

棉桃重平均多22.1克。三是运用远缘杂交和砧木芽接培育耐盐树种或果树。例如最近国外成功培育了一种比杨树更高度耐盐的“保普莱尔—托兰格”杂交种。利用酸橙和桔树砧木芽接出的朱栾树比生长在酸橙砧木上的朱栾树耐盐力强得多。

由于大多数作物早期发芽阶段抗盐力弱,因此国外比较重视用播前处理种子办法提高作物耐盐力。苏联学者金克尔甚至认为用盐水或其它方法处理的种子,其所增强的耐盐力甚至可以传给其后代。国外种子处理的方法大致有:(1)盐水浸种(包括用地下水)。可广泛用于棉花、苜蓿、玉米、大豆、蚕豆、甜菜、小麦等作物。其主要特点是针对性强。如以氯化物为主的盐土,则常用氯化钠配成不同浓度的溶液浸种;以硫酸盐为主的盐土使用硫酸镁溶液;含碳酸盐的碱土则用碳酸钠浸种。使用的浓度各有不同,从国外一些资料看出,盐水浓度大则浸泡时间短些,浓度小者浸泡时间可长一些。(2)使用各种有机酸、生长抑制剂、激素等处理种子:如印度试验用吡啶乙酸、赤霉素、吡啶丁酸等浸泡小麦(浓度不超过200ppm),显著提高了小麦的耐盐、耐硼、耐钠的能力,使小麦能生长在电导率为12毫姆欧/厘米,吸附性钠比率为15、含硼量为

2—4ppm的盐土上。又据报道,国外也使用含500ppm的矮壮素(氯化氯胆碱)溶液处理小麦种子14小时,也能提高小麦耐盐力。还有的用一些化学名称不详的Amo1618、Phofon、GS等生长抑制剂来浸种,认为都能增加作物抗盐性。此外,近年来国外还报道过某些代谢抑制剂,如叠氮化钠可以使作物减少对氯的吸收;亚砷酸盐和硝化糖醛可以使作物减少对氯的吸收。但这些物质是否可用于种子处理?对人体是否有害?都还未进一步试验研究。

## 参 考 文 献

- [1] Allison, L. E., Salinity in relation to irrigation. *Advances in Agronomy*, Vol. 16, 139—173, 1964.
- [2] Salinity Problems in the Arid Zones. UNESCO, Proceedings of the Teheran Symposium, 1961.
- [3] Irrigation Drainage and Salinity. FAO/UNESCO, 1973.
- [4] Edited by A. Poljakoff—Mayber and J. Gale, Plants in Saline Environments. Springer—Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975.

# 土 壤 盐 分 传 感 器 介 绍

尤 文 瑞

(中国科学院南京土壤研究所)

随着土壤盐碱化研究工作不断进展,对土壤水盐动态观测方法的改进已显得愈来愈重要。近年来在国外(主要是美国)研究了一种埋设于土壤中用来直接测量土壤盐分动态的元件,这种元件叫作盐分传感器(salinity sensors,以下简称传感器)。在美国,传感器已投入商品生产,并应用于土壤盐渍化的室内模拟试验和大田的水盐动态观测,取得了很好的观测资料。传感器的运用,现已扩大到植物对水分和营养的吸收的模拟试验。本文根据国外的有关资料,对传感器的原理、构造及其运用作一概略的介绍。

## 一、现有盐土水盐动态观测方法存在的问题

当前我国观测研究土壤水盐动态的主要方法是定点取样法。例如:为了研究种稻过程中土壤的盐分变化,在试验田块中定点,于不同时期取样,然后通过室

内的盐分分析,比较其盐分的变化。又如:为了观测排水沟的排盐效果,则要在垂直排水沟的方向与排水沟不同距离处设几个观测点,于不同时期取样进行室内盐分分析,取得各点盐分变化的资料。这种方法存在以下问题:

首先,土壤中的含盐状况受土壤质地、结构、地表覆盖、地形等多种因素的影响,因此即使两个取样点相距很近,土壤本身的含盐量也会有很大差别,表1中所列分析结果中1、2、3三个取样点相距只有10厘米,其电导率可相差1倍以上。而定点取样法中第一次取样与第二次取样不可能在同一点,由于所取样品本来的含盐量有差别,因此根据其分析结果不能确切地反映土壤盐分变化的真实情况。

第二,随着研究工作的逐渐深入,样品的数量必然大大增加,例如在上述排水沟效果的研究中,如果垂直排水沟方向设5个点,每点取10层土样,每年取4次,则要二百个样品,如果研究三种不同深度和三种不同

表 1 三个取样点的电导率变化

土 层 深 度(厘米)	1	2	3
	毫姆欧/厘米		
9—11	1.84	2.09	1.27
29—31	0.75	0.71	1.63
59—61	0.70	—	0.74

注：于山东打渔张灌区测定

排水沟间距的效果,则要取1800个样品,这样多的样品所需化验分析的工作量是很大的,往往难以在短时间内完成。

第三,盐土水盐动态的模拟试验多在土柱中进行,而土柱的直径一般只有几十厘米,在这样小的土柱中进行多次的取样,实际上是不可能的,所以过去在模拟试验中只能分析对比试验前后的盐分,而难以观测试验中间的盐分变化过程,所以定点取样方法不适用于模拟试验。

运用盐分传感器则可基本上解决如上的问题。

## 二、盐分传感器的发展及其基本原理

为了能够迅速而准确的测定土壤中的盐分变化,最好是能设计一种仪器设备,不需取样即能直接测定土壤中的盐分变化。很多土壤科学工作者曾在这方面作了很多工作。利用电导方法测定土壤含盐量已为大家所熟知[1,2]。这一方法可以大大减少土壤含盐量的化验分析工作量,但还必需采集土样,才能进行电导测定。

1959年W. D. Kemper研制了一种细孔陶瓷元件(图1)。将其埋设于土壤中,可以直接测定土壤溶液渗透压的变化[3]。Kemper设计的陶瓷元件主要依据的原理是:(1)当多孔陶瓷的孔径达到足够小的时候,土壤水分的负压力达到几个“巴”的情况下,陶瓷孔隙中仍能保持水分达到饱和状态;(2)将这种多孔陶瓷管埋入土壤时,土壤溶液中的离子与陶瓷孔隙水中的离子通过扩散达到平衡,当扩散速度足够快时,陶瓷中溶液的浓度与土壤孔隙中溶液的浓度是相近似的,因此,测量陶瓷孔隙中溶液的电导值可代表土壤溶液的电导值;(3)溶液的渗透压与溶液电导值存在着密切的相关关系(可由国际标准数据表或文献[2]查得),因此测定陶瓷元件电极之间的电导(或电阻),可求得土壤溶液的渗透压变化。

