm、底端 13cm 打孔的塑料管,以备供水灌溉。试验设(1)对照(2)2g/L NaCl(3)4g/L NaCl(4)不种作物用 2g/L NaCl 水重复三次。

1.4.1 小麦试验 每个土柱插种 200 粒,定苗 100 株。根据小麦需水规律,分期供水。小麦成熟后按 0—10、10—20、20—40、40—60、60—85cm 分层采取土样和根样。同时分别采集茎、鞘、叶、颖、籽粒样品。试验周期为 1992 年 11 月 4 日至 1993 年 6 月 1 日。

1.4.2 甜菜试验 每个土柱插种球 40 粒,定苗 8 株。分别在块根分化形成期、叶丛快速生长期、块根及糖分增长期采集植株地上与地下部样品。定苗时作为第一次采样,其后每次对半取植株。试验期间,保持表层 40cm 土壤含水量为饱和持水量的 50% 左右。甜菜收获时,分别采集叶、枯叶、根样。同时按 0—

10、10—20、20—40、40—60、60—85cm 分层采集土样。试验周期为 1993 年 5 月 30 日至 10 月 30 日。试验在中国科学院封丘生态农业试验站完成,为防降水淋入,建有简易防雨棚。

### 1.5 土壤和植株样品分析方法

土壤可溶盐采用水土比 5:1 浸提液;  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  用容量法<sup>[7]</sup>;  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  用离子色谱法; 植株用湿灰化法制备待测液;  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  用火焰光度计测定;  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  用原子吸收法测定;  $\text{Cl}^-$  用水浸提—氯离子电极电位滴定法<sup>[8]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小麦和甜菜的耐盐性

作物的耐盐性不仅因作物种类不同而异,且同一作物的不同品种之间也有很大差异,而且还受环境与栽培条件的影响。因此,无法用一个绝对指标来评价作物的耐盐性。本研究用盐渍土和非盐渍土上作物的生长量和产量之比为相对指标。

试验表明,随着土壤含盐量增加,小麦相对发芽率逐渐降低;甜菜的相对发芽率在土壤含盐量小于 1.8g/kg 时略有增加,大于此值开始下降。土壤含盐量相同时,甜菜的发芽

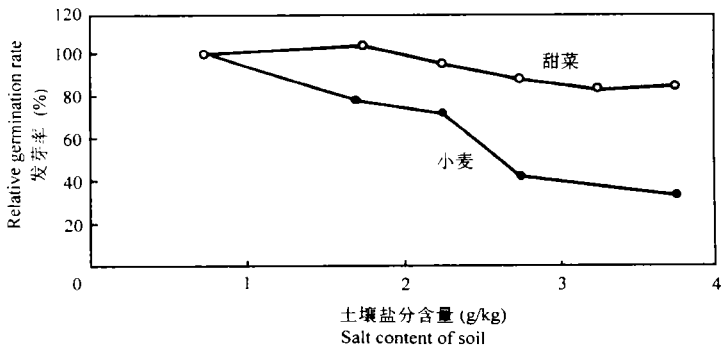


图 1 小麦和甜菜的相对发芽率随土壤含盐量的变化

Fig.1 Changes of relative germination rate of wheat and sugar beet with salt contents of the soil

