

土壤盐分的原位测定方法^①

刘梅先, 杨劲松*

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 在干旱半干旱地区, 土壤盐渍化是制约农业生产的重要因素。土壤盐分的测定和诊断是土壤盐渍化研究工作中的重要内容, 传统上一般通过测定土壤浸提液电导率来测定土壤盐分, 过程繁琐, 费时费事, 不可避免地要破坏原土样。在提倡精准农业的今天, 土壤盐分的快速、有效和可靠的原位测定显得非常重要。土壤盐分原位测量方法有多种, 在原理上可分为土壤溶液电导率法和土壤表观电导率法两大类。在现有条件下, 土壤溶液电导率可通过原位采集土壤溶液后在实验室测定和用土壤盐分传感器直接测定; 土壤表观电导率法主要通过四电极、电磁感应仪和时域反射仪测定。本文分析了不同方法和各种仪器的基本原理, 探讨了不同方法的优缺点和发展前景, 为土壤盐渍化研究中盐分测定方法的选用提供参考。

关键词: 土壤盐分; 原位测定; 四电极; 电磁感应仪 (EM38); 时域反射仪 (TDR)

中图分类号: S151.9; S159-3

盐渍土主要存在于干旱半干旱地区, 据统计, 全球受到盐渍化影响的土地面积达到 9.55 亿 hm^2 ^[1], 广泛分布于全世界 100 多个国家和地区。我国盐渍土面积约 0.17 亿 hm^2 ^[2], 主要分布在东北、西北、内蒙-宁夏-甘肃以及沿海地区, 严重制约了我国经济的发展。土壤盐分的测定和诊断是土壤盐渍化研究工作中的重要内容。由于土壤盐分与灌溉管理措施、降雨蒸发、土壤质地、地下水位和地下水矿化度等因素密切相关^[3], 而土壤的空间变异性, 使得盐渍的诊断变得十分复杂。测定土壤盐分的传统方法为土壤浸提液法, 其中饱和土壤浸提液由于可表征土壤中盐分状况的优点而被推荐为测定土壤盐分的一般方法^[4-5], 但是, 较大水土比 (如 1:1、1:2、1:5 和 1:10) 的土壤悬液容易制备, 且较大水土比浸提液和饱和浸提液测定结果之间存在高度的相关性^[6-7], 所以被广泛应用于各种研究中^[7-8]。但是, 浸提液法过程繁琐, 费时费事, 不可避免要破坏原样, 且由于土壤盐分的时空变异性, 精度有限, 不能用于原位监测, 更不适用于长期监测或水盐动态研究中。在提倡精准农业的今天, 土壤盐分的快速、有效和可靠的原位测量显得非常重要。现有常用的土壤盐分原位测量方法大致可分为土壤溶液法和

土壤表观电导率法两大类, 本文主要就其测定原理和应用进行综述, 并讨论各方法的优缺点, 为土壤盐渍化研究中土壤盐分的测定方法选用提供参考。

1 土壤溶液电导率法

土壤溶液是含有溶质和溶解性气体的土壤间隙水, 其不仅是多数土壤化学反应和土壤形成过程发生的场所, 也是植物根系吸取养分的源泉。土壤溶液的盐分状况直接影响着植物的生长, 理论上评价土壤盐渍化更直接的指标, 但由于土壤溶液电导率 (EC_w) 随土壤含水率变化剧烈和土壤溶液难以采集的原因未被推广应用^[9]。原位测定土壤溶液盐分方法有两种, 一种为采集土壤溶液后在实验室测定, 另一种为以土壤盐分传感器直接测量土壤溶液电导率^[3]。

1.1 土壤溶液原位采样

原位土壤溶液样品通常通过真空提取器 (vacuum extractor) 采集。1904 年 Briggs 和 McCall 描述了用吸杯法 (suction cup) 采集土壤溶液的原理^[10], 其主要由吸杯 (suction cup)、采样瓶 (sampling bottle) 和抽气容器 (suction-container) 3 个部分组成, 其中吸杯是最重要的组成部分, 大多由陶瓷制成, 也可用人造

①基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903001)、海洋公益性行业科研专项经费项目 (201105020-3, 201105020-4)、江苏省科技支撑计划项目 (BE2010313)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-359) 和国家基金项目 (41171181) 资助。

* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘梅先 (1986—), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事土壤盐渍化及其环境效应研究。E-mail: mxliu@issas.ac.cn

刚玉、烧结玻璃、尼龙、聚氯乙烯 (PVC)、聚偏二氟乙烯 (PVDF) 和聚四氟乙烯 (Teflon) 和不锈钢等材料制成, 如罗小三等^[11]以聚丙烯纤维为过滤材料制成了一种简单实用的采集器。经过几十年的发展, 土壤溶液采样器发展了多种版本, 如可忽略土壤水分迁移影响的微型采样器^[12]、采样后可自动停止采样的采样器^[13]、利用被动扩散原理收集土壤溶液的 Temionic 陶瓷杯采样器^[14]和根际土壤溶液采样器 (Rhizon-SMS) 等^[15]。无论何种采样器, 误差是不可避免的, 这与土壤溶质的吸附解吸、扩散、采样速率和采样器尺寸等密切相关^[3]。土壤溶液采样器的主要缺点包括: ①土壤采样器只能采集土壤大孔隙中的水溶液, 但小孔隙溶液中却有不同离子组成和浓度; ②采样时土壤溶液需经过多孔陶瓷 (或其他材质) 过滤, 所得样品与土壤原溶液也有一定的差异; ③采样器采集范围有限, 只能采集某点样品, 不能消除土壤盐分的空间变异。另外, 土壤溶液原位采集需要较高的土壤含水率, 采样耗时长并且难以获得足量样品, 在盐渍土研究中具有很大的局限性。