W. D. Kemper设计陶瓷元件的最终目的是为了研究土壤溶液渗透压。但实际上,所测得的电导(或电阻)的变化,即反应了土壤溶液中盐分含量的变化。

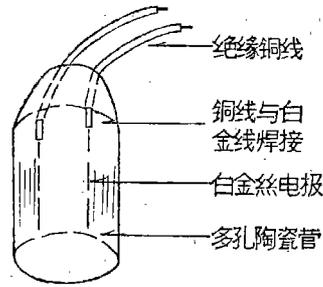


图 1 W. D. Kemper所设计的多孔陶瓷元件

W. D. Kemper的陶瓷元件主要由一多孔陶瓷管(直径为1/2吋和1/4吋两种)和两个白金丝电极组成。将元件置于已知浓度的溶液中测定证明,元件所测得的电阻值与溶液浓度成直线关系,说明是可用的。但这种元件还存在几个问题:

1. 当元件外界的溶液浓度产生变化时,需要通过离子扩散使陶瓷孔隙中的溶液浓度与外界溶液浓度达到平衡,而平衡所需时间较长。经过试验,将元件放入溶液中测定时,平衡时间大约需4小时,而在土壤中测试,当土壤溶液浓度增加1.5倍时,平衡时间增加为24小时。因此当盐分变化较快时(例如观测土壤冲洗过程中的盐分变化),则元件来不及反映出来。

2. 元件不能用于土壤含水量小于19% (Billing壤土)的测定。当土壤含水量小于19%时(即水分应力大于1.6个大气压时)陶瓷孔隙中的溶液将被土壤吸出,不能维持孔隙中溶液的饱和状态,孔隙中赖以产生电导的溶液断面将产生变化,因而影响测定结果的准确性。

3. 需要另外观测土壤的温度变化以进行电导值的温度校正。

4. 外部电流(Outside Current)对测定有一定干扰。

Kemper所研制的元件虽然还存在这些缺点,但其基本构造和设计原理已成为其后传感器进一步发展的基础。

L. A. Richards在Kemper工作的基础上,经过多年研究,1966年提出了一种经过改进的测量土壤盐分的设备,名之为盐分传感器[4],其构造如图2。传感器从以下几个方面进行了改进:1. 将圆形的多孔陶瓷管改成为厚度为1毫米的多孔陶瓷片,两边贴以白金丝网作为电极,在溶液中测定时,反应时间减少到1小时;2. 传感器中装有热敏电阻进行温度补偿,不需另测温度;3. 陶瓷片允许的水分应力为10巴,增大了可测定的土壤含水量范围;4. 由于采用了防护和绝缘措施,外部电流的干扰可以被消除。

表2 传感器特性简表 (25℃情况下)

特性项目	最小	典型的	最大	单位
传感器电流			0.1	毫安
温度补偿电路电流			0.1	"
额定电阻		4000		欧姆
反应时间 (在溶液中测定时达到最后平衡的63%所需的时间)	0.75	1	1.5	小时
温度范围: 设计的	5		35	°C
实际运用的	0		45	°C
基膜吸力范围 (实际运用的)	0		20	巴
正压力范围 (实际运用的)			2	巴
测试溶液电导率范围:				
设计的	1		20	毫姆欧/厘米
实际运用的	0		30	"
自身的			2	"
重复误差			±10	%

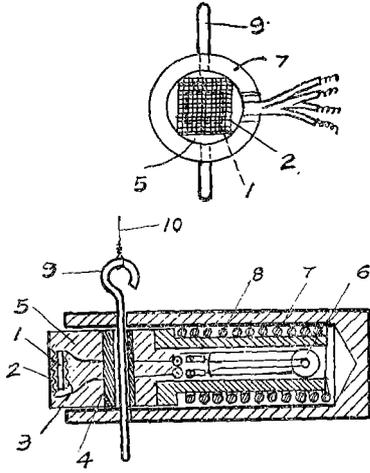


图2 L.A.Richards所设计的传感器正面和横切面图

- 1—陶瓷片
- 2—前面的白金丝网电极
- 3—背面的白金丝网电极
- 4—尼龙管
- 5—环氧树脂块
- 6—热敏电阻
- 7—人造荧光树脂外壳
- 8—弹簧
- 9—安放销钉
- 10—牵引钢丝

Richards 设计的传感器, 目前在美国运用较广, 传感器的电导池是由两个白金丝网电极和一个多孔陶瓷片组成的, 陶瓷片的尺寸为 $6 \times 6 \times 1$ 毫米, 用陶土烧制而成, 在陶瓷片呈可塑状态的时候将白金丝网贴在两边。白金丝网是由 $0.0076$ 厘米直径的白金丝织成的, 每厘米内有白金丝 $21$ 根, 前面白金丝网的尺寸为 $10 \times 10$ 毫米, 背面为 $6 \times 6$ 毫米。整个电导池嵌在一个环氧块里, 以保证绝缘。传感器中装有一个玻璃棒热敏电阻 [  $R = 2000$  欧姆  $\pm 15\%$ , 在  $T = 25^\circ\text{C}$  时  $dR/RdT = -4\%$  (近似值) ]。还装有一个弹簧, 当传感器埋入土中以后, 拉动牵引钢丝把销钉拉出, 弹簧产生压力使传感器与土壤保持良好接触。

1969年美国土壤学杂志上又刊登了C. G. Enfield和D. D. Evans设计的传感器[5]。有圆柱形和平板形两种, 构造如图3。传感器的两极极薄的白金片, 用孔隙直径很小的多孔玻璃(porous glass)代替了多孔陶瓷。多孔玻璃平均孔隙直径为 $40 \text{ \AA}$ , 内表面积 $250$ 平方米/克, 孔隙率 $28\%$ 。由于孔径很小, 当土壤基膜吸力(matric suction)在 $20$ 巴时, 仍能保持多孔玻璃孔隙中水分处于饱和状况, 因此, 在土壤含水量很低的情况下仍能进行测量。传感器中装有热敏电阻, 可同时测量温度。传感器的性能见表2。

