

土壤电导率的快速测量(EM38)与数据的研究应用

李淑敏, 李红*, 周连第 (北京市农林科学院农业综合发展研究所, 北京 100097)

摘要 土壤是构成生态系统的一个基本要素之一, 是人类赖以生存的物质基础。对土壤环境监测分析至关重要, 在土壤分析中含盐量是一个重要的综合指标。而土壤电导率是以数字形式表示土壤溶液的导电能力, 反映了土壤的水盐状况。利用大地电导率仪在野外原位测定土壤电磁感应电导率, 是一种快速简便测定土壤含盐量的新方法。介绍了 EM38 大地电导仪的原理及使用, 并根据国内外研究进展, 对 EM38 大地电导仪测得土壤电导率数据的研究应用进行了概括, 并对其在未来研究中的应用进行了展望。

关键词 电磁感应; EM38; 土壤电导率; 土壤含盐量

中图分类号 S151.9 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)29-14001-04

Study on the Rapid Measurement of Soil Conductivity (EM38) and Data Application

LI Shu-min et al (Institute of Agricultural Integrated Development, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097)

Abstract Soil is a basis element of ecosystem, and the material basis of human life. Soil environmental monitoring is essential and soil salinity is an important comprehensive indicator in soil analysis. Soil conductivity represents the conductive capability of soil solution in digital form, reflecting the state of water and salt in the soil. It's a quick and easy method in measurement of soil salinity that making use of handheld Geonics EM38 electromagnetic soil conductivity meter in situ measurement of soil conductivity. The principle and usage of EM38 electromagnetic soil conductivity meter was introduced. Based on the study progress at home and abroad, the researches and applications of apparent soil electrical conductivity measurements were generalized. And its use in the future study was predicted.

Key words Electromagnetic induction; EM38; Soil conductivity; Soil salinity

土壤是构成生态系统的一个基本要素之一, 是人类赖以生存的物质基础。土壤污染问题直接关系到农产品质量、人类健康和生态安全。因此, 对土壤环境监测分析至关重要, 在土壤分析中含盐量是一个重要的综合指标^[1]。土壤中常含有不同成分的可溶性盐, 盐浓度与作物种子的萌发和幼苗能否正常生长发育密切相关。在我国, 土壤盐渍化问题广泛存在, 土壤中某些盐分的含量超过了作物生长所能承受的能力, 导致大量农作物死亡, 大量土地资源被迫荒废, 严重影响我国农业的发展。农田的盐渍化是农业生产发展的制约因素, 因此, 测定土壤可溶性盐分含量, 掌握大面积农田盐渍化程度以及动态跟踪观测盐渍化发展过程, 是制定改良盐渍化土壤措施的依据^[2-3]。

用传统采样分析法确定土壤盐分含量及盐分的剖面分布状况费时费力, 且所采样品的体积及采样个数常达不到足以反映区域空间变异所需要的样本数量。EM38 电磁感应电导仪(又叫大地电导仪)能在地表直接测量土壤表观电导率, 方便、快速, 为解决上述问题提供了有效手段。EM38 大地电导仪已广泛运用于农田土壤盐分普查及土壤质地情况调查。通过田间定位、定点测量, 对区域土壤盐渍化动态与分布做出预测^[3]。笔者阐述了土壤含盐量与土壤电导率二者的关系, 介绍了 EM38 大地电导仪的结构、原理及使用, 并整理了目前国内外已有的研究, 对 EM38 大地电导仪测量土壤电导率的影响因素和表观电导率的研究应用进行了总结概括, 并对 EM38 大地电导仪的应用进行了展望。

1 土壤含盐量与土壤电导率

土壤含盐量(soil salt content)是指土壤中所含盐分(主要是氯盐、硫酸盐、碳酸盐)的质量占干土质量的百分数。按

溶于水的难易程度可分为易溶盐(如氯化钠、芒硝等)、中溶盐(如石膏)、难溶盐(如碳酸钙等)。土壤中盐分, 特别是易溶盐的含量及类型对土壤的物理、水理、力学性质影响较大。

土壤含盐量的测定方法主要有 2 种: 一是根据一定土水比土壤浸提液的分析结果进行推算, 1:5 土水比在国内较为常用; 二是根据已有电导率的关系进行换算。前一种方法因为试验所用土水比与田间土壤实际土水比不可避免存在差异, 并且各种土水比情况下所获盐分含量的可比性较差, 故该方法有其局限性。第 2 种方法则因为电导率与土壤含盐量的关系多是在特定土壤水分状况下获得的, 所以仍有局限性。因此, 如何较为精确地测定土壤含盐量仍然是一个值得进一步商榷的问题^[4]。

