

土壤近地传感器研究进展

史舟¹ 郭燕¹ 金希¹ 吴豪翔^{2†}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

(2. 浙江大学公共管理学院土地管理系, 杭州 310029)

摘要 野外快速获取土壤各类理化参数的技术手段是土壤科学的重要研究方向,也是传统土壤理化测试分析向土壤野外实时监测方向发展的重要技术支撑。国际土壤科学联合会(IUSS)在2008年专门成立了土壤近地传感器技术(Proximal Soil Sensing, PSS)工作组,开展有关各类土壤近地传感器原理、技术、设备、应用等方面的学术交流。本文就目前国内外有关土壤近地传感器方面的研究工作按照其设备工作原理的不同进行了分类总结和说明,最后指出了当前土壤近地传感器技术发展存在的主要问题和发展趋势。

关键词 土壤近地传感器(PSS); 计量土壤学; 土壤光谱

中图分类号 S159 **文献标识码** A

近年来,随着现代传感器技术的飞速发展和物联网产业的兴起,研究与开发各类快速获取物体和周边环境信息的传感器成为热点。国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)的农业重点领域“农业精准作业与信息化”,内容就涉及到“重点研究开发生物生长和生态环境信息数字化采集技术,实时土壤水肥光热探测技术。”对于现代土壤学科而言,引入工程与信息领域的新技术,加强学科交叉,研究野外土壤特性信息的快速获取技术或智能装备将是重要的发展方向,也是“数字土壤”和土壤信息技术的核心研究内容之一。

2010年在澳大利亚召开的第19届国际土壤学大会,其中一个专场就是由WG 1.5工作组主持的“*Soil sensor: A rapid soil measuring technology* (土壤传感器:一种快速的土壤采集方法)”。会上有5个口头报告,26个墙报,参与者踊跃,内容涉及电磁感应(Electromagnetic Induction, EMI)、 γ 射线、热红外、反射光谱技术等快速获取土壤特性的研究方法和应用案例。WG 1.5工作组成立于2008年7月,受到计量土壤学(Pedometrics)专业委员会和土壤物理学专业委员会的双重指导,主要围绕如何利用现代传感器技术来研究土壤过程与时空变异特性,以及各类土壤近地传感器(Proximal Soil Sensing,以下简称PSS)的改进与研发技术。本文将就土壤近地传感器发展的历史,以及传感器的原理、方法和应用进行介绍,并就土壤近地传感器发展的趋势进行讨论。

1 土壤近地传感器发展的背景

* 国家自然科学基金项目(40871100)、浙江省杰出青年科学基金项目(R5100140)、国家农业科技成果转化资金项目(2009GB23600517)资助

† 通讯作者, E-mail: hxwu@zju.edu.cn; Fax: 0571-88982831; Tel: 0571-86039521

作者简介: 史舟(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事农业遥感与信息技术方面的研究。E-mail: shizhou@zju.edu.cn

收稿日期: 2010-12-07; 收到修改稿日期: 2011-04-15

土壤近地传感器 (Proximal Soil Sensing) 最早由 Viscarra Rossel 和 McBratney^[1] 在 1998 年提出的, 他们认为相对于遥感 (Remote Sensing), 土壤近地传感器主要指能够在近表土 1 m 内可快速获取土壤特性的技术或设备。在 2010 年他们又重新给予了新的定义, 认为土壤近地传感器是利用田间传感器获取土壤近地面 (2 m 内) 或是土体内信息的技术^[2]。土壤近地传感器的原理研究与技术开发不但与土壤学的土壤物理、土壤化学、计量土壤、数字土壤制图各分支学科密切相关, 而且还与工程、空间统计、化学计量学、数学、地球物理、机电一体化、遥感等其他学科和技术相互交叉。