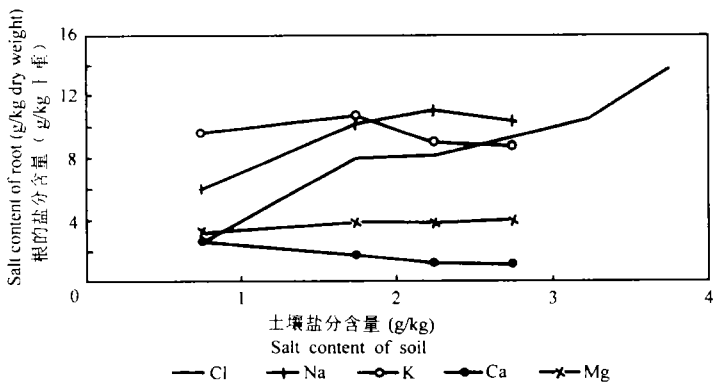


图 2 小麦根中盐分含量随土壤含盐量的变化

Fig.2 Changes of salt content in the roots of wheat with salt contents of soil

率明显大于小麦(图1)。二者的叶片数、根长、株高和干物质重的变化与发芽率相似。

## 2.2 作物含盐量随土壤含盐量的变化

2.2.1 小麦 盆栽试验结果(图2)表明,随着土壤含盐量的增加,小麦根中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  含量明显增加,  $\text{K}^+$  则降低,  $\text{Mg}^{2+}$  略有增加,而  $\text{Ca}^{2+}$  有所降低。叶片中离子的变化趋势类似根,但  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  保持不变。

2.2.2 甜菜 如图3所示,随着土壤含盐量的增加,甜菜根、叶中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  含量明显增加,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  降低,  $\text{Ca}^{2+}$  在根中保持不变,在叶中降低,但  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的下降幅度均较小。

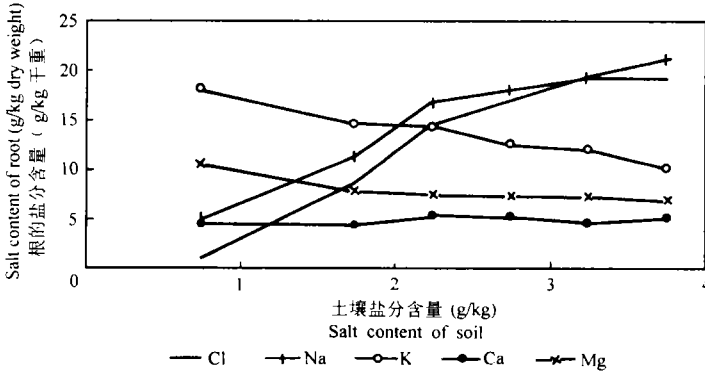


图3 甜菜根中盐分含量随土壤含盐量的变化

Fig.3 Changes of salt content in the roots of sugar beet with salt contents of soil

众所周知,  $\text{Na}^+$  与  $\text{K}^+$  存在颞抗关系,  $\text{Na}^+$  抑制  $\text{K}^+$  的吸收<sup>[9,10]</sup>。小麦和甜菜的根、叶中  $\text{Na}^+$  含量随土壤含盐量的增加而增加,  $\text{K}^+$  含量则相应地降低。由图2可以看到,在土壤含盐量略有增加时,小麦根、叶中  $\text{K}^+$  含量却有所提高。其原因可能有二:一是在低盐浓度下,  $\text{K}^+$  优先被根吸收,不受  $\text{Na}^+$  抑制,而  $\text{K}^+$  总是抑制  $\text{Na}^+$  的吸收<sup>[11]</sup>;二是中低浓度的  $\text{Cl}^-$  促进小麦对  $\text{K}^+$  的吸收,高浓度的  $\text{Cl}^-$  抑制  $\text{K}^+$  的吸收<sup>[12]</sup>,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  也存在颞抗关系,  $\text{Na}^+$  抑制  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收<sup>[10,13]</sup>。不过,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  颞抗关系没有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  明显。然而,本试验中,小麦和甜菜根中  $\text{Ca}^{2+}$  随土壤含盐量的增加基本不变,原因是供试土样是含有  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  的石灰性潮土,随着土壤中  $\text{NaCl}$  含量的增加,土壤中阳离子交换和  $\text{NaCl}$  引起的盐效应使土壤水溶性  $\text{Ca}^{2+}$  增加,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的增加反过来抑制  $\text{Na}^+$  的吸收,部分或全部地抵消了  $\text{Na}^+$  对  $\text{Ca}^{2+}$  吸收的抑制作用。

## 2.3 作物耐盐的 Maas-Hoffman模型和作物盐害的预测预报

2.3.1 作物盐害的 Maas-Hoffman模型 Maas 和 Hoffman 二人于 1977 年提出的模型中,土壤含盐量是以饱和泥浆的电导率( $\text{ds/m}$ )表示,由于我国一直沿用土壤盐分总量( $\text{g/kg}$ ),而饱和泥浆电导率和盐分总量之间存在显著的相关性。所以,为与以前资料对比,本文仍用土壤盐分总量。表3的统计结果表明,小麦和甜菜的相对干物质重与土壤含盐量的关系符合 Maas-Hoffman模型。小麦的耐盐临界值和耐盐斜率均大于甜菜,通常认为甜菜的耐盐性大于小麦,本试验结果表明,甜菜的耐盐性略大于小麦。这是由于在温室作耐盐性试验中,甜菜采样时正处于耐盐性较低的叶丛快速生长期。