土壤电导率(soil conductivity)指土壤溶液传导电流的能力, 是以数字形式来表示土壤溶液的导电能力, 它同时也是间接推测土壤溶液中离子成分总浓度的指标。土壤溶液中各种溶解盐类是以离子状态存在的, 它们都具有导电能力。溶解的盐类越多, 离子也越多, 溶液的导电能力就越大, 所以就能够根据溶液导电能力的大小, 间接地测量土壤溶液中的溶解固体量^[5]。在未受污染的土壤溶液中, 离子总量(全盐量)通常指 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 及 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^{-} 等离子的总和, 土壤溶液具有相当强的导电能力, 这种导电能力即产生于溶液中各种无机离子的存在。离子质量分数大, 土壤溶液的导电能力就强, 因此土壤电导率就大^[6]。

电导率仪因为具有简便快速的优点, 常用于蒸馏水、饮用水、矿泉水、锅炉用水、海水淡化以及工业流程中其他水质的纯度测定; 同样, 也可以将其应用于土壤溶液中离子的测定^[7]。土壤电导率通常作为一个重要指标被应用, 它可以直接反映出混合盐的含量, 故常被用作土壤盐分测定方法之一^[1], 尤其近年来, 国内外许多学者建议直接用电导率表示土壤含盐量^[8]。

2 土壤电导率的测量

2.1 传统测量方法与电磁感应测量方法 土壤电导率传

基金项目 国家科技攻关项目(2004BA6178B-4); 财政专项“北京郊区自然与社会经济信息管理平台”。

作者简介 李淑敏(1983-), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤环境质量监测。* 通讯作者。

收稿日期 2009-04-03

统的实验室测定方法即田间取回目标深度的土壤样品,室内用电导法测定其水浸液的电导率(EC)。测量原理是:土壤可溶性盐按一定水土比例用平衡法浸出,这些可溶性盐是强电解质,其水溶性具有导电作用,导电能力的强弱可用电导率表示。在一定浓度范围内,可溶性盐的含量与电导率呈正相关,含盐量越高,溶液的渗透压越大,电导率也越大。土壤浸出液电导率值可用电导率仪测定,并直接用电导率值表示土壤含盐量的高低^[1]。张祯等进行了土壤电导率传统测量过程影响因素的研究,他提出离子水浓度、土壤溶液的土水比例、溶液平衡时间、溶液离子水温度、样品固液分离等因素影响着土壤电导率的测定,对于具体实验,需要逐一进行条件实验,以得到土壤电导率测定方法的最佳实验条件,减少误差,提高测试的准确性^[1]。

由此,传统实验室测定土壤电导率的方法虽然精确,但过程繁琐,给工程实践带来不便。目前国内外应用于农业的土壤电导率快速测量传感器大体可以归为2种:接触式和非接触式。接触式土壤电导率传感器是一种电极式传感器,一般采用“电流-电压四端法”,即将恒流电源、电压表、电极和土壤构成回路;非接触式则利用了电磁感应原理^[9]。

随着提议用电导率直接表示土壤含盐量的出现,以及盐分传感器和四电极法的应用,人们愈来愈多地在野外原位测定土壤含盐量,以便能更真实地反映田间土壤的盐渍状况^[8]。土壤及水电导率的原位测定,曾广泛使用二极法,这种方法的优点是可以避免电极极化,得到稳定而可靠的结果。但在直流条件下,由于不可避免会发生电极极化问题,使通过的电流随着加压时间而变化,不能取得稳定结果,四电极法就是为了克服这个困难而发展起来的一种方法^[10-11]。张粹雯曾提出一种改进型土壤电导率原位测定的直流四极法,并用它来测定土壤溶液,天然水及土壤的电导率,并取得了初步结果^[11]。王琦等设计了一种便携式土壤电导率测量系统,开发了基于电流-电压四端法的便携式土壤电导率(EC)在线测试仪,以满足我国广大农业科技工作者的需求^[9]。

上述2种土壤电导率快速测量方法中,接触式电极方法需要挖坑或打孔将电极或盐分传感器探头埋入不同深度的土层中,而且要求仪器表面与土壤接触良好,否则会引起较大误差。而非接触式的电磁感应电导仪测定土壤电导率(EM)不需要挖坑或打孔,整个测量过程全部在地面上进行,避免了仪器与土壤内部的直接接触,1~2人即可操作,方法简便,测量速度快,结果重复性好,准确可靠。电磁感应法最早被用于地球物理探矿,近年来在美国、加拿大等国家将其应用于土壤含盐量的田间测定^[8]。

