

四电极法在土壤调查中的应用

杨劲松 祝寿泉 单光宗 胡纪常

(中国科学院南京土壤研究所)

四电极法是一种直接测定土壤含盐量的方法,其优点是测量速度快,移动方便。在土壤调查中(或田间观测点)有较大的实用价值。

本法主要是通过测量土壤电阻率数值,再经校准、换算得到表示土壤溶液含盐量的实际电导率。在田间,土壤电阻率测值,除受土壤含盐量的影响外,还受盐分组成、土壤质地和结构、土壤含水量、温度等因素的影响,但通过四电极电导池法进行校正,可以消除这些影响。关于四电极法的基本原理和测量方法已有详细介绍^[1-3]。本文是作者在江苏、上海、山东及河北等地进行土壤盐渍化调查中应用四电极法的一些心得。

一、四电极法的测量程序

(一)田间测量

测量点(测点)应选择在地势比较平坦的地方,且其盐分含量和组成也应具有代表性。

在确定需要测量的土壤深度后,将四根紫铜电极(直径6mm,长250mm)插入土壤中(电极的间距大致与测量的土壤深度相当),用ZC—8型接地电阻仪分别测量各土层的土壤电阻率。在实际测量中,我们采用了10、20、40、60、100、150、200cm 7个电极间距,分别测量相应厚度土层的电阻率值。在测量电阻率的同时,每个测点还要用温度计测量土温;并按测量电阻率的层次,分别采集土样装入铝盒,带回室内用烘干法测定各层土壤的含水量。

(二)采集供电导池用的土样

在田间用四电极测量后,即可采集供电导池用的土样。采样区的土壤(包括质地和结构)及地下水(包括盐分组成等)条件应更具有代表性。

土样的采集方法如下:在田间挖一个深度在30—60厘米的小坑,然后用与电导池内径(80mm)相同的环刀采集土样,尽量不要破坏土壤样品的原有结构。将环刀中的土样小心移入电导池内,务使土样与池体密合,加盖密封后带回室内待测。与此同时,还应采集能代表该地区地下水盐分组成的地下水样品。

(三)制作校正曲线

电导池的构造及电导池常数K的测定已有专文介绍^[2]。校正曲线的操作步骤如下:

根据电导池采样点的地下水化学分析结果,按其离子组成比例,人工配制盐溶液以供实验用。此盐溶液应配制成6—8个浓度级,其电导率分别介于1.5mS/cm与30.0mS/cm之间。将上述不同浓度的溶液按由低浓度到高浓度的顺序,分次加入电导池中。每用一个浓度级的盐溶液淋洗电导池内土壤时,必需淋洗到淋出液的电导值与加入的盐溶液电导值接近并稳定不变,表示电导池内部已为该一浓度盐溶液所平衡。待重力水排尽后,电导池内土壤含

水量即相当于饱和含水量,此时用电导仪直接测出的池内土壤溶液的实际电导率(EC_w)即为加入的盐溶液的电导率。接着,用四电极法测定电导池内土壤电阻值(R_t)并测量电导池的土壤温度,记下读数,根据下式计算池内土壤的表观电导率(EC_a)。

$$EC_a = K \cdot \frac{f_t}{R_t}$$

式中 F_t 为 t 温度下的电导率校正到 25°C 的校正系数, K 为电导池系数。

用不同浓度的盐溶液淋洗电导池,即可得到一系列的 EC_w 和 EC_a 值。对其进行线性回归分析,即可得土壤溶液实际电导率(EC_w)与土壤表观电导率的校正方程。由于不同地区的土壤和地下水条件有差异,故得到的校正系数也不尽相同。使用该校正方程,即可由实测的土壤电阻率换算的土壤表观电导率值。计算出土壤溶液实际电导率,反映土壤含盐水平。

(四) 结果计算

计算 EC_w 的步骤如下:

(1) 求出土壤表观电导率 EC_a

$$EC_a = \frac{1000 \times f_t}{2\pi a R_t} \quad (\text{mS/cm})$$

a 为测量电极间距, f_t 为温度校正系数, R_t 为土壤电阻率。

(2) 求出某一土壤层次的表观电导率 EC_x

$$EC_x = \frac{(EC_{a_i} \cdot a_i) - (EC_{a_{i-1}} \cdot a_{i-1})}{a_i - a_{i-1}}$$

a_i 为电极间距, a_{i-1} 为上一层次电极间距, EC_{a_i} 和 $EC_{a_{i-1}}$ 分别为电极间距为 a_i 和 a_{i-1} 时的 EC_a 值。

(3) 根据电导池试验得出的饱和含水量时 EC_w — EC_a 关系方程,求出饱和含水量时土壤溶液实际电导率值 $EC_{w'}$ 。

$$EC_{w'} = \frac{EC_a - a}{b}$$

式中 a 和 b 分别为相应的电导池试验所得关系方程的截距和斜率值。

(4) 进行水分校正

a. 求出 EC_w 的增量 Δ , 当含水量为 25% 以上时, $\Delta = 2.26 - 7.23Q$; 当含水量为 25%—20% 时, $\Delta = 4.35 - 15.55Q$; 当含水量为 20%—15% 时, $\Delta = 16.78 - 79.10Q$ 。其中 Q 为烘干法测定的土壤含水量。

b. 求出水分校正后的 EC_w 值

$$EC_w = EC_{w'} \cdot (1 + \Delta)$$

根据以上步骤,即可计算出不同深度土体或不同土壤层次的土壤溶液实际电导率值 EC_w 。在进行大批量数据计算时,有条件者可编制计算机程序计算,可节省工作量。

二、在盐渍土土地评级中的应用

1984 年 4 月及 10 月我们用四电极法对山东省茌平县丁块试区的 46 个测点土壤的盐分季节动态及其分布情况进行了研究。从测量结果可以看出,在同一测点处,4 月份和 10 月份测量的 2 米土体平均土壤溶液实际电导率值 EC_w 较接近。但从盐分在整个土壤剖面分布情况看,两

次测量值有较明显的差异。4月份正值灌水季节,由于灌溉水的淋洗作用,造成盐分下移,并在中、下层次富集。因而,剖面中土壤含盐量最高值出现的层次较深,一般均在10—60cm以下,总的盐分分布趋势为上层低而下层高。10月份降水量少,气温高,属秋季积盐期,盐分上移,并在表层积累。土壤含盐量最高值出现的层次较浅,一般均在20—40cm以上,全剖面盐分分布趋势变为上层高而下层低。另外,从4月份和10月份两次测量值的对比情况看,剖面上层(0—60cm)的4月份测量值均比10月份测量值低,而下层(60—200cm)的4月份测量值均比10月份高。上述盐分动态基本上反映了当地气候条件的变化对土壤盐分运动的影响。因此,我们认为四电极法可作为一种定点观测手段,是灌区用于监测田间土壤盐分动态较为理想的方法。

在山东茌平和上海市前进农场,我们对当地根据生产情况及土壤盐渍化状况划分的一级地和二级地分别进行四电极法测量,以求得定量或半定量的土壤含盐指标,作为土地评级的依据。茌平县的一级地有9个测点,二级地8个测点;前进农场一级地和二级地均为3个测点。各取其2米土体平均 EC_w 进行方差分析,以确定不同级别地块四电极法测量值的差异程度(表1和表2)。方差分析结果表明,四电极法在不同级别田块的测量结果差异显著,F值分别为

表1 四电极法在不同级别田块测量值的方差分析(前进农场)

土地级别	1	2	3	组内自由度	组间自由度	F值	F临界值 (0.01)
一级	1.99*	2.77*	2.37*	1	4	82.53	21.20
二级	4.60*	4.38*	4.56*				

* 为相应的四电极法测量值 EC_w

表2 四电极法在不同级别田块测量值的方差分析(茌平县)