表3 土壤含盐量与作物相对干物质之间的Maas-Hoffman模型

Table 3 Maas-Hoffman model for the relationship between the relative dry weight of crop and the salt content of soil

作物 Crop	Maas-Hoffman模型 Maas-Hoffman model	相关系数 Correlation coefficient
小麦	$y=1-0.3627 \times (x-1.3400)$	-0.9953**
甜菜	$y=1-0.2895 \times (x-1.2597)$	-0.9844**

注:  $y$ -相对干物质重(%);  $x$ -土壤含盐量(g/kg)

2.3.2 作物盐害的预测预报 小麦叶中所含  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  量,甜菜叶和根中所含  $\text{Na}^+$  量与土壤含盐量存在线性相关关系(表4),因此小麦叶  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量的高低能够反映土壤含盐量高低。同时,小麦叶  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量与相对干物质重之间的关系符合 Maas-Hoffman 模型。因而通过测定小麦叶中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量与相对干物质重之间的关系,即能评价小麦的耐盐性。同理,测定甜菜叶  $\text{Na}^+$  量与相对干物质重之间的关系亦可评价甜菜的耐盐性。

表4 作物含盐量与土壤含盐量之间的线性关系

Table 4 Linear relation of salt content between crop and soil

$x$ (g/kg)	$y$ (g/kg干物质)	$y=bx+a$	相关系数
	$y$ (g/kg dry wt.)		Correlation coefficient
土壤 含盐量	小麦叶Na含量	$y=4.7997x-3.3696$	0.9656**
	小麦叶Cl含量	$y=11.0303x+3.3104$	0.9736**
	甜菜叶Na含量	$y=15.2363x+19.3080$	0.9405**
	甜菜根Na含量	$y=5.3791x+2.2559$	0.9695**

上述作物叶中  $\text{Na}^+$  含量与相对干物质重之间的关系符合 Maas-Hoffman模型;说明随着土壤含盐量增加,作物叶中  $\text{Na}^+$  含量呈直线增加,在叶  $\text{Na}^+$  含量超过叶的耐盐临界值( $a$ )之前,对作物无任何伤害,作物产量(总生物量,下同)保持不变。当超过临界值后,作物产量将以斜率  $b$  的速度随叶  $\text{Na}^+$  含量的增加而直线下降。作物的耐盐性取决于作物本身的遗传特性和环境条件。在环境条件相对稳定的条件下,作物的耐盐模型是相对稳定的。通过试验建立作物的耐盐模型后,可利用该模型去监测、诊断和预测预报作物受盐害

表5 田间试验小麦相对产量实测值和预报值

Table 5 Measured and predicted relative yields of wheat in the field experiment

项 目 Item	处理 Treatment		
	FW <sub>1</sub>	FW <sub>2</sub>	FW <sub>3</sub>
籽粒重(g/10株)	7.93	7.33	6.73
相对产量实测值(%)	100	92.43	84.87
叶Na含量(g/kg干物质重)	0.60	2.55	3.63
相对产量预报值(%)	100	89.97	83.65
预报相对误差(%)	0	2.66	1.44
平均预报相对误差(%)		1.37	

注: FW为田间小麦试验。

表6 田间试验甜菜相对干物质质量实测值与预报值(叶丛快速生长期)

Table 6 Measured and predicted relative dry weights of sugar beet in the field experiment

(Leaf rapid growth period)

项 目 Item	处理 Treatment		
	FS <sub>1</sub>	FS <sub>2</sub>	FS <sub>3</sub>
干物质重(g/10株)	132.75	123.34	90.69
相对干物质重实测值(%)	100	92.91	68.32
叶Na含量(g/kg干物质重)	49.06	53.10	58.65
相对干物质重预报值(%)	97.47	85.83	68.70
预报相对误差(%)	2.53	8.10	0.55
平均预报相对误差(%)		3.73	