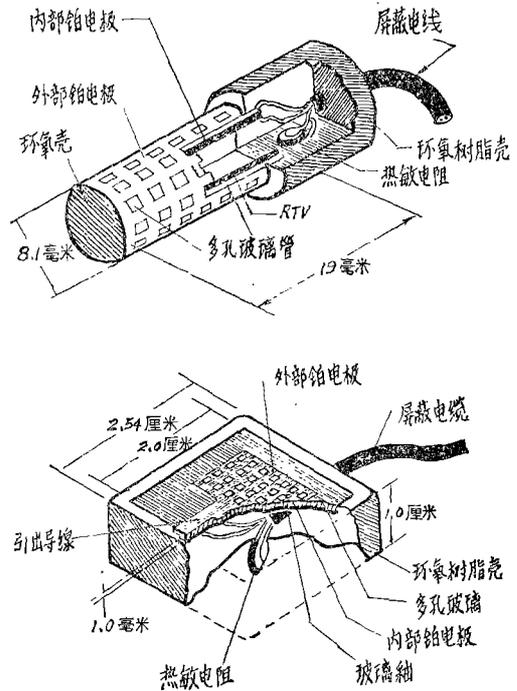


图3 C.G.Enfield等所设计的两种传感器

1970年 D.C.Reicosky 等又设计了一种小型圆柱形传感器, 名之为探针 (probe) [6]。传感器的两极为螺旋形的白金丝, 白金丝绕在用多孔乙稀基氯制成的圆管上, 管壁厚0.762毫米, 盐分可在多孔乙稀基氯中扩散。元件最外层为一直径 6.3 毫米的多孔陶瓷管, 其通气压力\*为 3.5—4.0 巴。传感器适用的水分应力范围为 0 到 -0.65 巴。在溶液中测定时的反应时间为 1 小时(以达到全部平衡的63%计算)。传感器中亦装有热敏电阻可同时测量温度。传感器构造如图 4。

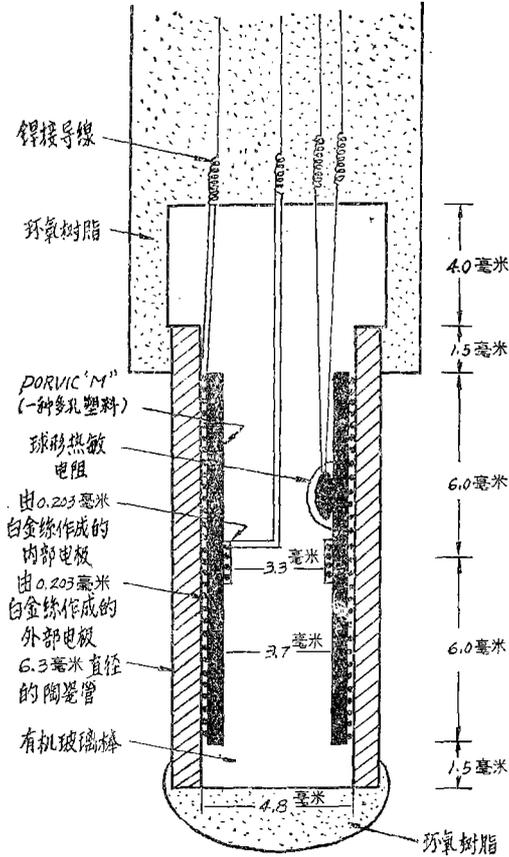


图 4 D.C.Reicosky 等人所设计的传感器剖面图

R.D.Ingvanson 等于 1970 年设计了一种组合元件, 将盐分传感器与热偶湿度计组合起来, 结构如图 5, 这种组合元件可同时测出土壤中的水分势(通过湿度计测得)和渗透势(通过传感器测得)的变化, 并根据此二数据计算出土壤基膜势的变化 [7], 从而使传感

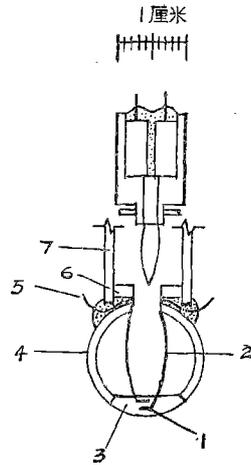


图 5 R.D.Ingvanson 等人设计的热偶湿度计和传感器的组合元件剖面图

- 1—白金丝网电极, 由52孔白金丝网剪成, 二电极间距 1 毫米。
- 2—白金丝导线焊接在电极上。
- 3—多孔陶瓷片, 气泡压力 1.5 巴。
- 4—多孔陶瓷球, 气泡压力 1 巴。
- 5—焊接在 2 上的导线。
- 6—陶瓷球颈用酚醛塑料管制成, 用环氧树脂与 4、7 粘结。
- 7—酚醛塑料管长度依元件应用时埋设深度而定。

器的运用不仅限于测定渗透压和土壤盐分含量, 还可用于测定水分应力, 既可用于土壤水盐动态的研究, 又能用于土壤—植物—水分、土壤—植物—养分之间的相互关系的研究。

### 三、传感器的校准 (calibration)

为了鉴定传感器测量的精确度及稳定性, 并确定其适用范围、反应时间等性能, 对已制成的传感器需进行如下几方面的校准。

1. 精确度及稳定性的校准 传感器是否能够准确的测量出土壤中的盐分变化, 主要决定于通过传感器所测得的电导率的变化与土壤溶液浓度的变化是否有很好的相关关系。目前很多国家多直接以土壤饱和浸提液(或 1:1, 1:5 浸提液)的电导率来表示土壤含盐状况 [2]。因此多用已知电导率的标准溶液来进行传感器的校准。将传感器置于具有不同电导率的标准

\* 通气压力: 多孔陶瓷孔隙中空气可以开始通过的最小压力, 也称之为产生气泡压力或允许进气压力。

溶液(KCl)中,待其平衡后测量传感器的电导读数(应在25℃情况下进行),根据所得结果可绘出标准液电导率与传感器电导的关系曲线,或进行相关关系的计算,确定其精确度。

L. A. Richards 所设计的传感器的校准曲线如图6,可以看出传感器电导与标准液电导率成良好的线性关系。根据传感器所测得的电导读数,利用曲线可准确地求出土壤溶液的电导率[4]。

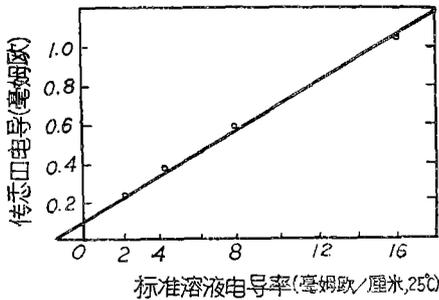


图6 L.A Richards 所作传感器电导校准曲线

C. G. Enfield 等人设计的传感器用同样方法进行校准,也得到良好的结果,见图7[5]。

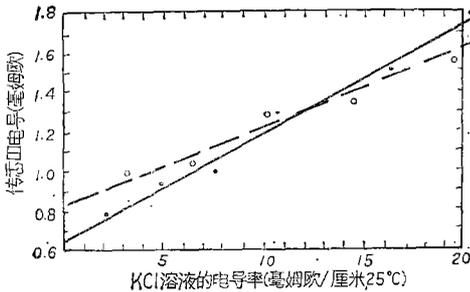


图7 C.G.Enfield等所设计的传感器的典型校准曲线(·为圆柱形、○为平板形)