土地级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	组内 自由度	组间 自由度	F值	F临界值 (0.01)
一级	2.71	1.83	2.79	2.92	2.35	2.81	1.73	1.53	2.97	2.54	1	18	64.32	8.28
二级	6.22	3.39	5.94	4.79	4.61	7.20	5.63	5.92	4.78	5.71				

64.32和82.52,均在0.01置信水平显著差异。说明用这种方法测量的 EC_w 能较好反映土体平均含盐水平,能为评定土地级别提供一定的依据。

三、问题讨论

(一) EC_w 与土壤实测含盐量的关系

我们用四电极法对山东、上海、江苏和河北等地土壤进行了研究。由于各地的土壤质地及地下水盐分组成等不尽相同。因此,需要采集不同地区的土壤和地下水样品,供电导池试

表3 用于淋洗电导池内土壤的盐溶液离子组成(mol百分比)

电导池号	土壤质地	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
1号	轻壤	—	—	45	5	—	10	40	—
2号	中壤	—	22	28	—	10	17	23	—
3号	中壤	—	—	45	5	—	10	40	—
4号	轻壤	—	7	24	19	3	16	31	—

验用, 才能获得不同地区的土壤溶液实际电导率与土壤表观电导率的关系方程。我们采集的电导池样品, 土壤质地分别为轻壤质和中壤质。根据采样点地下水化学分析结果, 按离子组成比例配制供电导池试验用的盐溶液, 分别代表以氯化物为主, 硫酸盐—氯化物为主及重碳酸盐—氯化物为主(见表 3)。

从电导池试验的结果看(表 4), EC_w 和 EC_a 的关系密切, 相关系数均在 0.999 以上。经 F 检验, 在 0.001 置信水平极显著相关。因此, 依据相关方程完成土壤表观电导率与土壤溶液实际电导率之间的换算是可行的。从不同盐分组成及不同土壤质地的电导池试验结果来看, 其相应的 EC_w-EC_a 关系方程的系数 a 和 b 有一定差异, 这反映了土壤质地、地下水盐分组成对测量的影响, 需要通过电导池试验予以消除。在实际应用中, 如不同测量区域的土壤质地盐分组成有较大差异, 则应分别取样做电导池试验, 这样求出的关系方程进行 EC_w-EC_a 的换算较为准确。如在土壤质地及盐分组成状况相类似的地区, 应用四电极法测量时, 也可只用同一关系方程进行计算, 这样对野外调查中的应用较为方便。

表 4 电 导 池 试 验 结 果 单位: mS/cm

观 测 次 数	1 号		2 号		3 号		4 号	
	EC_w	EC_a	EC_w	EC_a	EC_w	EC_a	EC_w	EC_a
1	2.07	0.714	2.16	0.752	1.43	0.538	2.70	0.862
2	3.43	1.10	2.67	0.855	2.04	0.746	4.24	1.26
3	4.37	1.70	4.40	1.29	3.12	1.01	6.43	1.72
4	6.98	2.24	7.19	1.87	4.99	1.59	13.3	3.55
5	10.4	3.41	11.1	3.14	6.98	2.13	16.5	4.34
6	14.6	4.83	16.4	4.59	9.96	2.85	21.4	5.53
7	21.4	6.91	23.6	6.03	14.4	4.22	24.8	6.44
8	32.6	10.0	30.1	7.97	—	—	31.1	8.02
9	—	—	36.5	9.60	—	—	—	—
EC_w-EC_a 相关方程	$EC_w = -0.472 + 3.24EC_a$		$EC_w = -0.625 + 3.87EC_a$		$EC_w = -0.548 + 3.57EC_a$		$EC_w = -0.627 + 3.96EC_a$	
相关系数 r	0.9992***		0.9993***		0.9994***		0.9999***	