最早的土壤近地传感器是 1925 年由 Rothamsted 实验站的 Haines 和 Keen^[3] 研究的“on-the-go soil strength sensor (实时测定土壤强度传感器)”, 用来测量土壤的机械阻力。他们在 1928 年进一步研发了更轻便的“Rothamsted dynamometer (测力器)”, 并由 Cambridge Instrument Company (剑桥设备公司) 公司实现了产品化。随着对电磁波理论的更深入认识、研究, 从可见光到红外光, 从高能射线到微波, 波谱范围不断地扩展, 极大地丰富了土壤信息的获取途径。20 世纪 60 年代始, 研究者就对室内外获取土壤光谱做了大量的研究工作, 具有代表性的是 1970 年 Condit^[4] 分析了美国 160 种土壤从 0.32 μm ~1.0 μm 波段的光谱曲线, 为光学辐射传感器的研究利用奠定了良好的基础。20 世纪 70 年代离子敏感场效应晶体管 (ion-sensitive field effect transistors, ISFETs) 技术出现, 最早在 1972 年由 Bergveld^[5] 将其用来测定土壤的电生理学特征, 随后在 1974 年和 1978 年结合离子选择电极 (ion-selective electrodes, ISEs) 和场效应晶体管 (field effect transistors, FETs) 技术进行土壤生物电势的测量研究^[6-7]。近年来, 应用电磁感应原理测量土壤盐分成为一项热门技术, 最早在 1980 年, McNeill^[8-9] 就通过此原理利用 EM38 快速获取土壤电导率进行了初步的探索, 并对其影响因素进行了研究。

国内, 20 世纪 80 年代初, 戴昌达^[10] 对中国主要土壤光谱反射特性进行了初步研究。90 年代初, 王伟和齐永乐^[11] 对土壤水分传感器进行了初步的研制和实验。此时, 电磁感应式传感器 (如 EM38) 也开始在中国得到初步应用, 张为政和殷立娟^[12] 利用 EM38 在吉林西部苏打盐渍土区域测定不同深度土层电导率, 建立电导率与含盐量之间的回归关系, 研究不同土层深度的含盐量。但是相比传感器的发展及 PSS 发展需求, 国内还存在很大的差距, 特别是多数土壤近地传感器均从国外引进。

2 主要土壤传感器的原理与应用现状

土壤传感器按照测量方式不同可以分为侵入式 (Invasive) 和非侵入式 (Non-invasive) 两种。按照原理不同则可以分为电与电磁型、光学与辐射型、机械式型、电化型等种类。如土壤水分含量、有机质含量、氮素含量、土壤结构等既可以采用侵入式也可以采用非侵入式传感器测量; pH、土壤紧实度等可采用侵入式传感器测量; 而电导率、土壤气体组分等则一般采用非侵入式的传感器进行测量。利用不同原理进行分类的传感器测试指标和主要的代表性仪器见表 1。

表 1 不同类型土壤传感器的测试范围和主要代表性仪器

Table 1 Working ranges and representative instruments of different types of soil sensors

传感器类型 Types of sensors	测量指标 Indexes	代表性仪器 Representative instruments
电与电磁型 Electrical and electromagnetic type	质地、有机质、盐分、水分等 Texture, soil organic matter, salt, water, etc	大地电导率仪、Veris3100、时域反射仪、频谱反射仪 Ground conductivity meter, Veris3100, time-domain reflectometer (TDR), spectrum reflection instrument
光学与辐射型 Optical and radiometric type	质地、有机质、CEC、pH, 水分、盐分、温度、土壤粗糙度、矿物等 Texture, soil organic matter, CEC, pH, water, salt, soil temperature, soil roughness, mineral, etc	光谱仪、探地雷达、激光诱导光谱 Spectrometer, ground penetrating radar, laser induced spectrum
机械式型 Mechanical type	紧实度、耐旱力、水分等 Compactness, drought resistance force, water, etc	指针式土壤紧实度仪 Pointer soil compactness meter
电化学型 Electrochemical type	pH、硝酸盐、营养元素等 pH, nitrate, nutrient, etc	pH计、离子敏感晶体管传感器 pH meter, ion sensitive transistor sensor

2.1 电与电磁型传感器

这种类型的传感器主要是利用电流的变化来测量土壤颗粒导电或者积累电荷的能力，当仪器接近或侵入土体时，土壤就成为了电磁系统中的一部分，当地理位置发生变化的时候，电压或者电流也会相应地瞬时发生变化。目前这种类型的传感器主要是用于土壤盐分、土壤黏粒含量、黏土层埋深、土壤养分、土壤水分等土壤属性指标的测量分析。典型的仪器主要有 EM38、Veris3100^[13]，二者均是利用电流通过传感器后端的发射线圈产生随时间变化的动态原生磁场，在大地中诱导产生微弱的电涡流，进而诱导产生次生磁场。仪器前端的信号接收线圈同时接收原生磁场和次生磁场的信息，通过测量二者之间的相对关系来测量土壤的电导率。