1.2 土壤溶液电导率的原位测量

当不需测量土壤溶液的离子组成时, 可采用土壤盐分传感器直接测量土壤溶液电导率来评估土壤盐分。Kemper^[16]首次提出并研制了土壤盐分传感器, 其工作构件是一个充满一定浓度的盐溶液 (KCl) 的“多孔陶瓷电导池”, 当传感器埋设于土壤中时, 电导池内溶液与土壤溶液达到平衡, 从而表征了土壤溶液浓度。常用的土壤盐分传感器有 Cat No 5500 和 TYC-2 等, 已广泛应用于农业研究中^[17-19], 特别是在长期连续的土壤盐分监测中。现行的土壤盐分传感器具有较高的灵敏度、稳定性和准确度, 但也有明显不足。Wood^[20]和Wesseling 等^[21]研究发现, 当土壤基质势为 $-0.05 \sim -0.15$ MPa 时, 土壤盐分传感器响应时间长达 $2 \sim 5$ 天, 在更低的土壤基质势条件下响应时间更长; 我国研制的 TYC-2 型盐分传感器在土壤达到平衡需要 $18 \sim 24$ h, 要求土壤最小含水率不能低于 12% ^[22]。由此可见, 土壤盐分传感器不适于监测短期和快速的盐分变化, 更不适用于干燥环境。

2 土壤表观电导率法

2.1 理论基础

土壤表观电导率 (apparent electrical conductivity) 是土壤的一个基本性质, 包含了反映土壤质量与物理化学性质的丰富信息。表观电导率的测定最早出现于 19 世纪末 20 世纪初, 首先应用于地质勘察中。表观

电导率和介质性质之间的关系也研究较早, Archie 于 1942 年提出了一个适用于饱和岩石或砂土的经验公式^[23]:

$$EC_a = aEC_w\phi^m \quad (1)$$

式中, EC_a 为表观电导率 (dS/m); a 为经验常数; EC_w 为介质中溶液电导率值 (dS/m); ϕ 为土壤孔隙度 (m^3/m^3); m 为胶结指数 (cementation exponent), 一般为 $1.2 \sim 4.0$ ^[24]。土壤表观电导率自上世纪 70 年代开始用于估测土壤盐分, 常用以下经验公式来描述土壤电导率和土壤盐分之间关系^[25]:

$$EC_a = EC_s + T\theta EC_w \quad (2)$$

式中, EC_s 为土壤表面电导率 (surface electrical conductivity) (dS/m); θ 为土壤体积含水率 (m^3/m^3); EC_w 为土壤溶液电导率 (dS/m); T 为传输系数, 一般可表示为 $T = a\theta + b$, a 和 b 为常数。在此基础上, Bohn 等^[26]结合毛管上升公式和式 (2), 推导得出土壤表观电导率与土壤水分张力的平方呈反相关, 如式 (3) 所示:

$$EC_a = EC_s + c \frac{EC_w}{\psi^2} \quad (3)$$

式中, EC_a 为土壤表观电导率 (dS/m); EC_s 为土壤表面电导率 (dS/m); EC_w 为土壤溶液电导率 (dS/m); ψ 为土壤水势 (Pa)。随后, Rhoades 等^[27]拓展了以上经验公式, 建立了土壤-水体系表观电导率的宏观概念模型, 如图 1 所示。

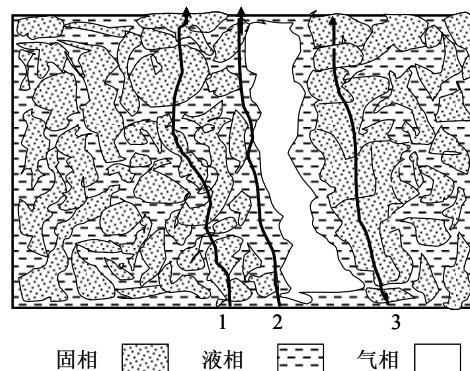


图 1 土壤导电通路

Fig. 1 Pathways of electrical conductivity in soil

模型假设土壤-水体系中存在 3 个并联导电通路, 土壤表观电导率由①小孔隙液相电导, ②大孔隙连续液相电导, ③固相表面电导 3 部分并联而成。基于此, 土壤表观电导率可以用式 (4) 表示:

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_s}{\theta_s EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s} \right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_{wc} \quad (4)$$

式中, EC_a 为土壤表面电导率 (dS/m); θ_{ws} 和 θ_{wc} 分别为存在于小孔隙中 (series-coupled pathway) 和大孔隙 (continuous pathway) 中的体积含水量 (m^3/m^3); θ_s 为土壤固相颗粒总体积含量 (m^3/m^3); θ_w 为总体积含水量 (m^3/m^3); EC_s 为平均表面电导率 (dS/m); EC_{ws} 和 EC_{wc} 分别为小孔隙水和大孔隙中溶液电导率 (dS/m)。式 (4) 可以准确地表征土壤表观电导率与土壤盐的关系, 但参数数量众多, 个别参数甚至很难获得, 在一定程度限制了该式在土壤盐分预测中的推广应用。为减少待测参数数量, EC_s 、 θ_{ws} 和 θ_s 等参数可以通过下列经验公式估计^[3,27]:

$$EC_s = 0.023\%C - 0.0209 \quad (5)$$

$$\theta_{ws} = 0.528\theta_w + 0.0463 \quad (6)$$

$$\theta_s = \rho_b / 2.65 \quad (7)$$

$$EC_w = \frac{EC_e \rho_b Sp}{100\theta_w} = EC_{ws} = EC_{wc} \quad (8)$$

式 (5) ~ 式 (8) 中, C 为土壤黏粒含量 (%); ρ_b 为土壤体积质量 (容重) (kg/m^3); Sp 为土壤饱和度 (%); EC_w 为土壤溶液平均电导率 (dS/m); EC_e 为饱和浸提液电导率 (dS/m)。由此可知, 当知道 EC_a 、 Sp 、 θ_w 和 ρ_b 4 个参数时, 便可计算出 EC_w 或 EC_e 。

$$EC_w = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

式 (9) 中, $a = \theta_s(\theta_w - \theta_{ws})$; $b = (\theta_s + \theta_{ws})^2 EC_s + (\theta_w - \theta_{ws}) \theta_{ws} EC_s - \theta_s EC_a$; $c = \theta_{ws} EC_s EC_a$ 。

2.2 土壤表观电导率的影响因素

影响土壤表观电导率的因素有很多, 大致可分为 4 类: ①土壤结构组成: 包括土壤孔隙度, 含水率和土壤结构; ②土壤固相颗粒组成: 颗粒形状, 粒径分布, 阳离子交换量, 有机质含量; ③土壤溶液: 离子强度, 离子组成; ④环境因素: 土壤温度。其中土壤溶液因素受田间管理措施和环境的影响较大^[24]。

土壤含水率和土壤盐分是影响土壤表观电导率的最主要因素, $EC_a - EC_w (EC_e) - \theta$ 三者之间的关系更是用土壤表观电导率估计土壤盐分的理论基础, 国外研究报道很多^[25-28], 但国内对此研究较少。李成保等^[29-30]研究了黄棕壤、砖红壤、滨海盐土、新疆内陆盐土和东北盐土 5 种土壤表观电导率和土壤含水率的关系发

现, 除黄棕壤外, 其余土壤的 $EC_a - \theta$ 均不呈线性关系。刘广明等^[31]研究了土壤电导率与土壤含盐量的关系, 获得了不同含盐量土壤的电导率随水分含量变化的规律。

土壤含有相当可观的带电颗粒, 但有些情况下土壤溶液电导率却很低, 此时土壤颗粒吸附的离子对表观电导率的影响非常明显。Shainberg 等^[32]在土壤饱和和含水量情况下研究了不同黏粒含量对表观电导率的影响, 两种土壤黏粒含量分别为 8% (Bonsall A) 和 35.5% (Bonsall B), 发现 Bonsall B 的表观电导率明显高于 Bonsall A, 且当 $EC_w > 4.0$ dS/m 时, 两者 EC_a 与土壤溶液电导率 EC_w 均成线性关系且斜率相同; 当 $EC_w < 4.0$ dS/m 时, 两者 $EC_a - EC_w$ 均呈非线性关系。

温度是影响电导率另一重要因子, 通常温度每升高 1℃, EC 则以约 1.9% 的速率上升。研究中通常情况下以 25℃ 时电导率作为分析比较的基础, 在不同温度条件下测得的电导率必须校正到 25℃ 时的 EC :

$$EC_{25} = f_i EC_i \quad (10)$$

式中, EC_{25} 为 25℃ 时电导率 (dS/m); f_i 为校正系数; EC_i 为在不同温度下测得的电导率 (dS/m)。 f_i 可以用以下经验公式估算^[33-34]:

$$f_i = 0.4470 + 1.4034 e^{-T/26.815} \quad (11)$$

或,

$$f_i = 1 - 0.020346(T-25) + 0.003822(T-25)^2 + 0.000555(T-25)^3 \quad (12)$$

但土壤中 EC_a 和温度 T 的关系十分复杂, 若定义温度每变化 1℃ 所能引起土壤表观电导率变化为温变率 ($\Omega/(cm^\circ C)$), 李成保^[30]研究得出不同土壤在 5℃ ~ 30℃ 之间的温变率顺序为滨海盐土 > 内陆盐土 > 苏打盐土 > 黄棕壤 > 砖红壤 > 红壤 > 赤红壤; 而对于同种土壤而言, 当土壤体积质量相近时, 饱和土壤温变率一般大于湿润土壤。

2.3 土壤表观电导率测定方法

2.3.1 电阻法 (ER) 由于四电极能消除电极极化效应, 是电阻法测量土壤表观电导率的常用方法。四电极由 Wenner 和 Schlumberger 于上世纪 20 年代提出^[35], 后来用于土壤电导率的测定。四电极包括两个电流电极和两个电压电极, 工作时向电流电极提供激励电流, 通过检测电压电极的电势来确定土壤表观电导率。四电极有 Wenner、Schlumberger 和 Polar-dipole 三种测量组态^[36], 如图 2 和图 3 所示:

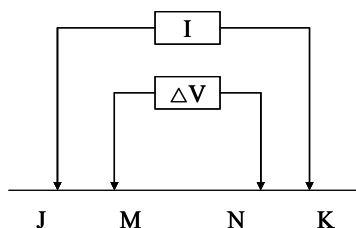


图2 Wenner 和 Schlumberger 组态

Fig. 2 The scheme of Wenner and Schiumberger array

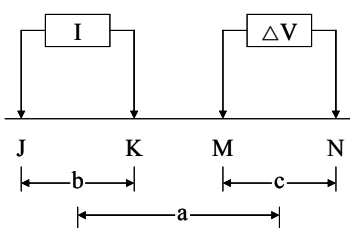


图3 Polar-dipole 组态

Fig. 3 The scheme of Polar dipole array

(1) Wenner 组态, 当 $JM = NK = MN = a$ 时:

$$EC_a = \frac{I}{2\pi a \Delta V} \quad (13)$$

(2) Schlumberger 组态, 当 $JM = NK = a-b/2$, $JK = 2a$, $MN = b$ 时:

$$EC_a = \frac{I}{\pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \Delta V} \quad (14)$$