注: 以上均为饱和含水量时的测量结果。

根据上述 EC_w-EC_a 关系方程, 即可由田间实测的土壤电阻率计算出土壤溶液实际电导率。然而, 目前国内仍习惯于土壤可溶盐含量来衡量土壤含盐水平。所以, 我们在进行四电极法测量的同时, 采集了 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—100, 100—150, 150—200cm 共计七个层次的土样, 用化学分析方法测定可溶盐含量, 并与同层次的四电极法测量结果比较, 以证明土壤溶液实际电导率 EC_w 可用于衡量土壤含盐水平。根据相应关系方程, 即使土壤溶液实际电导率与土壤可溶盐含量进行换算。在上述四省市范围内, 我们共采集 30 个剖面 185 个层次的土样, 用化学方法测定的可溶盐含量与四电极法测量结果进行回归分析, 结果如表 5 所示。

回归分析结果说明, 四电极法测量值与盐分分析值关系密切, 相关系数高, 经 F 检验, 以上三个地区四电极法测量值与盐分分析值均在 0.001 置信水平的极显著相关。因而, 我们认为用土壤溶液实际电导率 EC_w 值来衡量土壤含盐水平是可行的。

为比较全剖面平均 EC_w 值与土壤可溶盐含量值, 我们还选择了 0—150cm 土体的 EC_w

表5 四电极测量值(EC_w)与实测土壤含盐量回归分析结果

测量地区	剖面数	层次数	回归方程	相关系数r
山东	10	60	$S = 0.017 + 0.022EC_w$	0.729***
河北	9	54	$S = 0.047 + 0.019EC_w$	0.835***
上海、南通	11	71	$S = 0.037 + 0.018EC_w$	0.836***

注：表中S为土水比1:5的土壤可溶盐含量(%)

表6 0—150cm土体 EC_w 与含盐量回归分析结果

采样地区	剖面数	回归方程	相关系数r
河北	9	$S = 0.026 + 0.021EC_w$	0.887**
山东	10	$S = 0.058 + 0.024EC_w$	0.815**
上海、南通	11	$S = 0.014 + 0.021EC_w$	0.949**

注：S为0—15cm土体平均含盐量(1:5土水比)

值与同剖面土壤平均含盐量进行回归分析，结果见表6。经t检验，证实四电极法测量的0—150cm土体平均 EC_w 值与土壤平均含盐量在0.01置信水平显著相关。因此，四电极法测量值不仅在分层测量上，而且在全剖面整体测量的情况下，都能较准确地反映土壤的含盐量。

(二)测量要点

由于四电极法是通过测量土壤电阻率而换算成土壤溶液电导率或土壤可溶盐含量，所以影响电阻率的许多因子均能影响测量精度。根据我们的实际使用经验，在测量中需注意以下几点：

1.在田间测量时，要注意合理布置测点，尽量选择较平坦、土壤质地较均一的地块，避免在刚翻耕过的地块上测量。

2.尽可能在土壤含水量较高的田间条件下进行测量。含水量至少应在15%以上，以25%以上为佳。在土壤含水量相近的情况下，可选择几个代表测点作水分校正之用，不需每个测点均采样测定土壤含水量。

3.采集电导池样品时，尽可能选择能代表剖面土壤特性的田块和层次，样品以30—60cm的层次采集为佳。不应在刚耕作过的或石块较多的田块采集，还应避免作物根系、动物穴等影响而造成误差。

4.计算一定厚度土体的平均含盐水平时，既可根据该深度四电极法测量结果直接计算，也可采用各层次测量值加权平均的方法计算，但以后一种方法为好，具体计算公式如下：

$$EC_w \text{ 平均} = \frac{\sum_{i=1}^h a_i \cdot EC_{wi}}{\sum_{i=1}^h a_i}$$

式中 a_i 为第 i 层的厚度， EC_{wi} 为第 i 层的 EC_w 值。

四电极法测量土壤盐分，就其精度来说，虽比不上传统的盐分分析方法，但因其测量速度快、省工、方便和经济，只要观测条件选择合适和进行多点测量即可弥补其不足。至于水分校正的合理简化和测量精度的进一步提高等问题，仍有待于进一步探索。

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，10(5):47-55页，1982。
- [2] 肖振华等，用四电极法测定土壤含盐量的试验研究。土壤，17(3):153-157页，1985。
- [3] Loveday, J. Division of Soils Divisional Report, No. 51, CSIRO, Australia, 1980.