利用这一原理，国外 Myers 等^[14]将土壤表观和土壤剖面的电导率数据结合起来进行高分辨率 ECa 土壤数字制图；Besson 等^[15]利用 MUCEP (multicontinuous electrical profiling) 测量土壤的电阻系数来监测田间尺度上土壤水分的时空变化；国内李洪义等^[16]利用 EM38 在地表不同高度测量的土壤表征电导率 ECa 值，结合 EM38 电导率线性响应模型和 Tikhonov 正则化预测土壤剖面电导率；赵燕东和王一鸣^[17-18]基于驻波率原理进行了土壤水分测量方法及灵敏度分析的研究。

这种利用电磁感应技术进行土壤测量具有快速、实时性、成本较低等优点，与全球卫星定位系统 (GPS) 结合后可以安装到田间车载设备上，实现田间尺度的土壤电导率快速扫描成图。而且结合专业分析软件 OASIS、地理信息系统 (GIS) 软件及其他 Matlab 软件，可以对所获得的信息进行土壤剖面属性三维信息的反演等。但在具体操作过程中会受到许多外界因素的干扰，如环境温度差、土壤含水量、矿物质组分、黏粒含量等均会对测定产生不同程度的影响。譬如温差的影响，可以进行多次仪器归零校正，尽可能地消除其影响。

2.2 光学与辐射型传感器

光学和辐射测量型传感器主要是利用电磁能所表现出的特征对土壤特性进行分析。电磁波是由原子内部运动的电子发生运动轨迹的变化、电子和核子跃迁产生的，不同的物质，其原子内部电子的运动情况不同，电子和核子跃迁所需要的能量也不相同。能量等级与光波的波长、频率相关，因此当不同波段的光波作用于土壤样本的时候，就会产生不同的光谱特征。电磁波的原理及应用见图 1。目前利用的波段主要是可见光(Vis: 400~700 nm)、近红外(NIR: 700~2500 nm)、中红外(mid-IR: 2500~25000 nm)及高能射线(如 X 射线、 γ 射线)。在近地土壤传感器技术研究中可以采用单波段，也可以采用多波段。