(3) Polar-dipole 组态, 当四电极排列如图3时:

$$EC_a = \left[\frac{1}{a - \frac{c}{2} + \frac{b}{2}} - \frac{1}{a - \frac{c}{2} - \frac{b}{2}} - \frac{1}{a + \frac{c}{2} + \frac{b}{2}} + \frac{1}{a - \frac{c}{2} + \frac{b}{2}} \right] \frac{I}{2\pi \Delta V} \quad (15)$$

式(13)~式(15)中, EC_a 为土壤表观电导率(S/m); ΔV 为电压电极间电势差(V); a 、 b 、 c 为各电极间间距(m)。四电极测量值为两测量电极之间土壤平均表观电导率, Halvorson 和 Rhoades^[37]估计四电极测量土体体积为 $5\pi a^3/6$, a 为电压电极间距(m), 调节两测量电极间距便可改变测量深度和土体体积。四电极分为探针式和水平式两种, 探针式四电极可以用于定位监测, 水平式四电极可用于土壤盐分的大面积调查。

四电极已广泛应用于土壤盐分的测定^[37-39]。常用的四电极电导率仪有 ZC-8 型接地电阻测量仪、TY-1 型土壤电导仪、fixed-array 电导仪、Martek SCT-10 电导仪、STEC-100 型便携式土壤电导仪和 Veris3100 电导仪等。水平式四电极 Veris3100 电导仪专门用于土壤电导率的大面积调查^[40-41], 如图5所示, 其安装有6个按 Wenner 排列的犁刀式电极, 可同时测定 30 cm 和 90 cm 土层电导率^[42]。



图4 STEC-100 便携式土壤电导率仪

Fig. 4 STEC-100 direct soil EC probe



图5 Veris 3100 电导率仪

Fig. 5 Veris 3100 EC Mapping Unit

四电极测值和土壤盐分(EC)之间的校正是应用四电极进行土壤盐分估测的重要环节, 也是影响预测精度的主要原因。四电极测值可通过式(3)~式(9)进行校正, 缺点是待估参数多, 过程繁琐, 而且有些参数难以获得; 也可以通过回归法获得经验性的校正公式, 如石元春等^[38]在曲周试验站通过小区法进行试验, 得出了不同土壤含水量区段内 EC_a 、 EC_w 和 θ 的校正关系, 但此类校正结果普适性差, 往往只适用于特定的土壤中。

2.3.2 电磁感应仪法 (EM) 电磁感应 (EM) 技术用于测量表观电导率出现于上世纪 70 年代末, 现在较为常用的有 Geonics EM38 和 EM31。EM38 (图 6) 的水平测量模式测量深度约为 0.75 m, 垂直测量模式测量深度约为 1.5 m, EM31 测量深度约为 6 m, 由于 EM38 更适合于测定作物根层土壤, 应用更为广泛^[43]。电磁感应仪 (以 EM38 为例) 主要有信号发射 (Tx) 和信号接收 (Rx) 两个端子组成, 两者之间相隔一定距离 S 。如图 7 所示。



图 6 EM38 磁感式电导率仪

Fig. 6 EM38 Electromagnetic Induction Meter

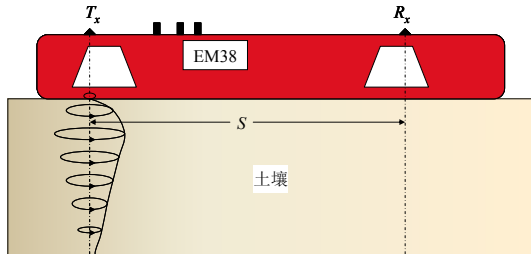


图 7 电磁感应技术原理示意图

Fig. 7 EM38 principle of operation in soils

工作时, 信号发射端子产生磁场强度随时间变化并随土壤深度的增加而逐渐减弱的原生磁场 (H_p), 变化磁场使土壤中出现微弱的感应电流, 从而诱导出次生磁场 (H_s), 信号接收端子既接收原生磁场信息又接收次生磁场信息并转化为与土壤特征有关的输出信号。通常, 原生磁场和次生磁场均是两端子间距、交流电频率和土壤表观电导率的复杂函数, 且次生磁场与原生磁场强度的比值与大地电导率呈直线关系, 土壤表观电导率可以表示为:

$$EC_a = 4 \left(\frac{H_s}{H_p} \right) / 2\pi f \mu_0 S^2 \quad (16)$$

式中, EC_a 为土壤表观电导率 (mS/m); H_s 、 H_p 分别为次生磁场和原生磁场强度; f 为发射频率 (Hz); S

为发射端子与接收端子之间距离 (m); μ_0 为表示空检测场传导系数^[44]。EM38 测值并非不同深度土层电导率的简单平均而是加权值^[3]。若以 $\phi_h(z)$ 、 $\phi_v(z)$ 分别表示 EM38 水平和垂直模式下次生磁场随深度的相对贡献率, $R_h(z)$ 、 $R_v(z)$ 分别表示此生磁场随深度的累积贡献率, 则有^[45]:

$$\phi_h(z) = 2 - 4z(4z^2 + 1)^{-0.5} \quad (17)$$

$$\phi_v(z) = 4z(4z^2 + 1)^{-1.5} \quad (18)$$

则电磁感应仪 EM38 水平与垂直模式测得电导率 EM_h 、 EM_v 可以表示为:

$$EM_h = \int_0^{z_h} (2 - 4z(4z^2 + 1)^{-0.5}) EC_a(z) dz \quad (19)$$

$$EM_v = \int_0^{z_v} (4z(4z^2 + 1)^{-1.5}) EC_a(z) dz \quad (20)$$

EM38 输出值为土壤特征有关的信号, 必须经过解译和校正过程才能转化为土壤眼分值。目前应用较多的解译方法主要有多元回归系数法 (multiple regression coefficients)^[46]、确定系数法 (established coefficients)^[47-48]、深度权重系数法 (simple depth-weighted coefficients)^[49]、模拟系数法 (modeled coefficients)^[50] 和数值系数法 (mathematical coefficients)^[51]。(多元) 回归系数法是研究土壤剖面盐分与磁感式表观电导率关系的经典方法, 其需要分别在水平和垂直模式下在地表不同高度测量土壤电导率 EM_h 和 EM_v , 建立不同深度土层的 EM 值-土壤盐分的回归方程, 具有很高的精度, 但每个土层需要确定两个以上的参数, 存在着计算量大、待估参数过多的缺陷, 在一定程度上限制了回归模型的实用性。确定系数法利用电磁感应仪的理论深度响应方程来建立解译方程, 有效地减少了参数数量 (只需 EM_{0h} 和 EM_{0v} 两个参数), 提高了 EM 电磁感应仪的数据获取效率, 但其不适用于表聚型和底聚型盐剖面。目前也有学者通过其他物理模型来减少解译模型参数数量, 如杨劲松和姚荣江^[52]采用指数衰减函数的积分变换对底聚盐剖面进行拟合, 使待估参数数量大幅降低并具有较高预测精度; 张同娟等^[53]运用 Logistic 模型对底聚型盐剖面进行了参数拟合和验证, 获得较高的预测精度。但影响 EM38 测量结果的因素众多, 主要包括土壤含水量、土壤质地、土壤盐分、土壤有机质和土壤温度等^[54], 尤其是土壤含水率, 而以上校正解译方法大多是在土壤含水率相同或相近的情况下 (饱和含水率) 获得的, 其他因素的变化将影响到解译精度。

2.3.3 时域反射法 (TDR) 时域反射仪 (Time domain

refletrometry, TDR) 始于电缆的检测 (上世纪 30 年代), 上世纪 80 年代开始用于测定土壤含水率, 之后用于土壤盐分的测定^[55]。经过几十年的发展, TDR 已经出现了多种类型, 现行 TDR 仪器主要有美国的 TRASE Systems、德国的 TRIME (图 8), 加拿大的 Moisture Point 和英国的 Theta Probe (图 9) 等^[56]。随着电子技术的发展, 也出现了许多不同形式的小型便携式 TDR 装置, 如 Camp bell Scientific 公司制 HydroSense, Delta-T Devices 公司生产的 Wet Sensor 等, 可同时测定土壤水分、盐分 (EC) 和温度。TDR 测定技术于 20 世纪 90 年代末期引入我国, 近 10 年正在被越来越广泛地应用。



图 8 TRIME-FM 便携式 TDR

Fig. 8 TRIME-FM portable TDR



图 9 Theta Probe 便携式 TDR

Fig. 9 Theta Probe portable TDR

TDR 通过分析电磁信号在土壤中的衰减来确定土壤盐分 (土壤表观电导率), TDR 信号在沿探头传

播时衰减幅度可以表示为^[55]:

$$V_R - V_T = V_T e^{2\alpha L} \quad (21)$$

式中, V_T 为从探头始端反射的信号振幅; V_R 为从探头末端的信号振幅; L 为探头长度 (m); α 为反应电磁波动的衰减系数, 其可以表示为:

$$\alpha = \frac{60\pi EC_a}{K^{0.5}} \quad (22)$$

式中, K 为土壤介电常数, EC_a 为土壤表观电导率 (S/m)。结合以上式 (19) 和 (20), 可求出土壤表观电导率为:

$$EC_a = \frac{K^{0.5}}{(120\pi L) \ln[V_T / (V_R - V_T)]} \quad (23)$$

土壤表观电导率也可以用 $G-T$ 法来确定^[57]:

$$EC_a = \left(\frac{K}{Z_u}\right) \left(\frac{1 - \rho_\infty}{1 + \rho_\infty}\right) \quad (24)$$

式中, K 为电缆的形状系数 (m^{-1}); Z_u 为电缆电阻 (Ω); ρ_∞ 是探头的反射波强度稳定处的反射系数。

TDR 在测定土壤盐分时一般需要三针型探头^[58], 近年来又出现了更精确的四针型探头被广泛应用于土壤水盐运移实验研究。与测定土壤水分不同的是, TDR 测定盐分时受到很多因素的影响而具有较大的不确定性。Vogeler 等^[59]研究表明, TDR 测量粉砂壤土时的测值与土壤溶液电导率 EC_w 吻合得很好, 但对于砂壤土, 两者相差较大。陈效民等^[60]研究表明, TDR 测定溶质的浓度存在着上下限; 温度也是主要的影响因素, 随着温度的升高, TDR 电阻值下降。曹巧红等^[61]研究发现在较低含水量情况下 (砂土 $< 0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 砂质壤土 $< 0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), 电导率的增加不易引起 TDR 测定值的明显偏差; 在较高含水率条件下, 当溶液电导率增加到 8 dS/m (砂质壤土) 和 11 dS/m (砂土) 时, TDR 测得的含水量值明显高于实际值。