由加拿大乔尼克斯(Geonics)公司制造生产的大地电导率探测仪EM38为农业上勘查土壤盐分含量的一种仪器,可通过非接触式的方式快速勘查和测量大面积土壤中的含盐量。它不仅被广泛运用于农田土壤盐分的普查,还被用于土石坝渗漏通道检测、公路地基构造和地质构造勘测、大地测绘、考古等多个方面,有着十分广泛的应用^[12-13]。

2.2 EM38 大地电导仪的结构与原理 大地电导仪EM38能在地表直接测量土壤表观电导率,为非接触直读式,适用

于大面积土地盐渍化的测量,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,能轻松快速地完成一般常规测量^[12,14]。

大地电导仪EM38总长度1m,主要由信号发射(T_s)和信号接收(R_s)2个端口组成(图1),两者之间相隔一定的距离(S),发射频率为14.6kHz。测量的有效深度可达1.5m^[12]。工作时,首先信号发射端子产生磁场强度随大地深度的增加而逐渐减弱的原生磁场(H_p),原生磁场的强度随时间动态变化,因此该磁场使得大地中出现了非常微弱的交流感应电流,这种电流又诱导出出现次生磁场(H_s)。信号接受端子既接受原生磁场信息又接受次生磁场信息。通常,原生磁场 H_p 和次生磁场 H_s 均是两端子间距(S)、交流电频率及大地电导率的复杂函数,且次生磁场与原生磁场强度的比值与大地电导率呈线性关系,可表示为:

$$EC_a = 4(H_s/H_p) / \omega \mu_0 S^2 \quad (1)$$

式中, EC_a 为大地电导率(mS/m); H_s 为信号接受端子处次生磁场强度; H_p 为信号接受端子处原生磁场强度; μ_0 为空间磁场传导系数; $\omega = 2\pi f$ 为 ω 角位频率, f 为交流电频率; S 为信号发射端子与接受端子之间的距离(m)。

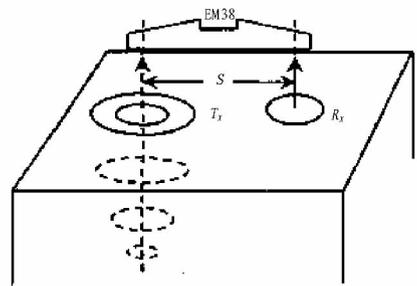


图1 电磁感应技术原理示意

Fig. 1 The principle of electromagnetic induction technology

3 国内外研究进展

3.1 土壤电导率影响因素研究 近年来土壤学的研究结果表明,土壤电导率这一参数本身包含了反映土壤品质和物理性质的丰富信息。土壤中盐分、水分及有机质含量,质地结构和孔隙率等都不同程度地影响着土壤电导率的取值,而且各个因素对土壤电导率的影响程度是不同的^[9]。下面介绍土壤水盐含量、土壤温度、土壤质地、土壤有机质几个主要影响因素与土壤电导率之间的关系。

3.1.1 土壤水盐含量。在影响土壤电导率改变的诸多因素中,Rhoades J D等认为土壤盐分和含水率对电导率的影响明显大于其他各因素^[15]。对于农业土壤中最为常见的壤土,当土壤含水率在15%~30%间变化时,土壤电导率的变化最为显著且近似呈线性关系;当土壤含水率超过30%以后,其影响明显减小,这是因为土壤含水率已接近饱和限度的缘故^[16]。

刘广明等在其研究中利用不同含盐量土壤,建立了土壤含盐量和水分含量与土壤电导率的关系。研究表明土壤电导率都随土壤水分的增加而呈线性降低,并且土壤含盐量越小,土壤电导率随水分含量的变化速率越大^[4]。赵军伟等将EM38读数与常规土壤含盐量测定方法所获得的结果进行比较,发现在土壤类型、土壤含盐量、土壤温度条件大致相同的

情况下,土壤湿度越大其读数越高,当土壤含水量为 9.0% ~ 12.0% 时 EM38 测值读数和室内分析结果相关性较好。同时,EM38 读数和土壤盐分在没有其他因素影响的情况下二者呈正相关关系,但如果在土壤质地、土壤温度、土壤湿度等因素影响下,EM38 读数与土壤盐分二者之间的相关性较差,产生非线性现象^[3]。

对于影响土壤电导率的 2 个最主要因素:土壤水分及盐分含量,孙宇瑞采用了基于电流-电压四端法的“polar-dipole array”形式,专门讨论了土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响,结果表明,在这两个主要因素中,土壤盐分对土壤电导率的影响较土壤含水量要大得多,因此,在忽略土壤含水率影响因素的前提下通过测量土壤电导率来估计土壤盐分的做法是有明确指导意义的^[16]。

