

方法介绍

用四电极法测定土壤含盐量的试验研究*

肖振华 孟繁华 尤文瑞

(中国科学院南京土壤研究所)

四电极法是地球物理勘探中常用的电阻率法在土壤盐分测量中的应用和发展。长期以来,广大地质和水文地质工作者应用电阻率法测量地下水及岩石介质的电阻率,研究地下岩层的性质和分布状况,进行了大量的工作,积累了丰富的经验。但是,应用四电极法直接测定田间土壤盐分含量和变化,则是七十年代以后才开始的,在这方面美国科学工作者进行了大量的研究工作〔1〕。国内一些科研单位近几年来也已开始进行四电极法的使用和研究。四电极法不需要取样分析,也不需要将探测仪器长期埋设在土壤中,只要将四支电极插入土壤就可进行测量。虽然测量结果的精度比取样分析法和盐分传感器稍差,但是,由于四电极法具有方法简单,测量快速,移动方便,读数无滞后现象等优点,并可以测量一定厚度土层的平均含盐情况,适合大面积调查土壤含盐量的变化,因而日益受到更多的研究和应用。现将我们对四电极法进行的试验研究介绍如

下。

一、方法原理

土壤具有一定的导电性能。土壤中可溶性盐类含量以及土壤质地、结构、温度、湿度不同,都影响导电性能的大小,特别是可溶盐浓度和土壤含水量对电导起着决定性作用,土壤溶液浓度和含水量愈高导电性能愈强。用四电极法测量土壤含盐量,就是根据土壤溶液的导电性能,利用测量仪器求出土壤电阻率,然后换算成土壤电导率。

我们使用的测量仪器为ZC-8型接地电阻测量仪①。该仪器系根据电位计的工作原理设计而成。田间测量时如图1所示,以等间距向土壤中插入四支电极, C_2 、 P_2 为接地电极, C_1 为电流测量电极, P_1 为电位测量电极,分别与测量仪器上相应的端钮相连接。当仪器发电机的摇柄以每分钟120转以上的速度转动时,便产生约110—115周/秒的交流电

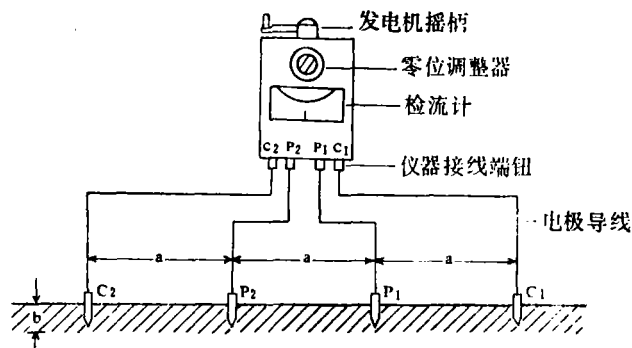


图1 四电极法原理示意图

流。电流从发电机经过电流互感器的一次绕组,接地极,被测土体和电流测量极而返回到发电机,由电流互感器二次绕组产生的电流与电位器相接,当检流计指针偏转时,调节电位器使其达到平衡,即可读出土壤电阻 R 。所测土壤电阻率为:

$$\rho = 2\pi a R \dots\dots\dots (1)$$

* 山东省打渔张引黄灌溉管理局魏家试验站兰光明、韩小红等同志参加田间测试工作。

①北京电表厂,ZC-8型接地电阻测量仪使用说明书。

式中, ρ ——土壤电阻率, a ——电极间距, R ——土壤电阻的读数。

由电阻率 ρ , 利用倒数关系即可求出土壤电导率。

二、四电极法校准曲线的制作

由四电极法测得的土壤电阻率, 通过换算求出表观电导率 EC_a , 再进行校准, 才能求出土壤溶液实际电导率 EC_w 。因此, 在进行四电极测量之前, 需要预先做出校准曲线。影响校准曲线的因素, 主要有土壤含盐量、盐分组成以及土壤质地、结构、含水量等。因此, 在土壤性质、含水量或盐分组成不同的地区, 都需要做相应的校准曲线。校准曲线的制作方法很多, 我们采用的是四电极电导池法 [1, 2]。