由于受到多种因素的影响, TDR 测定盐分时需要进行严格的现场校正, 其测定精度与校正模型和校正方法密切相关^[62]。Mullin 等^[63]认为, $EC_w - EC_a - K_a$ (K_a 为土壤介电常数, 表征土壤体积含水率) 之间的校正是 TDR 用于测定土壤盐分的主要障碍。Risler 等^[64]研究表明 Rhoades 方程可以很好地估计土壤溶液电导率 EC_w , Muñoz-Carpena 等^[65]用 TDR 测定火山灰土土壤电导率时, 也发现 Rhoades (1976)^[25]给出的线性方程具有很好的校正结果并且需要最少的参数。席琳乔等^[66]以塔里木河上游地区盐碱土壤为对象, 进行了土壤盐分 (或电导率) 和土壤含水率的测定研究, 得出

了不同含水率下土壤盐分（或电导率）的半理论半经验校正公式。Magnus 等^[67]用人工神经网络（NN）模拟 $EC_w-EC_a-K_a$ 之间关系并获得了校正模型，通过灵敏度分析结果表明，相对于 K_a 而言，NN 模型对 EC_a 具有更高的灵敏度，另外，NN 模型可以通过土壤物理参数（砂粒、粉粒和黏粒含量，有机质含量和土壤体积质量）来预测 $EC_w-EC_a-K_a$ 之间的关系，而不需要繁杂的校正试验。

2.4 ER、EM 和 TDR 技术特点分析

ER、EM 和 TDR 均通过测定土壤表观电导率来确定土壤盐分，具有不扰动原土、响应快速、操作简单和数据获取能力强的优点。但由于土壤表观电导率的影响因素众多，影响机理复杂，表观电导率和土壤盐分之间的校正是 3 种方法应用的主要限制。除此之外，三者工作原理的不同使得其有各自的特点。

四电极（ER）是最早用于测定表观电导率的仪器，其主要优点是设备简单且形式多样，可根据测量目的不同选择不同形式的电极，如定位监测可采用探针式电极，大面积调查时选用犁刀式电极（Veris3100）等，而调节电极间距可以改变测量深度和范围，适用性强。其主要缺点是电极必须与土壤紧密接触，在需要测定剖面中不同深度土壤盐分时需将电极插入土体至预定位置^[68]，而在含水量低或者石块较多的土壤中测定结果可靠性较差^[69]。

电磁感应仪（EM）为非接触直读式，能在地表直接测量土壤表观电导率，特殊的工作原理使得电磁感应仪能实时、快速、高精度地对土壤盐渍化程度与剖面特征进行测定。另外，EM38 用联接 DL600 数据采集器电缆的方式，较常规方法的调查速度快 100 倍以上^[70]，在大范围上（田间尺度）获取土壤信息具有很大的优越性，是介于传统田间采样和遥感之间最有现实意义的数据获取手段。随着空间统计学理论的发展和完善，电磁感应技术与地质统计学和遥感的结合运用已经成为近年来农业水土资源研究的新趋势，很多学者做了深入的研究^[71-74]。但是电磁感应仪测量土体较大，不能用于需测定小范围土体土壤盐分的研究中（如水盐运移）。

时域反射仪（TDR）的主要优越性在于不破坏原状土壤结构，操作简便；可同时测定含水量和土壤电导率；灵敏度高，便于原位动态监测和数据自动采集；测定土壤含水率时影响因素少^[75]。但 TDR 进行土壤水分或盐分测定时，必须使探针和土壤保持良好的接触，而且结果是否精确可靠还受到探针长度的影响，特别在测定盐分时影响更大。一般来说探针较长时测定精

确度高，但测量土体大而不能用于需测定较小范围内土壤盐分的研究中，而探针太短会影响到测定精度，Ren 等^[76]给出了 TDR 探针最大和最小长度的计算方法。TDR 是一种较固定化的仪器（stationary instrument），不适用于土壤盐分的大面积调查。另外，TDR 测得结果为探头范围内的平均值，往往不能满足比较精确的土壤水盐运动试验研究要求^[77]。

3 结论和展望

传统的土壤盐分测定方法过程繁琐，费时费力，不能快速诊断和测定土壤盐渍化。原位测定土壤盐分方法在原理上可分为两类，分别为土壤溶液电导率法和土壤表观电导率法。土壤溶液电导率法直接测定土壤溶液电导率，不需校正，具有较高的精度，但土壤溶液采样器和盐分传感器对土壤水分状况要求较高且响应时间长，不适用于干燥环境和土壤盐分的短期或剧烈运移过程监测。土壤表观电导率法具有快速响应的优点，其中电阻法和电磁感应法能够实现田间尺度上土壤盐分数据的快速采集，时域反射法可同时测定土壤水分和盐分，具有很好的发展前景。但土壤表观电导率受到土壤含水量、土壤质地、土壤含盐量、土壤有机质和土壤温度等众多因素的影响，至今仍缺乏普适性强的 EC_a-EC_w 关系模型，所以从仪器测定结果中提取土壤盐分数据的过程也变得十分复杂，并且精度有限，这在一定程度上限制了土壤表观电导率法的应用。虽然不可避免的有些许缺陷，但土壤盐分原位测定技术具有广阔的发展前景，预计将在以下几个方面有较大的发展：研究土壤各相组成和环境因素对土壤表观电导率影响机理，建立普适性较强的 EC_a-EC_w 校正模型；发展相应的计算机校正软件，提高土壤盐分数据的获取能力；结合使用不同测量方法并发挥各自优势，发展自动水盐调控系统，并结合 3S 技术，研究不同尺度土壤水盐运移和空间变异规律，实现田间和区域尺度的土壤水盐的快速诊断和预报。