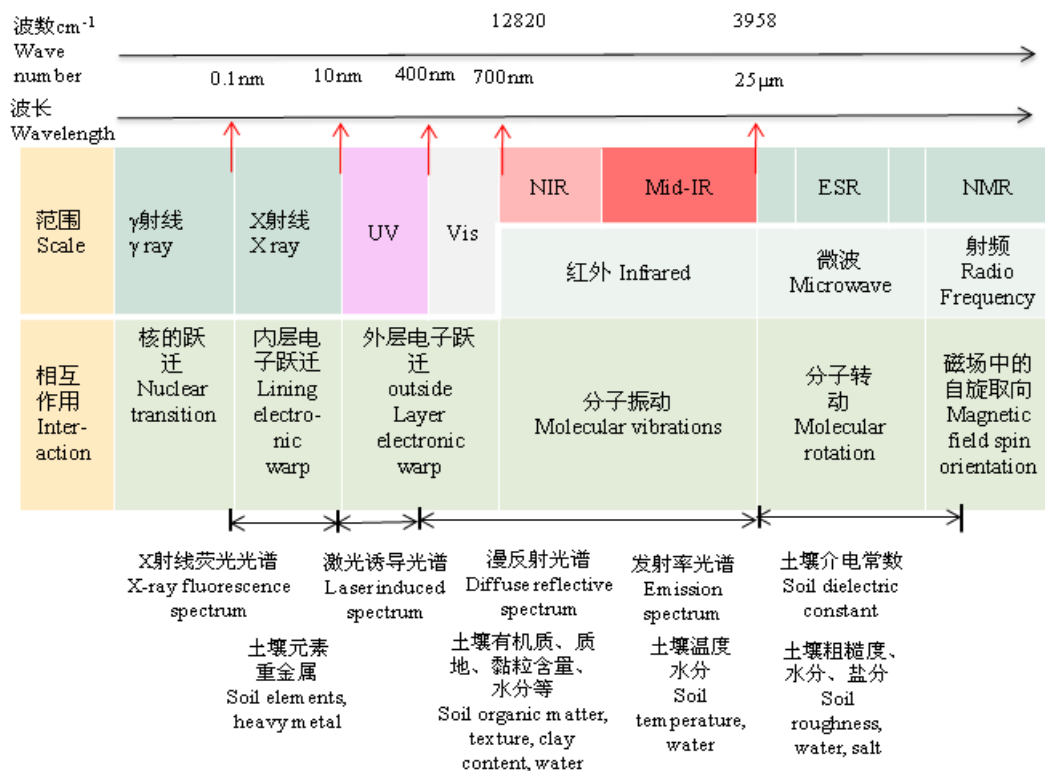


图 1 光波原理及其应用范围

Fig. 1 Principle of optical waves and range of its application scale

2.2.1 高能射线型传感器 γ 射线、X 射线具有很高的能量，尤其是波长小于 0.2 Å 的 γ 射线电磁波是原子核能级跃迁蜕变时释放出的射线，具有很强的穿透力。van Egmond 等^[19]利用土壤 γ 射线辐射对耕层土壤物理化学特性进行了定量制图研究；Söderström 和 Eriksson^[20]利用 γ 射线探测土壤和谷类作物中重金属镉含量，并进行了风险评估。X 射线荧光光谱传感器和激光等离子体光谱 (LIBS) 传感器，主要是应用在土壤重金属含量的测量上。国外，Eusterhues 等^[21]利用 XRD 光谱分析技术分析了土壤铁矿-有机质在沉淀过程中的相互影响；Ciucci 等^[22]采用时间分辨率 LIBS 技术检测了土壤污染物中痕量元素的含量；Therriault 等^[23]则采用光纤 LIBS 对土壤中重金属含量检测阈值进行了分析。国内，陈素兰等^[24]采用粉末压片法，利用 S4 Pioneer X 射线荧光光谱仪测定了土壤及底泥样品

中铜、铅等多种元素；张彪^[25]在野外条件下，采用 X 射线荧光分析仪分析土壤和沉积物中重金属污染物的含量，并对其精度和检出限进行了评估。许洪光^[26]在实验室内采用 LIBS 光谱分析了土壤中重金属含量的检测限。但是 X 射线荧光光谱传感器和 LIBS 传感器与其他一些成熟的化学分析手段，如电感耦合等离子体质谱仪（ICP）和原子吸收分光光度法（AAS），比较起来在精度上还有所欠缺。在野外进行测量时，还受到土壤水分含量、土壤颗粒大小、土壤表面状况的影响。

2.2.2 可见光-红外型传感器 在可见光波段，土壤光谱中包含大量有机质和非有机质光谱信息。吸收光谱产生主要是由于带电粒子所致，与矿物质中铁离子的含量密切相关。Viscarra Rossel 等^[27]采用数码相机对土壤进行拍照，然后借助颜色空间模型和红度指标将 RGB 三原色转换为变量，对土壤有机质和铁离子含量进行估测；Shonk 等^[28]利用移动式传感器在 660 nm 处的反射光谱对土壤有机质含量进行预测研究。

在近红外波段，吸收光谱产生主要是由于 OH、SO₄、CO₃ 等离子团不同离子键特有的吸收能量不同所致^[29]。Sudduth 等^[30]借助 VNIR DRS (Diffuse reflectance spectroscopy) 采用偏最小二乘法 (PLS) 对田间尺度范围内的土壤物理化学特性的变异情况进行了评估。Shibusawa 等^[31]采用携带有 NIR 传感器的尖头仪器来测量 15 cm 深度处的光谱；Christy^[32]则利用移动式的光谱仪实时测量和预测不同土壤特性（土壤有机质、全碳、全氮、钙和镁）。图 2 是 VNIR 传感器在不同工作模式下进行土壤碳的田间快速测量，其中图 2a 测量设备需要行进中定点驻停进行传感器探针侵入式测量，图 2b 设备可以行进中连续测量^[13]。