3.1.2 土壤温度。土壤温度是土壤的冷热程度,其热源来自太阳辐射。随昼夜、季节而变化,前者仅影响表土 20 cm 左右,后者影响至几米深土层。坡向、植被、积雪覆盖,以及土壤颜色、表面粗糙程度、土壤水分含量等都会影响土壤温度。在以往涉及土壤温度的研究中,研究者们发现 EM38 读数或多或少会受到土壤温度的影响。

赵军伟等研究了 EM38 读数随温度变化的规律,结果表明在 22.0 ~ 27.0 °C 范围内 EM38 读数与温度变化呈正相关,但对 EM38 读数值影响不大^[3]。而宋长春等提出不同温度条件下,土壤溶液中离子浓度会发生一定变化,因此要获得任一温度条件下的土壤溶液的电导率,需要对电导率数据通过给定公式进行转换^[17]。Domsh H 等也指出在使用 EM38 获取电导率数据时,不同土层深度的温度变化幅度相当大,为了抵消土壤温度对测量值的影响,他们将所有电导率值通过一个公式转换为统一温度 25 °C 下的电导率值^[18]。

3.1.3 土壤质地。土壤中砂粒、粉粒和粘粒三组粒级含量的比例不同构成了不同类型的土壤质地,它对土壤结构、孔隙状况、保肥性、保水性等均有重要影响。根据土壤中砂粒、粉粒和粘粒三级含量,划分为三大质地类型,即沙土类、壤土类和粘土类。

土壤质地是影响土壤一系列物理与化学性质的重要因子。粘质土壤中含有大量粘粒,当其与有机物结合生成复合物后,增加了有机质的积累;而土壤微量元素与土壤质地的内在联系在于粘粒含量的不等,微量元素的含量随粘粒含量的增加而增加;同时,土壤质地粘重,粘粒含量高,总表面积大,吸收阳离子多。

刘庆生等在其研究中指出土壤类型、土壤质地和土地类型以不同的方式影响着土壤水盐运移,因此它们对土壤盐渍化水平有一定的指示作用。他们分析了 73 个同一位置土壤的土壤类型、土壤质地、土地类型数据以及土壤盐渍化水平数据,利用信息量计算法评价了 3 种因素对于土壤盐渍化水平的指示作用^[19]。赵军伟等从大量测定数据分析中得出,在土壤温度、含水量相对一致的前提下,质地越轻,EM38 读数越小。砂壤土盐分含量测定结果 EM38 读数低于室内分析,中壤土测试值 EM38 读数和室内盐分测定结果相关性非常好,而在质地较粘重的土壤上测试 EM38 读数明显高于室内盐分测试结果^[3]。

3.1.4 土壤有机质。土壤有机质是土壤中以各种形态存在的含碳有机化合物,它不仅是土壤各种养分特别是氮、磷的重要来源,并对土壤理化性质如结构性、保肥性和缓冲性等有着积极的影响。

由于组成有机质的重要物质腐殖质具有带电性,因此,它在土壤中含量的多少可引起 EM38 磁场的变化。根据初步试验,在土壤质地、含水量、含盐量相对一致的前提下,土壤有机质含量高,EM38 测定值也相对较高^[3]。

3.2 EM38 大地电导仪测得土壤电导率数据的应用研究 国内外开展使用电磁感应仪进行测量获得土壤电导率数据的研究应用还不多。笔者从 EM38 大地电导仪的使用,土壤表观电导率与土壤含盐量的相关性分析,土壤表观电导率与不同土层含盐量分布和土壤表观电导率与土壤盐分空间变异性分析几个方面概括了目前国内外对 EM38 土壤表观电导率数据的研究应用。

3.2.1 仪器使用。因为仪器的使用受到土壤物理特性以及外界测量环境的影响,所以在使用 EM38 仪器测量前首先要对仪器相位和仪器调零,由于 EM38 的敏感度较高,每次测量时,仪器要在待测区域进行调零和做律定(开始测量前以及在测量的过程中对 1.5 m 以上高度竖立读数不是横卧读数的 2 倍就要重新对仪器律定)。同时,在任何情况下都应尽可能除去避免金属物体和电力线之类的物体^[3,20]。

刘广明等系统介绍了电磁感应土地测量技术。对其工作原理、基本架构、可能的农业领域应用以及该技术的特点进行了较为详尽的阐述^[4]。宋长春等在分析了盐渍化土壤导电性决定因子的基础上,提出了针对不同土壤物理特性对电磁感应仪进行校正的理论依据^[17]。这些对于提高我国农业领域的高新技术含量,促进我国农业的快速发展有着较为深远的意义。