D.C.Reicosky 等设计的传感器,用 Hoagland's 2号溶液,稀释成不同浓度进行校准,测得结果如图8、9。从图中看出传感器所测电导与用一般电导池所测电导成良好的直线关系,传感器电导的对数值与溶液浓度的对数值亦成直线关系,说明传感器在所测浓度范围内的测定结果是令人满意的[6]。

J. D. Oster 等人对一批试验室制作的和商品生产的传感器,除了在溶液中进行校准外,还通过对土壤的测定进行校准。其方法是将传感器埋置在土壤中测量其电导率的变化,同时在相同层次的土壤中埋设多孔陶瓷瓶,抽吸出土壤溶液,测定其电导率的变化,

二者进行比较如表3。从表中看出,除个别层次由于某些因素的干扰差别较大以外,大多数的数值是相近的[8]。

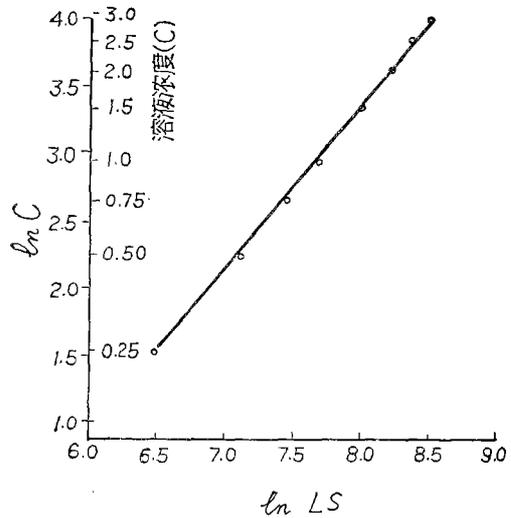


图8 校准曲线

(传感器电导LS(微姆欧)的自然对数值与溶液含盐浓度C(毫克当量/升)的自然对数值关系曲线)

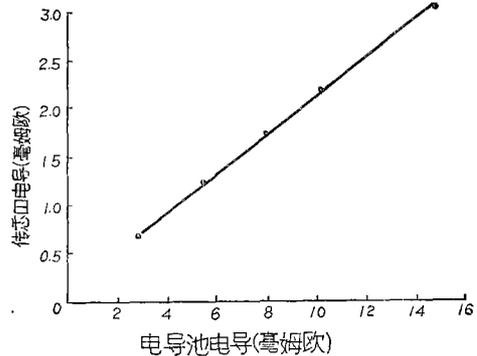


图9 校准曲线

(传感器电导与电导池所测标准液电导的关系曲线)

D.C.Reicosky 等认为,传感器虽然用于土壤的测定,但在溶液中进行校准是完全可以的,不一定要在土壤中校准[6]。

确定传感器稳定性的主要方法是用上述校准方法进行长时间的反复的测定,视其是否能够得到相同的结果。J. D. Oster 等人对其所用传感器进行了三年时间的反复校准,得到的校准资料,用数理统计法求得的回归方程式和相关系数见图10,说明传感器在这样

表3 模拟土柱不同深度用传感器所测定的电导率与抽取出来的土壤溶液所测电导率的比较

土层深度 (厘米)	试验持续时间 (月)	抽取次数	平均电导率 (毫姆欧/厘米)			均方误差
			传感器	抽取溶液	差值	
25	4	7	2.4	3.6	-1.2	2.1
30	14	28	4.4	4.0	0.4	0.9
50	12	21	3.2	3.1	0.1	0.4
50	4	6	2.4	2.1	0.3	0.8
60	7	32	6.7	5.5	1.2	0.4
75	12	32	7.6	7.3	0.3	0.3
75	5	11	6.0	6.2	-0.2	1.1
90	14	32	4.6	4.9	-0.3	0.4
100	4	6	7.4	8.5	-1.1	0.1

长的时间内仍然是稳定的。

2. 反应时间的校准 前已述及,当被测土壤溶液浓度产生变化时,传感器多孔陶瓷元件内的溶液浓度需要通过离子扩散与土壤溶液浓度逐渐达到平衡,这一平衡所需时间叫作传感器的反应时间。

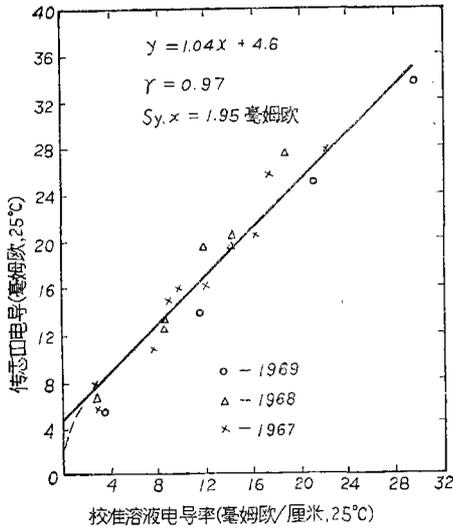


图10 传感器典型校准资料

反应时间愈短,则传感器的灵敏度愈好,能够将土壤中含盐量的迅速变化测量出来;如果反应时间太长,则当土壤含盐量变化较快时,传感器难以测定出来。影响反应时间的因素很多,如传感器本身的结构,主要是多孔陶瓷元件的性能(孔隙的大小、形状、多少)、形状(陶瓷片的大小、厚度),土壤的含水量、质地组成、孔隙及结构,土壤溶液的浓度、盐分组成及其变化幅

度,其中以陶瓷元件的性能和形状,土壤含水量的影响最大。

为了进行反应时间的校准,一般是先将传感器放在蒸馏水(或某一含盐浓度的溶液)中,使其达到平衡,然后放在已知浓度的含盐溶液或已知土壤溶液浓度的土壤中,测量传感器电导值随时间的变化,并绘制电导值随时间变化的曲线,即可得出反应时间。

表4 KemPer所用的三种多孔陶瓷的性能

多孔陶瓷 编号	陶瓷孔隙中开始 失水的水分应力 (大气压)	陶瓷孔隙的弯曲度系数	
		陶瓷管直径为 1/2吋	陶瓷管直径为 1/4吋
P <sub>3</sub>	1.6	0.80	0.74
P <sub>5</sub>	3.3	0.20	0.16
J <sub>53</sub>	5.8	0.25	0.30

Kemper对三种不同性能的陶瓷(表4)所作的两种不同尺寸的陶瓷元件进行了反应时间的校准,如图11(在溶液中)和图12(在土壤中)。从图中看出,直径为1/2吋的元件,离子扩散平衡的时间要较1/4吋者为长。其反应时间也长,1/2吋者为4小时以上,而1/4吋者为2小时(图11)。陶瓷的性能不同对反应时间也有一定影响。从土壤中的测试结果(图12)看出,土壤含水量大者较小者反应时间为短。在土壤中反应时间较在溶液中长,一般需要20小时以上。