(一) 仪器设备及电导池常数 K 的测定

1. 测试仪器的选择: 根据四电极法的测试原理, 一般地球物理勘探中使用的各种电子自动补偿仪均可用作测试仪器。我们曾采用 DDC-2A 型电子自动补偿仪, 但在测试中发现有较严重的极化现象, 而且读数不够稳定。目前室内外测试中我们均采用 ZC-8 型接地电阻测量仪, 该仪器体积小, 使用方便, 稳定性能较好, 而且可以直接读出土壤电阻值, 不需分别测量电流强度和电位差再进行土壤电阻值的计算。

2. 电导池构造: 电导池由有机玻璃容器和电极组成, 如图 2 所示。有机玻璃容器形如环刀, 高 5 厘米, 内径 8 厘米, 两端为有机玻璃盖, 在容器壁的中以 45° 间隔开 8 个直径 5 毫米的螺孔; 电极有 8 支由紫铜做成, 如螺钉状, 长 1.5 厘米, 顶端成锥形, 以螺纹与容器紧密接触, 进入容器部分长 4 毫米。

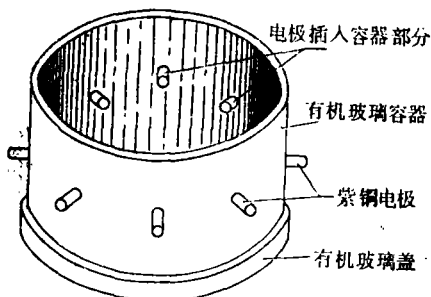


图2 四电极电导池示意图

3. 电导池常数 K 的测定, 将电导池中盛满已知电导率 EC_{25} 的溶液, 溶液盐分组成与待测地区土壤溶液盐分组成一致。把每四个邻近的电极作为一

组, 用 ZC-8 型接地电阻测量仪, 轮换进行 8 次测量, 求其平均电阻值, 用下式计算电导池常数 K :

$$K = EC_{25} \cdot R_t \cdot \frac{1}{f_t} \dots \dots \dots (2)$$

式中, EC_{25} ——校准溶液 25°C 时的电导率;

R_t ——四电极电导池测得某温度下校准溶液的电阻值;

f_t ——温度校正系数, 即溶液在标准温度 25°C 时的电导值与在某一温度 t 时的电导值之比, 一般盐分分析室都备有表可查。

我们用四电极法测量山东滨海打渔张引黄灌区的土壤含盐量时, 是以灌区牛庄地区地下水作为校准溶液。测量和计算结果列于表 1。

(二) 土壤表观电导率 EC_a 的测定

用内径与电导池容器相同的环刀取样器, 在待测地区采集有代表性的原状土, 环刀与电导池容器对接, 将原状土推入电导池, 加盖密封, 插入 8 支紫铜电极, 并且测出干土重, 以便测定含水量时应用。分别用待测地区不同浓度的土壤溶液或地下水淋洗电导池中土样, 使土样含水量达到并保持饱和状态, 同时用电导电极测定排出溶液的电导率, 当电导率不再变化时, 用四电极测定土样 R_t , 测定方法与电导池常数 K 的测定步骤相同。然后用真空泵逐渐从电导池中抽吸土壤溶液, 使土样含水量逐渐降低, 同时用四电极测定不同含水量时土样的电阻值 R_t 和温度 t , 直至从电导池抽吸不出溶液为止。由下式求出土壤表观电导率 EC_a :

$$EC_a = K \cdot \frac{f_t}{R_t} \dots \dots \dots (3)$$

表 1 四电极电导池常数 K 的确定

溶液电导率 EC_{25} (姆欧/厘米)		0.00666	0.01600	0.02919
实测 R_t (欧姆)	1	18.20	7.95	3.88
	2	20.00	8.13	4.24
	3	19.00	8.21	4.12
	4	19.30	7.67	4.20
	5	19.00	8.50	4.22
	6	18.90	7.87	4.12
	7	19.30	8.23	4.18
	8	19.30	8.10	4.26
平均 R_t		19.13	8.08	4.15
温度校正系数 f_t		1.488	1.488	1.415
电导池常数 K		0.0856	0.0869	0.0856
平均 K		0.0860		