在使用仪器进行电导率测量时,EM38 大地电导仪的感应灵敏度随距离地面高度的不同而变化。陈玉娟分析了 EM38 大地电导仪的感应灵敏度随距地高度的变化,并对表观电导率与土壤含盐量的相关性进行了探讨^[2]。赵军伟等也提到了距离地面的高度对仪器电磁产生的影响及相关性^[3]。

在电磁感应仪使用效率方面,亦有人作了相关研究。Lesch 等利用电磁感应仪对土壤盐分进行标定、预测和制图,发现在保证制图精度前提下,应用电磁感应仪较传统采样方法能有效降低采样数量,提高采样效率^[21]。

3.2.2 土壤表观电导率与土壤含盐量相关性分析。尽管目前人们越来越倾向于用土壤表观电导率来代表土壤水盐含量,但对于具体区域具体情况下二者相关性是否可以接受,近年来不乏此类研究。人们通常使用的方法即野外取样与仪器测量电导率同步进行,取得的土壤样品带回室内用常规方法进行实验获得土壤盐分数据,对表观电导率与土壤盐分数据进行统计分析,观察其相关关系是否显著等。

赵军伟等通过运用 EM38 电磁感应仪测量法调查了新疆阿瓦提县丰收灌区土壤含盐量,并将 EM38 测定读数与常规测定方法所获得的结果进行比较分析^[3]。李海涛等利用电磁感应仪 EM38 对新疆焉耆盆地土壤表观电导率进行测

量,分析了电磁感应方法测得的结果与室内分析结果之间的相关关系,并对焉耆盆地土壤盐渍化状况进行了定性评价^[12]。

3.2.3 土壤表观电导率与不同土层含盐量分布。由电磁感应仪获得的土壤表观电导率反映的是土壤某一深度范围内总的含盐量情况,而土壤剖面不同土层土壤含盐量显然是不相同的,不同深度土壤含盐量与表观电导率之间理论上应该存在一定的函数关系。

姚荣江等以黄河下游三角洲典型区域为研究对象,结合电磁感应仪 EM38 的田间测量和田间采样,研究了土壤电导率的剖面分布特征,建立了电磁感应仪测量值和土壤电导率间的回归模型,并运用电磁感应仪 EM38 对该地区土壤盐渍剖面类型的划分进行了探讨^[14]。陈玉娟选择典型土壤剖面进行分层采集土样,分析有关性质数据,建立土壤电导率与各深度范围内土壤盐渍化程度之间的关系。如此,即可快速地对大面积土壤盐渍化的空间分布状况进行测定^[2]。张为政等则采用了一种不同的方法,将 EM38 水平放置在地表以上不同高度,测定土壤表观电导率,同时采集不同深度土壤样品,进行室内实验。他们提出,当土壤剖面中各土层土壤含盐量分布不均时,EM38 电导率读数不仅是深度的函数,而且与各土层含盐量多少有关,并建立了 EM38 在地面不同高度的 EMh 读数与剖面中不同深度土层 EC 的回归方程,发现回归方程对土壤剖面盐分含量能够作出比较准确的估测^[8]。

3.2.4 土壤表观电导率与土壤盐分空间变异性研究。除上述 3 个目前研究较多的方面,国内外一些研究者从其他方面入手,将 EM38 与空间技术相结合并将其扩展至区域尺度,成为研究土壤其他重要性质的有利工具。土壤属性的空间变异性是土壤科学研究的一项重要内容,通过研究土壤电导率的空间变异性,从而了解土壤盐分的空间分布规律,为作物种植、施肥灌溉等精确农业措施的实施提供数据基础与科学依据^[22-23]。

Triantafyllis 等运用电磁感应仪进行了田间尺度土壤盐分的优化地统计学模型的研究,在基于估计精度和偏差分析的基础上对多种地统计学模型进行了比较^[24]。Barbiéro 等利用电磁感应仪对田间尺度下塞内加尔峡谷中部的土壤盐渍化进行了研究,同时发现结合航片能更有效地制定当地的灌溉措施。Corwin 等结合电磁感应仪的田间调查进行了合理采样策略以及土壤质量评价的研究,同时还分析了不同深度土壤理化性质的空间变异性^[25]。杨劲松等以黄河三角洲地区典型地块为研究对象,将野外采样与电磁感应仪 EM38 田间测量相结合,综合运用 GIS 和非参数地质统计学,对土体盐分含量的空间变异特征进行了分析和评价,这是该方法在田间尺度农田的土壤质量评价中应用得很好的一个例子^[22]。白慧东等在其研究中借助于常规统计与地统计相结合的方法,对比分析了纵跨慈溪滨海平原的不同围垦区的电导率数值,分析其空间结构,并进行空间预测^[23]。王建红等运用地统计方法对海涂土壤电导率的空间变异性进行了深入的分析和研究,从而为海涂土壤的改良利用提供科学依据^[26]。李子忠等应用传统统计学和地统计学方法,分析了田间尺度土壤含水量和电导率的空间变异性,并在此基础上