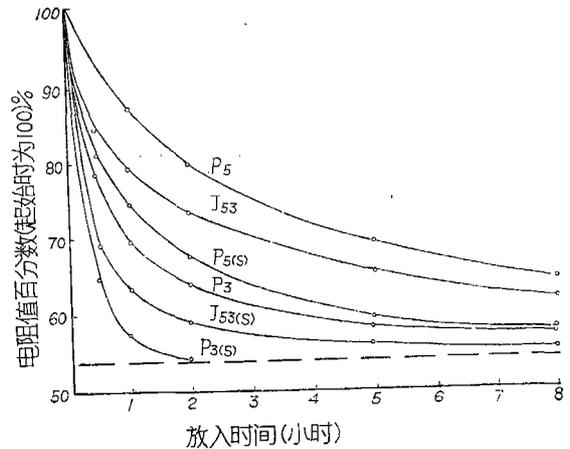


图11 元件放入0.2N Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液后电阻随时间的变化曲线

1. 元件预先放入0.1N Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中平衡后再放入0.2N Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>中进行测定。
2. (S)为陶瓷管的直径1/4吋,其余为1/2吋。
3. 图中虚线表示达到最后平衡时应有的电阻值百分数。

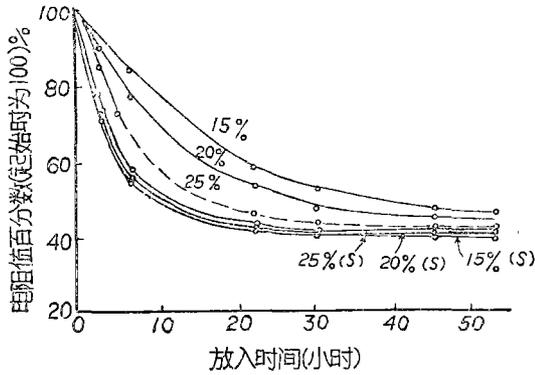


图 12 元件放入土壤后电阻值随时间的变化曲线

1. 元件放入土壤以前用 0.1N NaCl 溶液饱和。
2. 所用土壤为 Billings 壤土, 向土壤中加入不同数量的 0.25N NaCl 溶液使其达到三种含水量: 15%、20%、25%。

D. C. Reicosky 等对其所设计的传感器在三种情况下进行校准, 所得反应曲线如图 13。曲线 a, 是先将传感器置于蒸馏水(去离子水)中, 然后放入含盐 56.5 毫克当量/升的溶液中测得的; b, 是先将传感器置于蒸馏水中浸泡, 然后放入含盐 4.7 毫克当量/升的溶液中, 经 12 小时后再放入含盐 56.5 毫克当量/升的溶液中测得的; c, 是将传感器放在蒸馏水中浸泡后放入 250 毫升含盐 56.5 毫克当量/升的溶液中, 同时对溶液进行不停的搅拌, 以使传感器表面的离子浓度与溶液中离子浓度保持相等。经过 12 小时以后再放入不停搅拌的蒸馏水中。经过这些测定, Reicosky 认为, 盐分传感器孔隙内的溶液中向外扩散和盐分从溶液中向从传感器内扩散所得出的曲线形状基本上是相同的 (图 13c), 被测定的溶液的浓度增加或减小时传感器反应时间基本相同(约为 4 小时), 但在土壤中的反应时间要比溶液中长。

反应时间太长的传感器, 不能用于盐分变化很快的情况, 因此, 传感器的设计者们都尽量设法缩短反应时间, 而主要办法是改变多孔陶瓷元件的孔隙性质及其形状、厚度。L. A. Richards 将陶瓷片厚度减小到 1 毫米, 传感器在溶液中反应时间为 1 小时(以达到最大平衡值的 63% 计)。C. G. Enfield 等人用多孔玻璃所作的传感器, 在溶液中反应时间为 2 小时。虽然反应时间大大缩短了, 但在土壤中测定时, 反应时间仍在 10 小时以上。

J. Wesseling 和 J. D. Oster 1973 年提出了一种计算方法, 它是根据传感器测得的电导读数计算出实际的土壤溶液电导值。在土壤盐分迅速变化的情况下,

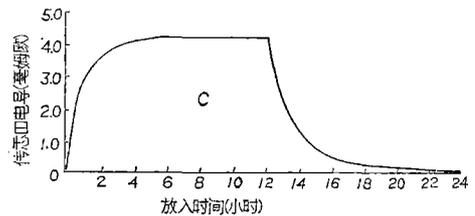
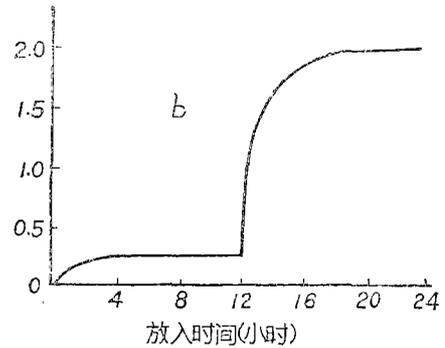
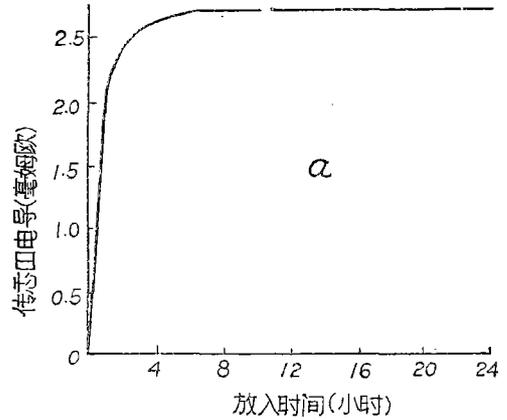


图 13 传感器放入溶液后电导随时间的变化曲线

也可用传感器来测出土壤盐分变化<sup>[9]</sup>。推导计算公式所依据的是 Fick's 原理, 即:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right) = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)$$

式中 C —— 盐溶液浓度(毫克当量/升);

D —— 离子扩散系数(平方厘米/秒);

t —— 时间(秒);

x —— 与陶瓷片表面的距离(厘米)。

根据此原理, 经数学推导得出

$$C_n = \frac{\bar{C}_n - C_{n-1} h(\alpha)}{h(\alpha)}$$

式中  $C_n$  —— 某时间土壤溶液的实际电导值;