(三)相关计算及校准曲线的绘制

1. EC_w-EC_a 关系: 由电导池测得土壤表观电导率 EC_a 与电导电极测得的土壤溶液实际电导率 EC_w 进行相关计算, 可以得到同一土壤溶液电导率(EC_w)情况下, 不同含水量 θ 对 EC_a 的回归方程(表2), 以及相同含水量情况下, 不同土壤溶液电导率 EC_w 对 EC_a 的回归方程(表3)。

从表2和表3可以看出, 在不同含水量情况下,

表2 各种 EC_w 值情况下的
 $\theta-EC_a$ 关系

EC_w (毫姆欧/厘米)	相关系数 r	截距 a	斜率 b
6.66	0.943	-0.19	6.17
16.00	0.949	-2.64	22.01
29.19	0.976	-3.99	37.23

表3 各种 θ 值情况下的
 EC_w-EC_a 关系

含水量 θ (%)	相关系数 r	截距 a	斜率 b
32	0.999	0.002	0.270
31	0.999	0.018	0.258
30	0.999	0.037	0.240
28	0.999	0.075	0.217
25	0.999	0.130	0.180
23	0.998	0.160	0.149
20*	0.992	0.220	0.110
18	0.978	0.247	0.080
15	0.976	0.310	0.04

* 含水量20%以下推算值。

土壤溶液实际电导率 EC_w 愈高, 相关系数 r 值愈高, 而回归方程的截距(绝对值)和斜率愈大。在相同含盐量情况下, 含水量愈低, 相关性愈差, 截距变大, 斜率变小。含水量达到饱和时(32%), 截距达最小值, 斜率达最大值。当含水量在25%以上时, 相关系数 r 均为0.999, 含水量在25%以下时, 随着含水量降低, 相关性逐渐变差, 含水量降低到15%时, r 值减小到0.976。根据表3 EC_w-EC_a 关系, 可以绘出不同含水量时 EC_w-EC_a 关系曲线, 即校准曲线(图3)。

2. 土壤含水量和 EC_w 增量的关系: 由图3 EC_w-EC_a 校准曲线以看出, 同一 EC_a 值对应于不同的含水量, 有不同的 EC_w 值, 随着含水量降低, EC_w 值逐渐增加, 其增加的数量与饱和含

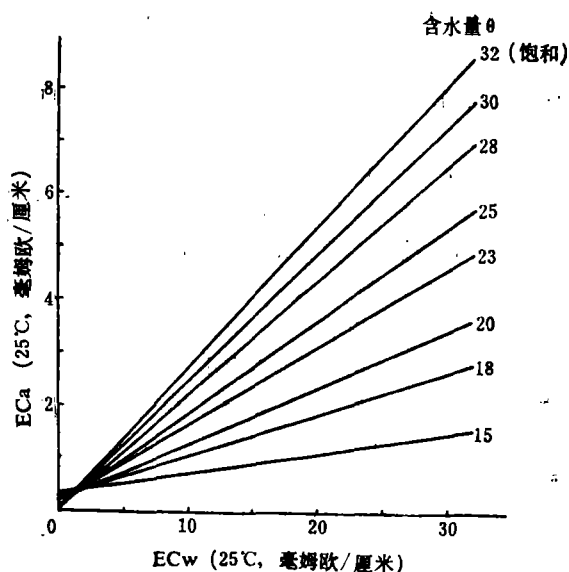


图3 EC_w-EC_a 校准曲线

水量(32%)时 EC_w 的比值, 为相对增量。经相关计算, 含水量和相对增量的关系如表4。

表4 含水量与 EC_w 相对增量关系

含水量 θ (%)	相关系数 r	EC_w 增量 y (%)
25以上	-0.995	2.26—7.23 θ
25—20	-0.996	4.35—15.55 θ
20—15	-0.976	16.78—79.08 θ