注: FS为田间甜菜试验。

程度,从而采取有效措施克服或避免盐分对作物为害。

根据温室作物耐盐试验结果,分别建立了小麦和甜菜叶中 Na<sup>+</sup> 含量和相对干物重之间的 Maas-Hoffman模型。用这两个模型对田间试验小麦相对产量和甜菜叶丛快速生长期相对干物质重进行预测预报,预报和实测结果见表 5、6。小麦预报的平均相对误差仅为 1.37%,甜菜为 3.73%,可谓理想。由于甜菜是在叶丛快速生长期建立的模型,此时的耐盐性与收获时有很大差异,故对甜菜最终产量的预测应另建模型。

## 参 考 文 献

1. United Nations Environ. Programme. Status of desertification and implementation of UN plan of action to combat desertification. UNEP, Nairobi, Kenya. 1991
2. Van Genuchten M T, Hoffman G J. Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg I Shalhevel J. eds. Soil Salinity under Irrigation, Ecological Studies. Vol.8, Berlin: Springer-Verlag, 1984. 258—271
3. Szabolcs I. Salt-affected Soils. CRC Press Inc., 1989
4. Rush D W, Epstein E. Comparative studies on the sodium, potassium and chloride relations of a wild halophytic and domestic salt-sensitive tomato species. Plant Physiol., 1981, 68:1308—1313
5. Caro M, Craz V et al. Salinity tolerance of normal fruited and cherry tomato cultivars. Plant and soil, 1991, 136:249—255
6. Maas E V, Hoffman G J. Crop salt tolerance: current assessment. J. Irrig. Drainage. Div., American Society of Civil Engineers. 1977, 103(IRZ):116—134
7. 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海科学技术出版社, 1978
8. 周秀如, 李仲林, 凌云霄, 曹志洪. 微机电位自动滴定系统测定烟叶中氯. 见: 曹志洪主编. 优质烤烟生产的土壤与施肥. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991. 261—264
9. 章文华, 刘友良. 盐胁迫下钙对大麦和小麦离子吸收分布及 H<sup>+</sup>-ATP酶活性的影响. 植物学报, 1993, 35(6): 435—440
10. Cramer G R, Lauchli A, Polito V S. Displacement of Ca<sup>2+</sup> by Na<sup>+</sup> from the plasmalemma of root cells. Plant Physiol., 1985, 79:207—211
11. 刘友良等. 植物耐盐性研究进展. 植物生理学通讯, 1987, (4): 1—7
12. 黄建国, 袁玲. 大麦和小麦吸收 Cl<sup>-</sup>、HPO<sub>4</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup> 的动力学研究. 土壤通报, 1989, (1): 37—40
13. 辛景峰, 张国印, 李韵珠. 土壤盐渍度不同表示方法的比较和相关研究. 见: 石元春, 李韵珠, 陆锦文等著. 盐渍

土的水盐运动. 北京农业大学出版社, 1986. 151—161

## SALT UPTAKE OF CROPS AND THE PREDICTION OF SALT INJURIES TO CROPS

Li Jia-hong Yu Ren-pei

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008*)

### Summary

The growth of wheat and sugar beet under salt stress and their uptake of salt were studied through greenhouse and field experiments. The salt tolerance of wheat was lower than that of sugar beet.  $\text{Na}^+$  inhibited the uptake of  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$ . The relations between relative dry weight of wheat and sugar beet and soil salt content confirmed to the Maas-Hoffman model.  $\text{Na}^+$  contents in leaves of wheat and sugar beet had positive linear relations with the salt content of soil. Their relations with the relative dry weight of the crops also confirmed to the Maas-Hoffman model. According to these results, on the basis of Maas-Hoffman model between the  $\text{Na}^+$  content in leaves and the relative dry weight of crop, a method for the dynamic monitoring, diagnosis and prediction of salt injuries to crops was proposed. The predicted results about salt injuries to wheat and sugar beet in fields are satisfactory by this method.

**Key words** Wheat, Sugar beet, Maas-Hoffman model, Prediction of salt injury