$\bar{C}_n$ ——某时间传感器的电导读数；  
 $C_{n-1}$ —— $C_n$  的前一时间段土壤溶液的实际电导值；  
 $\alpha$ —— $\pi^2 D/4L^2$  称为反应系数；  
 $L$ ——陶瓷元件的厚度；  
 $h(n\alpha)$ ——时间的函数，已绘制成表可查。  
 当  $n = 1$  时即为  $h(\alpha)$ 。  
 $n$ ——观测次数；

应用上式，可以根据  $\bar{C}_n$  计算  $C_n$ ，对测试结果进行校正，校正实例见图14。

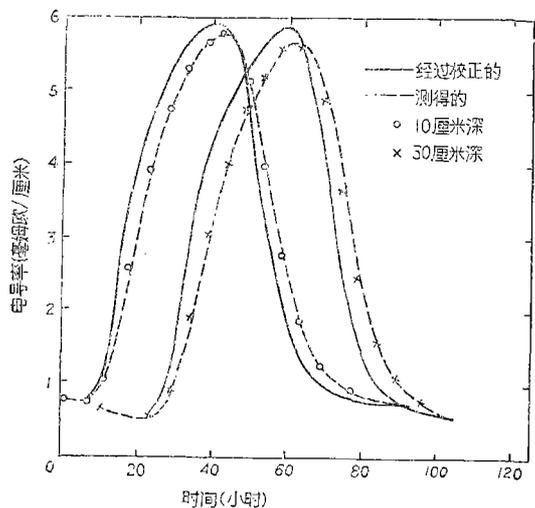


图14 经过校正的和测得的电导率随时间的变化曲线

1. 试验是在土柱中进行的，所用土壤为不饱和的 Pachappa 土壤。

2. 传感器埋设在10厘米和30厘米两处进行测量。

3. 用水或盐溶液(5.9 毫姆欧/厘米)以6.7厘米/天的速度灌水，灌水从0时开始延续36小时。

J. Wessoling 认为，当盐分变化缓慢时，不需进行校正，因为进行校正计算也是很烦琐的。

3. 传感器适用的土壤含水量范围的确定 随着被测土壤含水量的减小，土壤空隙中的水分应力(或基膜吸力)将逐渐增加，当增加到一定限度(数量)时，多孔陶瓷(或多孔玻璃，多孔塑料)孔隙中的水分将被吸出，不能保持孔隙中含水的饱和状态，则两个白金电极之间溶液的截面积将减小，所测得的电导值也将大大减小，而不能代表土壤溶液浓度的实际变化。因此每种传感器均有其适用的土壤含水量范围。

传感器多孔陶瓷保持水分能力的大小主要决定于孔隙的性质。一般来说，孔隙直径愈小，基膜吸力愈

大，保水能力愈强，传感器所能测定的土壤含水量范围也愈大。

L. A. Richards 以多孔陶瓷允许空气进入的最小压力 (air entry pressure) 作为其所能测定的土壤含水量下限，亦即土壤含水量小至水分应力负值大于陶瓷元件允许空气进入的最小压力值时，传感器则不适用。Richards 所用多孔陶瓷的允许进气压力为10巴，一般采用测定产生气泡压力 (bubbling pressure) 的方法来测定允许空气进入压力。

W. D. Kemper 将多孔陶瓷元件埋置在不同含水量的土壤中，以直接确定其可能测定的含水量下限。元件埋入后，用 Bouyoucos 电桥测量电阻随时间的变化，根据所得结果绘制曲线如图15。从图中看出，当含水量低于19%时，测量的起始阶段电阻值迅速上升，这说明此时陶瓷孔隙中的溶液被土壤吸出，其相应的土壤水分应力为1.6大气压，称为元件的失水应力 (lose water hydraulic stress)。土壤含水量低于19%时，传感器将不适用。

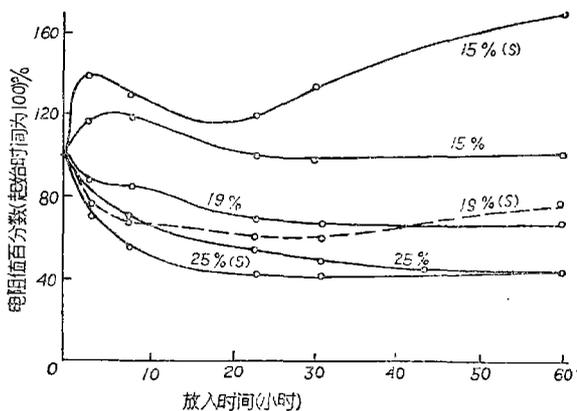


图15 元件放入土壤后电阻随时间的变化

1. 元件放入土壤以前用0.1N NaCl 溶液所饱和。

2. 所用土壤为 Billings 土，向土壤中加入不同数量的0.25N NaCl 溶液使其达到三种含水量：15%、19%、25%。

D. C. Reicosky 用另外一种方法进行鉴定，将传感器埋设在装于缓冲压力薄膜箱中的土壤里，土壤用已知浓度的盐溶液所饱和，待其中的离子达到平衡后，增加压力薄膜的压力，当土壤溶液开始流出时，测量传感器的电导，当压力值达到传感器多孔陶瓷产生气泡压力时，电导值即开始发生突变，也就是当土壤水分应力超过多孔陶瓷产生气泡压力时，传感器就不适用了。经过这样的鉴定，D. C. Reicosky 设计的传感器适用的土壤水分应力范围在0~ -0.65 巴。

4. 传感器的温度校正 土壤溶液的电导率随温

度升高而增加,据 Richards 的研究,温度每上升 1℃,土壤溶液和含水土壤的电导率约增加 2% [2]。为了对传感器测量结果进行温度校正,必需同时测量温度。多数传感器中都装置热敏电阻(图 2、3、4),用以测量温度,利用已作成的校正表,进行温度校正。

为了免除由于温度校正计算所带来的不便, Richards 设计的传感器,将热敏电阻直接连结在线路中,进行直接温度补偿,所测得的读数,即为已经校正的读数 [4]。

5. 外部电流影响的鉴定 为了防止外部电流干扰对测量精确度的影响,传感器的设计者们都尽量采用各种防护和绝缘措施,但仍难以完全免除一定的干扰。如果其干扰不超过一定的范围,则不影响传感器测量的精确度。

鉴定外部电流的影响,一般采用的办法是:先将传感器置于已知电导的溶液中使之达到平衡,测量传感器电导,然后将传感器从溶液中取出,在取出的一瞬间和暴露于空气中测量其电导值的变化,则可知外部电流的影响程度。