可以看出, 含水量 θ 和 EC_w 相对增量之间呈负相关, 随着含水量降低, EC_w 相对增量变大, 而且含水量在20%以下时, 相关性较差。利用上述增量回归方程, 可以近似地求出任一含水量时 EC_w 的相对增量, 从而方便地求出任一含水量时的 EC_w 值, 不必作出某一含水量的 EC_w-EC_a 关系曲线。例如, 表观电导率 EC_a 为5毫姆欧/厘米, 含水量为28.5%, 由表4增量回归方程即可算出 EC_w 的相对增量为20.0%, 利用表3或图3 EC_w-EC_a 关系求出 EC_a 为5毫姆欧/厘米时饱和含水量的电导率 EC_s 为18.5毫姆欧/厘米, 则含水量28.5%时土壤溶液实际电导率 EC_w 为: $18.5 \times (1 + 0.200) = 22.20$ 毫姆欧/厘米。

三、田间测量

(一) 仪器设备及电极插入深度 b 的确定

田间测量仪器仍使用ZC-8型接地电阻测量

仪。四支电极由直径6毫米紫铜棒制作,长20厘米,顶端成锥形以便插入土中。电极由长约4米的导线与测量仪相连。

电极插入土壤的深度 b 随电极间距 a 而改变,一般为2—10厘米,电极间距大时,采用较大的插入深度。经田间测试发现,电极间距 a 在60厘米以上时,电极不同的插入深度 b 对地电阻的测量结果仅有微小影响,插入深度加大,电阻值微弱减小,电极间距 a 愈大, b 的影响愈小。当 a 为30厘米, b 小于(或等于)7厘米时,其影响较小,电阻值减小最大为1.6%, b 为10厘米时,影响较大,电阻值减小8.7%(表5)。因此,我们在田间测量时,考虑到土壤表层比较疏松和干燥,实际上采用两种插入深度,当测量土层厚度(电极间距 a)小于100厘米时,电极插入深度 b 为5厘米,测量土层厚度大于100厘米时 b 为10厘米。

表5 电极插入深度对测量结果的影响

电极间距 a (厘米)	插入深度 b (厘米)	地电阻值 (欧姆)	电阻变化率* (%)
30	1.5	3.22	0
	3.0	3.2	0.6
	5	3.17	1.6
	7	3.17	1.6
	10	2.94	8.7
60	1.5	1.61	0
	3.0	1.61	0
	5.0	1.61	0
	7	1.59	1.2
	10	1.57	2.5
100	1.5	0.89	0
	3	0.89	0
	5	0.886	0.4
	7	0.881	1.0
	10	0.875	1.7
150	1.5	0.577	0
	3	0.557	0
	5	0.555	0.4
	7	0.554	0.5
	10	0.552	0.9
200	1.5	0.395	0
	3	0.394	0.3
	5	0.394	0.3
	7	0.393	0.5
	10	0.392	0.8

* 不同插入深度时的电阻值,与插入深度为1.5厘米时的电阻值的相对变化量。

(二)测区的选择和测点的布置

四电极法和取样法一样。要求所选测区地块有一定代表性;测点不可布置在沟塘边及土堆田埂附近;可用方格法等间距布置测点或根据需要确定测点位置及其数量。我们在山东打渔张灌区西部粉砂壤土地区,选择三个有代表性地块。棉花茬小麦田,面积 100×100 平方米,格田田块较多,等间距布置50个测点;田菁试验地面积 50×60 平方米,田块平坦均匀,布置15个测点;第三块为糜子田,面积 50×50 平方米,田块情况与田菁地类似,布置10个测点。

(三)测量时间及方法

由于土壤含水量对测量结果有较大影响,所以最好在降雨或灌溉后土壤含水量接近田间持水量时进行测量。我们从盐渍土水盐动态及盐渍化预测预报的研究考虑,上半年5—6月份,下半年10—11月份各测一次。

一般研究认为,电极间距与电阻测量土体的深度大致相等。我们在每个测点采用30、60、100、150、200厘米五个测量电极间距。测量时转动接地电阻测量仪的发电机摇柄,同时调整“测量标度盘”,使指针指于中心线上,即可读出 R_t 值。在同一测点如此进行五个电极间距的测量读数。为检验测量结果的可靠性,在一部分测点同时取样,取样在两测量电极中间,取样深度与测量电极间距相同。取样时同时测量温度 t ,以便校正 R_t 到 25°C 。土样除测定含水量之外,还要用于制备浸提液以便进行 $\text{EC}_{1:5}$ 的测定。