参考文献：

- [1] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils. *Land Degradation & Development*, 2000, 11: 501-521
- [2] 石玉林. 西北地区土地荒漠化与水土资源利用研究. 北京: 科学出版社, 2004
- [3] Rhoades JD. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. *Adv. Agron.*, 1993, 46: 201-251
- [4] Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ. Estimating soil salinity from saturated soil-paste electrical conductivity. *Soil Sci.*

- Soc. Am. J., 1989, 53: 428-433
- [5] Richards LA. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook, 1954, 60: 159
- [6] Sonmez S, Buyuktas D, Okturen F, Citak S. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. Geoderma, 2008, 144: 361-369
- [7] Zhang H, Schroder JL, Pittman JJ, Wang JJ, Payton, ME. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extract. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69: 1 146-1 151
- [8] Franzen D. Managing Saline Soils in North Dakota. Fargo: North Dakota State University, 2007. <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/soilfert/sf1087.pdf>
- [9] Rhoades JD. Monitoring soil salinity: A review of methods. Pro c. Annu. Am. Water Resour. Conf, 1978, 2: 150-165
- [10] 宋静, 骆永明, 赵其国. 土壤溶液采样技术进展. 土壤, 2000, 32(2): 102-106
- [11] 罗小三, 仓龙, 郝秀珍, 李连祯, 周东美. 原位土壤溶液采样及可溶性有机碳 (DOC) 的紫外吸收光谱直接测定探讨. 土壤, 2007, 39 (6): 943-947
- [12] Harris AR, Hansen EA. A new ceramic cup soil-water sampler. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1975, 39: 157-158
- [13] Chow TL. A porous cup soil-water sampler with volume control. Soil Sci., 1977, 124: 173-176
- [14] Moutonnet P, Pagand JF, Fardeau JC. Simultaneous field measurement of nitrate-nitrogen and matric pressure head. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 1458-1462
- [15] 吴龙华, 骆永明. 根际土壤溶液取样器——介绍一种新型原位土壤溶液采集装置. 土壤, 1999, 31(1): 54-57
- [16] Kemper WD. Estimation of osmotic stress in soil water from the electrical resistance of finely porous ceramic units. Soil Sci., 1959, 87: 345-349
- [17] 黄强, 田长彦, 赵正勇, 汪宏年, 张建军, 陈春英. 棉田膜内与膜间土壤溶液含盐量的变化. 灌溉排水, 2001, 20(3): 37-40
- [18] 田存旺, 赵守勤. TYC-2型盐分传感器标定及性能分析. 内蒙古水利, 1995(2): 22-25
- [19] 信秀丽, 徐富安, 徐梦熊, 王军. 计算机棉田信息采集与精量灌溉控制系统. 灌溉排水学报, 2005, 24(1): 77-81
- [20] Wood JD. Calibration stability and response time for salinity sensors. Soil Sci. Soc. Am. J., 1978, 42: 248-250
- [21] Wesseling J, Oster JD. Response of salinity sensors to rapidly changing salinity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1973, 37: 553-557
- [22] 尤文瑞, 肖振华, 孟繁华, 孙传璐. 土壤盐分传感器的研制. 土壤, 1982, 14(3): 105-112
- [23] Archie GE. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 1942, 146: 54-62
- [24] Friedman SP. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 45-70
- [25] Rhoades JD, Raats PAC, Prather RJ. Effects of liquid-phase, electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40: 651-655
- [26] Bohn HL, Benasher J, Tabbra HS, Marwan M. Theories and Tests of electrical conductivity in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 40: 1 143 -1 146
- [27] Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53: 433-439
- [28] Gupta SC, Hanks RJ. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1972, 36: 855-857
- [29] 毛久庚, 李成保. 土壤直流电导率与含水量和容重的关系. 土壤, 1990, 22(5): 241-244
- [30] 李成保. 土壤-天然水电导的现场检测及其影响因素. 化学传感器, 1997, 17(1): 34-42
- [31] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究. 土壤通报, 2001, 32(专辑): 85-87
- [32] Shainberg I, Rhoades JD, Prather RJ. Effect of ESP, cation exchange capacity, and soil solution concentration on soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 469-473
- [33] Sheets KR, Hendrickx JMH. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resour. Res., 1995, 31: 2 401-2 409
- [34] Rhoades JD, Chanduvi F, Lesch S. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 57. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999
- [35] Burger HR, Burger DC. Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface. Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall PTR, 1992
- [36] Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE. Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1976: 633-640
- [37] Halvorson AD, Rhoades JD. Assessing soil salinity and identifying potential saline-seep with field resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. J., 1974, 38: 576-581
- [38] 石元春, 李韵珠, 陆锦文. 盐渍土的水盐运动. 北京: 北京农业大学出版社, 1986, 265
- [39] Rhoades JD, Ingavalsen RD. Determining salinity in field soils with soil resistance measurement. Soil Sci. Soc. Am. J., 1971, 35:

54-60

- [40] McCutcheon MC, Farahani HJ, Stednick JD, Buchleiter GW, Green TR. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(1): 19-32
- [41] Ezrin MH, Amin MSM, Anuar AR, Aimrun W. Relationship between rice yield and apparent electrical conductivity of paddy soils. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7(1): 63-70
- [42] Sudduth KA, Kitchena NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce FJ, Schulerand RT, Thelen KD. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 263-283
- [43] Hendrickx JMH, Kachanoski RG. Solute content and concentration-indirect measurement of solute concentration-nonintrusive electromagnetic induction // Dane JH, Topp GC. *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2002: 1 297-1 306
- [44] Glenn DJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST. Using electromagnetic induction to characterize soils. *Better Crops with Plant Food*, 1997, 4: 108-113
- [45] McNeil JD. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Mississauga, Ontario, Geonics Pty Ltd, Technical note TN-6, 1980, 15P
- [46] Rhoades JD, and Corwin DL. Determining soil electrical conductivity-Depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, 45: 255-260
- [47] Corwin DL, Rhoades JD. An improved technique for determining soil electrical conductivity-depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 517-520
- [48] Corwin DL, Rhoades JD. Measurements of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48: 288-291
- [49] Wollenhaupt NC, Richardson JL, Foss JE, Doll EC. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci.*, 1986, 66: 315-321
- [50] Slavich PG. Determining ECa-depth profile from electromagnetic induction measurements. *Aust. J. Soil. Res.*, 1990, 28: 443-452
- [51] Cook PG, Walker GR. Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 015-1 022
- [52] 杨劲松, 姚荣江. 基于电磁感应仪的表聚型土壤盐渍剖面特征解译研究. *水文地质工程地质*, 2007(5): 67-82
- [53] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 姚荣江. 基于电磁感应仪的河口地区底聚型盐分剖面特征的解释. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 109-113
- [54] 赵军伟, 蒋平安, 盛建东, 李荣. EM38电磁发生仪测定结果的影响因素分析. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 362-366
- [55] Dalton FN, Herkelrath WN, Rawlins DS, Rhoades JD. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 1984, 224: 898-990
- [56] Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31: 213-237
- [57] Topp GC, Yanuka M, Zebchuk WD, Zegelin S. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.*, 1988, 24: 945-952
- [58] Spaans EJA, Baker JM. Simple baluns in parallel probes for time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 668-673
- [59] Vogeler I, Clothier BE, Green SR. TDR estimation of the resident concentration of electrolyte in the soil solution. *Aust. J. Soil Res.*, 1997, 35: 515-526
- [60] 陈效民, 潘根兴, Vanclooster M. 用时域反射仪测定土壤溶质运移过程中的影响因素. *南京农业大学学报*, 2000, 23(2): 57-60
- [61] 曹巧红, 龚元石. 土壤电导率对时域反射仪测定土壤水分的影响. *土壤学报*, 2001, 38(4): 483-490
- [62] Mallants D, Vanclooster M, Toride N, Vanderborght J, van Genuchten MTh, Feyenet J. Comparison of Three Methods to Calibrate TDR for Monitoring Solute Movement in Undisturbed. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60(3): 747-754
- [63] Mullin MC, Wraith JM, Das BS. Comparison of Calibration Models and Methods for Solution EC Using TDR. *Madison, WI: ASA*, 1999: 181
- [64] Risler PD, Wraith, JM, Gaber HM. Solute transport under transient flow conditions estimated using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1 297-1 305
- [65] Muñoz-Carpena R, Regalado CM, Ritter A, Alvarez-Benedi J, Socorro AR. TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 399-413
- [66] 席琳乔, 余建勇, 张利莉. TDR技术测定盐碱地土壤盐分和水

- 分及标定研究. 塔里木大学学报, 2007, 19(3): 6-10
- [67] Magnus P, Cintia BU. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. *Journal of Hydrology*, 2003, 273: 249-256
- [68] Rhoades, JD, van Schilfgaarde J. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, 40: 647-651
- [69] Corwin DL, Lesch SM. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 11-43
- [70] 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 聂杰. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用. *土壤*, 2003, (3): 27-29
- [71] Triantafilis J, Odeh IOA, McBratney AB. Five Geostatistical Models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 869-878
- [72] 吴亚坤, 杨劲松, 刘广明. 基于遥感与电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 148-152
- [73] Corwin DL, Lesch SM. Characterizing soil salinity variability with apparent soil electrical conductivity part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 135-152
- [74] Yao RJ, Yang JS. Quantitative evaluation of soil salinity and its spatial distribution using electromagnetic induction method. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1961-1970.
- [75] Wraith JM. Solute content and concentration-indirect measurement of solute concentration – time domain reflectometry // Dane JH. Topp GC. *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2002: 1 289-1 297
- [76] Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 450-457
- [77] 杨胜利, 刘洪禄, 吴文勇, 郝仲勇. 时域反射仪 (TDR) 的应用现状与发展趋势. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(6): 52-56

In-situ Determination Methods for Soil Salinity

LIU Mei-xian YANG Jin-song

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil salinization is one of the limiting factors of agricultural productivity in arid and semi-arid regions. It is essential to determine soil salinity in a reliable but easy method. Soil salinity has been customarily defined and assessed in terms of laboratory measurements of the electrical conductivity of the extracts under different soil to water ratios, which has to destroy the soil samples and is labour and time consuming. Precision agriculture requires low-cost, rapid, and reliable methods for determining soil salinity in the field. There are several approaches to determine soil salinity in situ which can be roughly classified into soil solution electrical conductivity measurement and soil apparent electrical conductivity measurement. In nowadays, soil solution electrical conductivity could be determined by measuring electrical conductivity of soil solution sampled in situ with soil solution sampler or by soil salinity sensors; soil apparent electrical conductivity could be determined by four-electrode method, electromagnetic induction and time domain reflectometry. In this paper, the basic principle, the advantages and disadvantages of different approaches or instruments and the development prospects of in situ determination of soil salinity were discussed for a reference in selection of soil salt determination method in soil salinization study.

Key words: Soil salinity, In situ determination, Four-electrode method, Electromagnetic induction measurements (EM38), Time domain reflectometry (TDR)