D. C. Reicosky 认为他们所设计的传感器(图 4)基本上排除了任何外部电流的干扰。经过测定,只在传感器从溶液中取出的一瞬间产生很小的外部电流,但其所引起的电导变化在任何情况下都不超过浸入溶液中所测数值的 0.1%。

Kemper 对他用三种不同原料所作的十个多孔陶瓷元件进行了鉴定,先将元件放入溶液中,达到平衡时进行电阻值测定,然后取出放在完全不导电的空气中,测试电阻变化,所得结果如下:

材料编号	所测电阻值的变化
P <sub>3</sub>	22 ± 3%
P <sub>5</sub>	20 ± 5%
J <sub>53</sub>	28 ± 3%

从测试结果可以看出,外部电流的影响不超过 ± 5%。

#### 四、传感器的运用

在美国,除了某些科研单位在试验室中制作传感器以外,一些制造科学仪器的公司已进行传感器的商品生产。在文献中提到的有“土壤水分仪器设备公司”(Soilmoisture Equipment Company)、“工业仪器制造有限公司”(Manufactured by Industrial, Inc.)等。目前传感器在土壤研究工作中,主要用于如下几个方面。

1. 观测研究土壤中的水盐动态 利用传感器进行水盐动态的研究,是传感器运用最广的一个方面。

Richards 和 Oster 等人将传感器用于研究灌溉过程中水盐动态的模型试验,并研究水盐动态变化与作物吸收水分的关系。Oster 的试验是在圆筒形土柱中进行的,圆筒直径为 29.5 厘米,长 173 厘米,在 30 到 150 厘米深度范围内每隔 30 厘米埋设水分张力计和抽吸土壤溶液的吸液瓶一个,在 20 到 60 厘米深度范围内每隔 10 厘米埋设传感器一个。土柱中种上辣椒,用电导率为 2.5 毫姆欧/厘米的水进行了三次灌溉。利用传感器所测得的土壤溶液电导率变化及利用张力计测得的土壤基膜吸力的变化如图 16。分析图中曲线,可以看出土壤中的水盐动态。例如,在每次灌溉后 24 小时,20 厘米处的电导率分别为 1.7、2.2、2.1 毫姆欧/厘米,这些数值与灌溉水的电导率相近似,这说明入渗的灌溉水使原土壤溶液产生活塞式的位移。24 小时以后,20 厘米处电导率逐渐升高,说明植物逐渐吸收土壤中的水分而使土壤溶液浓度升高,30 厘米处也产生类似的现象。在第二、三次灌水后 8 小时内,30 厘米处的电导率急剧增

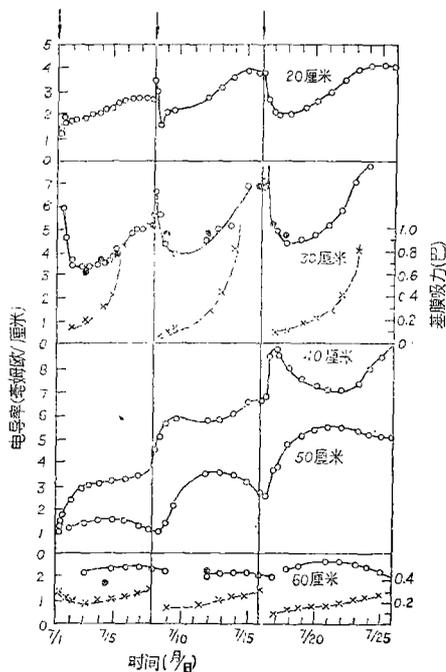


图 16 模拟土柱中不同深度处电导率、基膜吸力随时间的变化

1. 所用土壤为 Pachappa 砂壤土。
2. ↓ 表示灌水时间。
3. ×...×...× 表示基膜吸力变化。
4. ○ 埋设的传感器测得的电导率, • 抽吸土壤溶液测得的电导率。

加,在相应的时间,基膜吸力迅速下降,这表明水的浸润前峰已达到30厘米处。而电导率的增加,反映了由于蒸发作用而集聚于表层土壤中的盐分随灌溉水向下移动。这些变化过程,在没有传感器以前,是难以观测得到的。

R.M. Todd 和 W.D. Kemper 用传感器于室内进行的模型试验中,研究接近土壤蒸发表面时盐分的分散系数<sup>[10]</sup>。Todd 指出,土壤水分达到饱和的情况下,溶液在土壤孔隙中运动时,盐分(溶质)在溶液中的分散情况已有很多研究资料,在这种高的含水量的情况下,盐分的分散系数随着溶液流速的增加而增加,而最令人感兴趣的是在土壤蒸发面或在根系表面土壤溶液流动情况下的盐分(溶质)分散系数。在这种情况下,土壤含水量一般是比较低的。此时,盐分的析出和在土壤孔隙中受到“筛分”<sup>\*\*</sup>的因素将有较大影响。Todd 在试验室中进行了一系列的模拟试验,方法是将张力计和传感器埋设在装有不同质地土壤的土柱中,地下水位可以控制,先用2毫姆欧/厘米的水或蒸馏水将土柱饱和,然后在一定的地下水位情况下进行蒸发,在蒸发过程中,用传感器测量土柱中土壤溶液浓度的变化,根据盐分浓度变化梯度和水分蒸发的速度,可以计算出盐分分散系数的变化。

通过试验, Todd 得出的结论是:分散系数随着溶液流动的速度和溶质平均溶解速度的增加而增加,而当溶液的总流动量很小时,盐分的分散系数等于扩散系数。这些研究结果,对于研究盐土的水盐动态是很有价值的。

J. D. Oster 和 L. S. Willardson 将传感器用于田间水盐动态的观测<sup>[8]</sup>。观测研究工作是在 Brawley 的帝国河谷水土保持试验站进行的。在田间埋设了两组传感器,间距3.9米,埋置深度为60、90、120厘米。经过160天的观测,所得资料绘制曲线如图17。Oster 通过观测资料的分析,认为传感器能够准确的反映田间土壤盐分的变化,可以帮助确定所需采取的调节水盐动态的措施。例如,开始观测时的土壤电导率已接近于高粱的耐盐度24毫姆欧/厘米,需要及时灌水冲洗,以保证高粱的正常生长,经过冲洗后,土壤含盐量下降。通过一个作物种植周期的盐分动态观测,可以确定以后所需采取的管理措施。