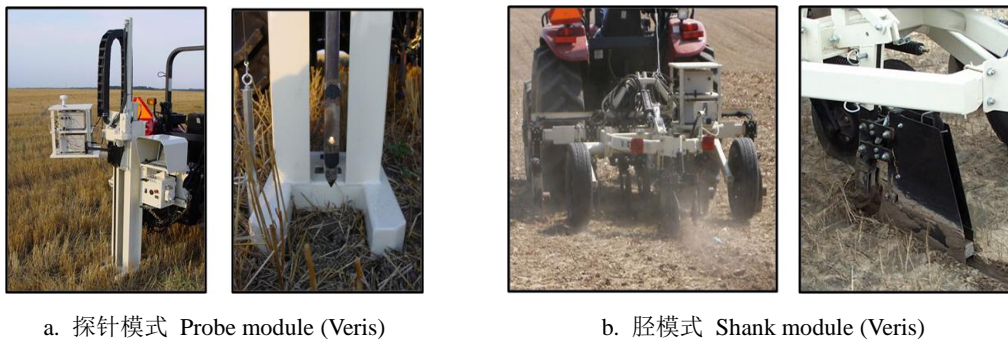


图2 VNIR DRS田间测量图

Fig. 2 Field measurement of VNIR DRS

中红外波段光谱同样适合分析土壤有机质和矿物质组成，吸收特征与有机质的官能团和矿物质成分密切相关。1998年，Janik等^[33]采用中红外漫反射光谱分析土壤中有机碳、阳离子交换量等指标，并与实验室内分析结果的精度进行了比较。随后，Jahn等^[34]采用mid-IR光谱来确定土壤硝酸盐含量、有机质含量。Reeves等^[35]将样品进行不同前处理，并在不同的环境条件下，比较分析采用NIR和mid-IR对土壤全碳和全氮含量变异情况分析的精度，结果表明，在非干燥的土壤环境条件下，mid-IR分析土壤碳含量时候精度更高。

这种类型传感器具有非接触性、不受电子干扰、灵敏度高等有别于其他传统传感器的显著特点。尤其是可见-红外波段光谱在近地土壤属性分析中潜力很大，但是至今在土壤学科中尚未得到广泛的

应用。其中原因之一是利用 VNIR 和 mid-IR 建立的预测模型的普适性问题尚未很好的解决，必须要有区域典型土壤样本来重建或校验模型，从而使传感器快速、便捷的优势得不到很好体现。

2.2.3 微波型传感器 微波的波长一般定义为1 mm ~1 m，主要是指探地雷达。雷达波束自天线发射出来，照射到地面时由于传播介质条件的改变，一部分能量发生散射返回空中，另一部分透射进入下层介质中。利用探地雷达，研究者通过检测土壤中电磁波的传播变化来研究土壤物理特征，反射波的变化预示着土壤密度的变异或者是土层限制因子的变化。Du和Rummel^[36]利用探地雷达对土壤表层水分含量进行了研究；Richard等^[37]利用雷达传感器估测苗床的土壤粗糙度和土壤水分含量。国内，刘恒柏等^[38]对探地雷达技术在土壤剖面特征探测和土壤含水量测定方面的应用展开了研究；赵丽华等^[39]则利用微波辐射法测定了土壤吸湿水的含量，并与烘箱法测得的结果进行了比较分析。这种类型的传感器易于聚成较窄的发射波束，精度高，信息量大，对环境的敏感性较小，可以在相对恶劣的环境条件下进行测量。

2.3 机械式型传感器

机械式传感器在土壤中进行推拉时，对土壤产生的切割、断裂、填土等阻抗力以及与表面产生的摩擦和黏结阻力均被记录在其中，可以估测土壤的机械阻抗。当穿透计锥入土壤的时候，产生的压力作用于电容环上，通过压力杠杆将这种力传递给压力传感记录器，记录下土壤阻抗力数据。通过建立与土壤属性的关系，得到土壤紧实度、土壤耐旱力、土壤水分分布差异等状况。Chung 等^[40]设计和验证了一种实时动态测量土壤强度的剖面传感器。Whelan 等^[41]使用这种机械式传感器在田间尺度范围内测量土壤的牵引阻力，结合土壤水分含量情况，探索了这种装置仪器的功能，研究了水分和旱情的变异情况。大田测量参见文献[42]。

这种传感器结合其他类型的传感器可以更好地进行土壤属性的测量和数字制图。如土壤强度传感器在垂直方向上进行上下移动，结合光学传感器实时感应位置的变化绘制一定深度土壤属性的空间分布制图^[43]。但是机械式传感器对土壤结构比较敏感，相对脆弱，不适合进行大范围的采样研究。