四、测量结果的计算及分析讨论

(一)测量结果的计算

土壤电阻值 R_t 测定之后,就可计算土壤表观电导率 EC_a 以及某一深度间隔的表观电导率 EC_x 。进而求出土壤溶液实际电导率 EC_w (2,4)。

土壤表观电导率 EC_a (毫姆欧/厘米):

$$\text{EC}_a = \frac{1000f_t}{2\pi a R_t} \dots\dots\dots (4)$$

式中 a ——电极间距(厘米), R_t ——田间土壤温度 t 时的电阻值(欧姆)。

某一测量深度间隔的表观电导率 EC_x ,可以用加权平均的方法由下式计算:

$$\text{EC}_x = \frac{(\text{EC}_{a_1 \cdot a_1}) - (\text{EC}_{a_{1-1} \cdot a_{1-1}})}{a_1 - a_{1-1}}$$

$\dots\dots\dots (5)$

式中 a_1 ——电极间距, a_{1-1} ——前一个电极间

距(厘米), ECa_1 ——电极间距 a_1 时的表观电导率(毫姆欧/厘米), ECa_{1-1} ——电极间距 a_{1-1} 时的表观电导率(毫姆欧/厘米)。

根据土壤含水量, 由 EC_w-ECa 关系曲线即可查出相应于某一 EC_s 值的 EC_w , 或查出饱和含水量时的电导率 EC_0 。由不同含水量时 EC_w 的增

量关系求出土壤溶液实际电导率 EC_w 。

为了检验四电极法测量结果的可靠性, 我们对一部分测点进行取样分析, 用电导电极测出 1:5 浸提液的电导率 $EC_{1:5}$, 然后求出 $EC_{1:5}$ 对 EC_w 的回归方程。计算结果见表 6。

(二) 分析讨论

表 6 山东牛庄四电极测区三个地块 $EC_{1:5}-EC_w$ 关系

测 量 地 块	测点数*	测次** n	相关系数 r	截 距 a	斜 率 b
牛庄西南田菁试验地	9	45	0.936	-2.51	18.57
	12	60	0.916	-2.02	17.87
	15	75	0.840	1.09	15.50
牛庄西糜子田	7	35	0.905	-12.11	18.33
	8	40	0.812	-10.16	18.85
	10	50	0.710	-6.14	16.03
牛庄南棉花茬小麦地	13	65	0.810	0.96	18.07
	14	70	0.704	1.20	17.66
	15	75	0.614	0.213	3.84

* 测点数: 三个测量地块所布置的取土测点数分别为 15, 10, 15, 其他数字为去除少数明显不合理的测点之后的测点数。

** 测次: 每个测点进行 5 个深度的测量, 即 5 个测次。

相关分析显示, 三个地块中, 绝大多数测点 $EC_{1:5}$ 和 EC_w 之间存在较好的相关关系, 与国外一些科学工作者的测量结果和校准回归关系相一致[4]。说明用四电极法测量土壤含盐量方法是可行的, 结果也是较为满意的, 可以作为田间测量土壤含盐量的一个方法推广使用。但从相关分析结果看出, 有少部分测点 $EC_{1:5}$ 和 EC_w 之间相关关系较差。影响测量结果相关性好坏的原因, 分析有如下几方面。

首先是土壤质地、水分和盐分分布的不均匀性。四电极测量的土壤电导率, 是整个测量深度土体的平均电导率, 而用作盐分、水分测定的土壤标本, 则是从直径约 5 厘米的土柱中取出的, 很难代表整个测量土体的盐分和水分状况, 必然存在一定误差。如果在四电极测量的土体范围内多点取样, 取其平均值进行分析比较, 则可能得到更好的相关关系。

其次, 土壤含盐量的影响也是不容忽视的因素。田菁试验地和糜子田土壤含盐量较高, 2 米土层平均含盐量分别达到 0.4% 和 0.7% 以上, 而棉花茬小麦田含盐量为 0.15% 左右, 相关分析可以看出, 前者比后者相关性要好。据研究, 在一般含盐量的情况下, ECa 和 EC_w 呈直线关系, ECa 主要取决于 EC_w 的大小, 而含盐量过低时, 土壤固体颗粒表面交换性阳离子所产生的表面电导率 EC_s 对 ECa 产