应用普通克立格技术估算了未知点的土壤含水量和电导率,并确定 2 种土壤特性的合理采样数据,采样效率比传统统计学方法提高 6~8 倍^[27]。杨劲松等运用磁感大地电导率仪 EM38,结合 GIS 与地统计学研究了不同样点密度下土壤表观电导率的空间变异特征,确定了最佳的空间插值模式,并采用偏差指数对各分布图层的空间相似性进行了评价^[28]。

4 应用展望

4.1 特点 首先,测量快速。使用 EM38 大地电导仪获取土壤表观电导率,对土壤盐分含量及分布进行调查,较传统方法测量速度快。其次,获得原位信息。应用 EM38 大地电导仪可以在野外土壤取样时实时地收集土壤电导率信息,用以反映土壤盐分含量。第三,节约资源。进行野外测量时,最多需要 2 人即可,与传统土壤质量调查方法相比,节省了大量的人力、物力。第四,可与遥感影像相结合,进行大尺度区域范围土壤盐分含量的预测,进行空间上的分析。

4.2 应用前景 应用 EM38 可对土壤质地、含盐量、盐分分布情况等进行动态监测,对土地管理进行系统监测、定期评估,提出合理的土地利用规划建议,为基于信息和知识的现代精细农业的普及推广打下基础;根据土壤电导率与土壤质地类型、土壤孔隙度、地下水埋深、矿化度等的相关性,用 EM38 测定值可对农田的土地规划与平整、大型水利工程的修筑及防护林体系建设提供相关科学数据;有实验表明 EM38 测量值与土壤含盐量、地下水埋深和矿化度之间存在一定的函数关系,可利用这些函数关系指导节水灌溉等。

总之,目前应用 EM38 大地电导仪测定土壤含盐量,不仅要深入研究影响 EM38 测定结果的环境因素,而且要结合实验室分析方法,建立 EM38 读数和土壤盐分常规法分析结果及作物产量之间的关系。只有这样才能建立起一套完整的,具有实际应用价值的技术和方法^[13,29]。

参考文献

- [1] 张祯,荀久玉,孔锦. 土壤电导率的测定中影响因素研究[J]. 科技信息(学术研究),2007(28):276-277.
- [2] 陈玉娟. EM38 大地电导仪的应用研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2):146-148.
- [3] 赵军伟,蒋平安,盛建东,等. EM38 电磁发生仪测定结果的影响因素分析[J]. 干旱区地理,2005,28(3):362-366.
- [4] 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[J]. 土壤通报,2001,32(S1):85-87.
- [5] 胡诞康. 溶液电导率测量的新进展[J]. 机电一体化,1995(2):42.
- [6] 郭彩华. 土壤溶液常规分析中离子含量和电导率之间的关系[J]. 科技情报开发与经济,2006,16(14):153-154.
- [7] 中国土壤学会土壤分析专业委员会. 土壤化学分析[M]. 北京:科学出版社,1965:1-3.
- [8] 张为政,殷立娟. 电磁感应电导仪(EM38)测定土壤含盐量的研究[J]. 应用生态学报,1993,4(3):289-294.
- [9] 王琦,李民赞,汪慧华. 便携式土壤电导率测试系统的开发[J]. 中国农业大学学报,2003,8(4):20-23.
- [10] 史永臣,隋吉东,贺传琴. 土壤电导率的快速测定[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2000,12(4):15-18.
- [11] 张粹雯. 土壤电导率原位测定的直流四极法[J]. 化学传感器,1997,17(1):59-65.
- [12] 李海涛,李小明,PHILIP B. 电磁感应方法在土壤盐渍化评价中的应用研究[J]. 水文地质工程地质,2006(1):95-98.
- [13] 张守本. 国外电磁方法系列发展概况[J]. 国外铀金地质,1997,14(2):166-172.
- [14] 姚荣江,杨劲松,刘广明. EM38 在黄河三角洲地区土壤盐渍化快速检测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(1):67-73.