2. 进行土壤水物理性质的研究 前已述及, R. D. Ingvalson 等设计了一种组合元件,用以进行土壤水物理性质的研究。组合元件可以同时测定土

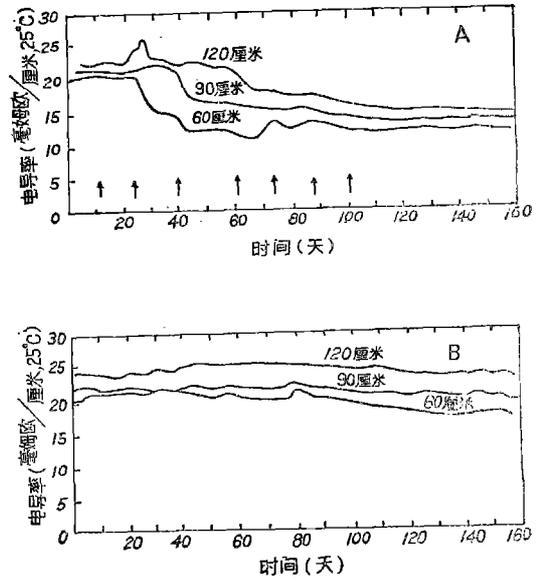


图17 埋设在田间的两组传感器的电导率变化曲线 A组进行了灌溉(箭头表示灌溉时间), B组没有灌溉。

壤水分的水分势和渗透势。由水分势减去渗透势可求得基膜势,这样可以消除由于土壤溶液浓度变化而产生的误差。试验是在土柱中进行的,土柱直径23.6厘米,长20.3厘米,所装土壤为 Pachappa 砂壤土,在10厘米和18.5厘米深处各埋一个组合元件,8和17厘米深处各埋一个传感器用以校核。土柱中种植棉花,温度控制在 $25^{\circ} \pm 0.2^{\circ} \text{C}$ ,相对湿度在 $78\% \pm 1\%$ , $\text{CO}_2$ 浓度 $400 \pm 10 \text{ ppm}$ 。为了保证棉花正常生长,用含养分的水进行灌溉;另外,用 Hoagland 水加入适量的氯化钠(使水的渗透压降低到-3.5巴)进行了三次灌溉。为了冲洗土柱中累积的盐分,用蒸馏水进行冲洗。在试验过程中,每天测量3—6次,观测结果绘制曲线如图18。Ingvalson 通过对曲线的分析,看出植物在盐化土壤中的吸水状况与土壤中水分势有关。例如,从曲线中看出,10厘米和18.5厘米深处,在每个灌水周期末的水分势是相等的,而两处含盐量是不同的(上大下小),显然植物先从含盐量小的土层(18.5厘米)中吸收水分,也就是从基膜势小的土层中吸水,使该土层中的基膜势(负压值)加大,从而最后使得上下土层中的水分势达到平衡。

\*溶液在土壤孔隙中运动的过程中,盐分(溶质)在溶液中单位时间通过单位截面积的分散量。

\*\*溶液在土壤孔隙中流动的过程中,由于受土粒表面吸附作用等因素的影响,不同盐分离子将处于不同的位置,称之为盐分的“筛分”。

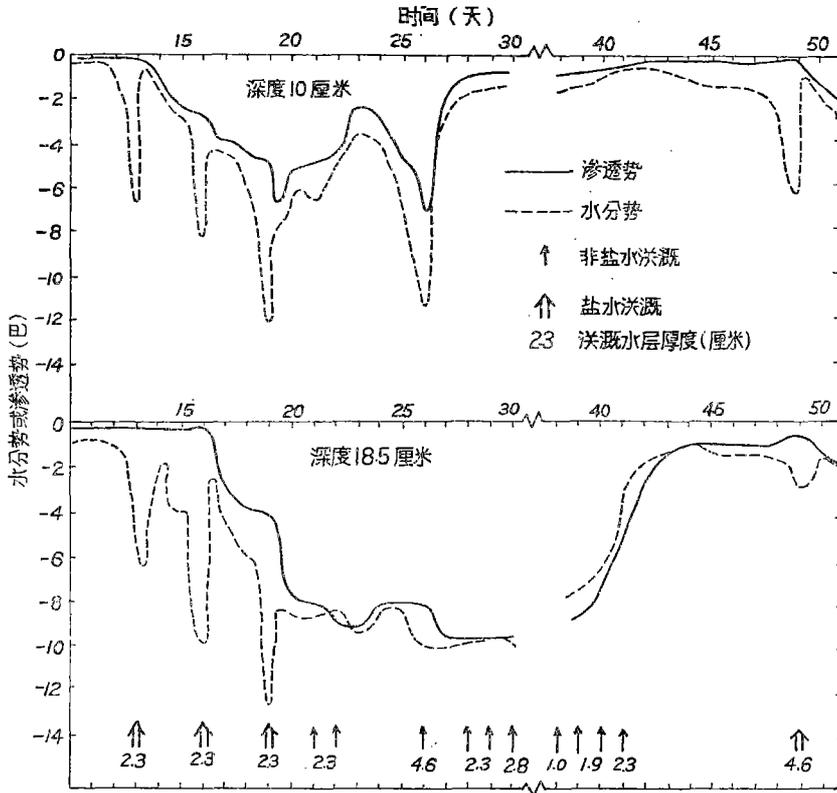


图 18 模拟试验中所测得的水分势和渗透势的变化曲线

除上所述, 传感器还可用来研究土壤溶液的渗透压等性质。

以上简要地介绍了有关盐分传感器的构造, 校准及运用等问题。研究方法和手段的革新必然使研究工作向前推进一步。传感器的发展和运用, 也将使土壤科学的研究, 特别是土壤水盐动态的研究更加深入, 并促进土壤水盐动态的观测向自动化和遥控的方向发展。R. S. Austin 和 J. D. Oster 1973 年设计的一种振荡器〔11〕, 可应用于传感器和其它交流电电池, 在接入几千米导线的情况下仍能进行测量。因此, 传感器埋入后, 连结振荡器、电导仪、自动记录仪, 不管是室内的模型试验, 或是田间观测, 均可自动记下土壤中盐分的动态变化。

#### 参 考 文 献

〔1〕于天仁等编著, 土壤的电化学性质及其研究法。158—294, 科学出版社, 1976。  
〔2〕L. A. 理查兹 (厉兵译), 盐碱土的鉴别和改良。

12—24, 科学出版社, 1965。

〔3〕Kemper, W. D., Soil Sci., 87, 345—349, 1959。  
〔4〕Richards, L. A., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 30, 333—337, 1966。  
〔5〕Enfield, C. G. and Evans, D. D., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, 787—789, 1969。  
〔6〕Reicosky, D. C. et al., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34, 214—217, 1970。  
〔7〕Ingvalson, R. D. et al., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34, 570—574, 1970。  
〔8〕Oster, J. D. and Willardson, L. S., Agronomy Journal, 63, 695—698, 1971。  
〔9〕Wesseling, J. and Oster, J. D., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37, 552—557, 1973。  
〔10〕Todd, R. M. and Kemper, W. D., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, 539—543, 1972。  
〔11〕Austin, R. S. and Oster, J. D., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37, 327—329, 1973。