生较大影响, 使 ECa 与 EC_w 偏离直线关系。在我们的测量和计算中没有考虑 EC_s 的影响, 因此, 在含盐量低的棉田中相关关系较差。

除上述诸因素之外, 微地形和表土疏松情况也对测试结果有一定影响。测点处高低不平会影响土壤水分和盐分分布不均, 也影响电流的路径。土壤的疏松和耕翻使得电极插入松土之中, 接触不良, 影响电导性能。棉花茬在小麦田播种不久, 糜子田收获之后尚未耕翻播种, 而田菁试验地已半年未耕翻, 为光板地。表 6 所示相关分析的结果与这些情况有一定关系。

根据上述对影响测量结果的原因所作的分析, 通过合理布置测点, 选择适合的测量时间, 改善取样技术, 高提土壤的代表性等措施, 测量结果的可靠性以及与取样分析之间的相关性还会有较大提高。四电极法作为一种快速测量田间土壤盐分的方法, 不但适于面上调查, 也可用于定位观测, 可在我国盐渍土研究中推广使用。

参考文献

- [1] 尤文瑞: 测定土壤含盐量的四电极法。土壤学进展, 第 5 期, 47—55 页, 1982。
- [2] Rhoades, J. D. et al., Soil Sci., 123:137—141, 1977。

(下转第 164 页)

如,有的单位研究氮肥损失机制,有的研究氮肥施用方案,有的研究氮素污染,有的研究土壤调查,有的分管土壤数据库,有的则负责土壤调查咨询。因此,工作目的明确,效果明显。

3. 机构较多,但研究重点突出,学科单项深入,一般以单位负责人的研究领域为单位的研究方向。英国仅有洛桑站及麦加里土壤所为综合性土壤研究机构,但分工明确,各有侧重。

4. 研究工作稳定,研究周期长。洛桑站的田间试验最长的达130余年,一般也有40—50年的试验结果。由于课题稳定,周期性长,落实到人,长期坚持,因此易出成果,成绩也表现突出。

5. 机构精简,长期固定的人员不多,研究所一般仅20—30人,大多是借用外来力量及研究生协助完成任务。行政干部少,行政管理及生活后勤全部社会化,工作效率高。

6. 研究人员基础好,大学研究所只补充博士研究生为研究骨干,这些人员,知识面广而深,一专多能,能自己动手改进仪器设备,短期内即可掌握所从事的研究领域,使研究工作不断深入。

7. 工作条件好,仪器设备齐全,并不断进行补充及更新,不少例行分析项目均采用连续流动分析装置,自动化程度较高。

8. 教学与科研相结合,教学、科研与培养研究生相结合。阿拜丁大学土壤系的教授,1/3时间教

学,1/3科学研究,另外1/3时间培养研究生。这几乎已成为一种长期的制度。

9. 广泛接触,不断开拓研究领域。研究所的领导及主要科研人员都与国外及外单位的知名学者有广泛联系,这对研究工作的深入与不断提高有重要作用。

当然,在另一方面,由于英国土壤机构较多,因而常出现组织松散,研究课题分散,研究观点分歧,甚至在某些单位出现因人设题,各自为政,研究内容重复等难于统一的情况。此外,研究任务与生产也有时出现脱节现象。

总的看来,在土壤研究的领域与某些研究方法上我国并不比英国差,但就土壤学学科分支,特别是土壤化学、土壤物理学等分支的学科基础,研究的深度,取得成果方面,一般为我们所不及。此外,在土壤测试手段与新技术运用上(电子计算机及遥感技术),英国的进展较快,实验室仪器设备不但齐全而且更新快,自动化程度较高,所有这些都是促进土壤学发展不可少的条件,也是我们当前存在的差距。我们认为,英国在土壤研究上之所以有如此进展,主要与该国的工业及经济高度发达,研究任务明确,研究工作稳定,研究人材素质高,及开放性的交往接触等条件有关,而这些条件正是我们应该借鉴的。

(上接第157页)

[3] J. Loveday, Experiences with the 4-electrode resistivity technique for measuring soil salinity in situ, Division of soil divisional report No.51, Commonwealth scientific and industrial research organization, Australia, 1980.

[4] Halvorson, A. D. and Rhoades, J. D., Soil Sic. Soc. Amer. Proc., 38:576—581, 1974.