- 1177.
- [51] PLENDERLEITH R W. An Evaluation of the tolerance of a range of tropical grasses to excessive soil levels of copper and ainc [M]. University of Queensland; Master of Agricultural Science Thesis, 1984.
- [52] BOAWN L C, RASMUSSEN P E. Crop response to excessive zinc fertilization of alkaline soil [J]. *Agronomy Journal*, 1971, 63: 874 - 876.
- [53] 徐卫红, 王宏信, 王正银, 等. 重金属富集植物黑麦草对镉、镉复合污染的响应 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 365 - 368.
- [54] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 等. 铅、镉及其交互作用对鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响 [J]. *生态学报*, 2007, 7(12): 5442 - 5446.
- [55] 周启星, 高拯民. 土壤 - 水稻系统 Cd - Zn 的复合污染及其衡量指标的研究 [J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 430 - 436.
- [56] TEIGE M, HUCHZERMAYER B, SCHULTZ G. Inhibition of chloroplast ATPsynthase/ATPase is a primary effect of heavy metal toxicity in spinach plants [J]. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1990, 186: 165 - 168.
- [57] 邱昌恩, 毕永红, 胡征宇. Zn²⁺ 胁迫对绿球藻生长、生理特性及细胞结构的影响 [J]. *水生生物学报*, 2007, 31(4): 503 - 508.
- [58] VAN A F V, CLIJSTERS H. Effects of metals on enzyme activity in plants [J]. *Plant Cell Environment*, 1990, 13: 195 - 206.
- [59] 蒋明义, 杨文英, 徐江, 等. 渗透胁迫下水稻幼苗中叶绿素降解的活性氧损伤作用 [J]. *植物学报*, 1994, 36(4): 289 - 295.
- [60] 马成仓, 洪法水. 汞对小麦种子萌发和幼苗生长作用的机制初探 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 373 - 378.
- [61] KUPPER H, KUPPER F, SPILLER M. In situ detection of heavy metal substitution chlorophylls in water plants [J]. *Photosynthesis Research*, 1998, 58(2): 123 - 133.
- [62] ROSEN J A, PIKE C S, GOLDEN M L. Zinc, iron, and chlorophyll metabolism in Zinc-toxic corn [J]. *Plant Physiology*, 1977, 59: 1085 - 1087.
- [63] LARRY R H, WATER E S. Uptake and translocation of Zinc by intact plants [J]. *Plant and Soil*, 1967, 27(2): 249 - 260.
- [64] AMBER J E, BROWN J C, GAUCH H G. Effect of Zn on translocation of Iron in soybean plants [J]. *Plant Physiology*, 1970, 46: 320 - 323.
- [65] GABOR H, RALAZS S. Molecular rearrangements of thylakoids after heavy metal poisoning, as seen by Fourier transform infrared (FTIR) and electron spin resonance (ESR) spectroscopy [J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 61(3): 241 - 252.
- [66] VAN A F, CLIJSTERS H. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentration of zinc: effect on ribulose - 1,5 - biphosphate carboxylase/oxygenase [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1986, 125: 355 - 360.
- [67] MARCELLE R. Effects of stress on photosynthesis [M]. *Martinis Nijhoff, The Hague*, 1983: 371 - 382.
- [68] TRIPATHY B C, MOHANTY P. Zinc-inhibited electron transport of photosynthesis in isolated barley chloroplasts [J]. *Plant Physiology*, 1980, 66: 1174 - 1178.
- [69] KUPPER H, KUPPER F, SPILLER M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 259 - 266.
- [70] 杨志敏. 镉污染对小麦萌发期生长和某些生理生化特性的影响 [J]. *农业环境保护*, 1994, 13(8): 121 - 123.
- [71] MATHYS W. Vergleichende untersuehungen der zinkaufnahme von die sistenten und sensitive population VOll agrostis tenuis sibth [J]. *Flora*, 1973, 162: 492 - 499.
- [72] KRUPA Z, SIEDLECKA A, MATHIS P. Cd/Fe interaction and its effects on photosynthetic capacity of primary bean leaves [C]// *Proceedings of the xth international photosynthesis congress*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995: 621 - 624.
- [73] 刘建新. 镉对小麦幼苗生长和某些生理特性的影响 [J]. *甘肃科学学报*, 2004, 16(1): 49 - 51.
- [74] 刘建新. 镉锌交互作用对玉米幼苗生理生化特性的影响 [J]. *宜春学院学报*, 2004, 26(6): 55 - 57.
- [75] TRIPATHI B N, MEHTA S K, GAUR J P. Recovery of uptake and assimilation of nitrate in *Scenedesmus* sp. previously exposed to elevated levels of Cu²⁺ and Zn²⁺ [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161: 543 - 549.
- [76] 段昌群, 王煥校, 曲仲湘. 重金属对蚕豆 (*Vicia faba*) 根尖的核酸含量及核酸酶活性影响的研究 [J]. *环境科学*, 1991, 13(5): 31 - 35.
- [77] 刘文彰, 孙典兰. 镉对黄瓜幼苗生长及其生理效应的影响 [J]. *河北师范大学学报: 自然科学版*, 1992(1): 81 - 84.
- [78] 高圣义, 王煥校, 吴玉树. 镉污染对蚕豆 (*Vicia faba* L.) 部分生理生化指标的影响 [J]. *中国环境科学*, 1992, 12(4): 281 - 284.
- [79] KVSH A, PRASAD, SARADHI P P. Effect of Zinc on free radicals and proline in brassica and cajanus [J]. *Phytochemistry*, 1995, 39(1): 45 - 47.
- [80] METHA S K, GAUR J P. Heavy-metal-induced proline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris* [J]. *New Phytologist*, 1999, 143: 253 - 259.
- [81] 吴振球, 吴岳轩. 铜镉对水稻幼苗生长及超氧化物歧化酶的影响 [J]. *植物生理学报*, 1990, 16(2): 139 - 146.
- [82] 王慧忠, 郭庆凯. 重金属污染土壤的治理方法 [J]. *环境科学报*, 2001(4): 25 - 26.
- [83] 叶志鸿, 蓝崇钰. 镉废水对宽叶香蒲 (*Typhalatifolia*) 生理生态的影响 [J]. *生态科学*, 1993(2): 93 - 100.
- [84] MUNZURDGLUŐ GÜR N. The effects of heavy metals on the pollen germination and pollen tube growth of apples (*Malus sylvestris* Miller cv Gloden) [J]. *Turkish Journal of Biology*, 2000, 24: 677 - 684.
- [85] FOY C D, CHANEY R L, WHITE M C. The physiology of metal toxicity in plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 19: 511 - 566.
- [86] CHAO S H, LI J. Study on the zinc toxicification in the wheat seeds [J]. *Mol Pharmacol*, 1984, 26: 75.
- [87] 郁建控. 浅谈重金属对生物毒性效应的分子机理 [J]. *环境污染与防治*, 1996, 18(4): 28 - 31.
- [88] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd, Zn 复合污染对水车前叶叶绿素含量和活性氧清除系统的影响 [J]. *生态学杂志*, 2003, 22(2): 5 - 8.
- [89] PRASAD K, SARADHI P P, SHARMILA P. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 42: 1 - 10.
- [90] LUNA C M, GONZALEZ C A, TROPPI V S. Oxidative damage caused by excess of copper in oat leaves [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1994, 35: 11 - 15.

(上接第 14004 页)

- [15] RHOASES J D, CHANDUVI F, LESCH S. Soil salinity assessment [J]. *FAO Irrigation and Drainage Papers*, 1999, 57: 3 - 7.
- [16] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4): 39 - 41.
- [17] 宋长春, 阎百兴, 宋新山. 电磁技术在苏打盐渍化土壤研究中的应用 [J]. *地理科学*, 2002, 22(1): 91 - 95.
- [18] DOMSCH H, GIEBEL A. Estimation of soil textural features from soil electrical conductivity recorded using the EM38 [J]. *Precision Agriculture*, 2004(5): 389 - 409.
- [19] 刘庆生, 刘高焕, 赵军. 土壤类型、质地和土地类型对土壤盐渍化水平的指示 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 297 - 300.
- [20] BERLE R. Clay working with the EM38 earth conductivity meter: geophysical survey at the Hopeton Earthwork, Chillicothe, Ohio [M]. *Lexington: Cultural Resource Analysis, Inc*, 2001: 14 - 21.
- [21] LESCH S M, RHOADES J D, LUND L J, et al. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 540 - 548.
- [22] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的指示克立格分析评价 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 585 - 593.
- [23] 白慧东, 刘焱选, 初振东, 等. 滨海平原区土壤电导率的空间变异规律研究 [J]. *石河子大学学报: 自然科学版*, 2007, 25(5): 571 - 574.
- [24] TRIANTAFILIS J, ODEH I O A, MCBRATNEY A B. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65: 869 - 878.
- [25] BARBIÉRO L, CUNNAC S, MANE L, et al. Salt distribution in the senegal middle valley: analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N' Galenka creek [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 46: 201 - 213.
- [26] 王建红, 吴玉卫, 傅庆林. 海涂土壤电导率的空间变异性研究 [J]. *浙江农业大学学报*, 1999, 25(2): 139 - 142.
- [27] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法 [J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(5): 59 - 66.
- [28] 杨劲松, 姚荣江. 基于磁感式土壤电导率空间变异性的插值方法比较 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 50 - 57.
- [29] CORWIN D L, LESCH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46: 11 - 43.