2.4 电化学型传感器

电磁感应型传感器和电阻型传感器等虽然能够快速、低廉地获取土壤属性信息，但是不能直接给出土壤养分浓度状况。而电化学型传感器则可以提供关于土壤养分的浓度状况和 pH 等关键信息。电化学型传感器是以离子导电为基础制成，主要使用的是离子选择电极（ISEs）和离子敏感场效应晶体管（ISFETs）两种技术。ISEs 传感器的工作原理是：溶质溶解于电解质溶液并离解，离解生成的离子作用于离子电极产生电动势，将此电动势换算成离子浓度。这种方式的传感器是由作用电极、对比电极、内部溶液和隔膜等构成的。ISFETs 传感器是由离子选择电极敏感膜和普通的金属-氧化物-半导体场效应晶体管（MOFSET）组合而成的，对离子具有一定的选择性，对比于一般的离子选择性电极，它具有高阻抗转换、灵敏度高、响应时间快等优点。这种类型的传感器主要用来进行 pH、硝酸盐、钾离子等测定。Loreto 和 Morgan^[44]利用 ISFETs 硝酸盐探测器设计出了一套实时自动监测硝酸盐含量测量系统；Adsett 等^[45]利用捆绑在拖拉机的电化学 ISEs 传感器进行土壤硝酸盐的自动检

测。代表性仪器 Veris pH Manager (Veris 公司生产的 pH 仪) 可以进行土壤 pH 的田间快速测量与实时绘图^[13]。此外, Adamchuk 等^[46]、Sethuramasamyraja 等^[47]试图利用 ISEs 与 pH 同时绘制土壤溶液中钾离子和残余硝态氮的分布图, 但是这种方法的障碍是不能够即时地进行离子的提取, 而且玻璃电极也容易损坏。2001 年, 化学修正-ISFETs 型电化学传感器也在硝酸盐、钙和钾的测量估算中得到了初步的应用^[48-49]。

电化学型传感器具有体积小、价格便宜、响应快、输出阻抗低、易集成化等优点, 但易受外界环境的干扰, 如环境温度、离子干扰、土壤质地结构, 均会影响测量的精度。如今虽然 ISFETs 类型的传感器已经实现商品化, 并在实际中得到应用, 但还仅限于土壤 pH 和钾、钙等离子浓度测量及制图等方面。

3 土壤近地传感器发展的方向

3.1 面向精确农业的移动式近地土壤传感器综合平台研发

目前国外提出的“on-the-go (实时)”传感器测量模式, 核心的思想是能将近地土壤传感器安装在农田移动机械上, 进行相关土壤参数的实时测量。目前, 能够实现连续移动中快速扫描测量的近地传感器主要是电磁类和光学辐射类仪器, 如 EM38、探地雷达、VNIR、 γ 射线传感器等。通过多传感器综合信息采集平台, 能够实现传感器之间信息的互补和综合利用。如土壤水分含量对土壤有机质光谱探测模型有很大的影响, 所以在野外利用可见-近红外反射光谱技术探测土壤有机质时, 同时利用探地雷达测量土壤水分的信息来校正有机质光谱模型。此外, 利用多传感器系统可一次获得不同的土壤特性参数数据, 如土壤矿物质含量、不同深度的土壤电导率和土壤 pH 等, 可避免多次测量车辆行走对土壤的压实^[50]。

另外, 综合平台硬件开发的基础上, 还需要基于实时采集的数据自动处理与模型构建技术。特别是与 GPS、GIS 技术结合, 能提供实时的信息采集与空间专题图生成功能, 为精确农业管理提供平台。

3.2 基于物联网的接入式近地土壤传感器研发

物联网技术也称为传感网技术, 它综合了传感器技术、嵌入式计算机技术、分布式信息处理技术、现代网络及无线通信技术等。目前, 随着“感知中国”和国家物联网产业的提出, 各应用行业的各类传感器如何接入, 以及如何实现物与物之间的联网是核心。“十二五”国家科技计划项目中将农业物联网与精确农业、农村信息化一起作为重大项目之一, 而探测土壤特性的传感器是农业物联网的重要组成。这就需要我们研发适合于物联网的更加小型、快速探测、高精度、低能耗、无线和数据智能处理能力的土壤近地传感器设备, 以适应多尺度空间的土壤和相关环境信息的感知。

3.3 可靠精度的近地土壤传感器研发

虽然近地土壤传感器在野外快速测定的优势明显, 但是如何使探测精度能达到实际农业生产的

业务化需求，还存在很多关键问题需要研究和突破。如目前全国大规模开展的测土配方工作，投入了大量的资金和人力进行野外采样和室内理化测试。而野外的快速测试设备中，只有测量植株氮含量的叶绿素仪（如柯尼卡美能达公司的 SPAD 仪）设备被大量采用，而近地土壤传感器基本很少用到。其关键问题：

（1）测试的稳定性。如采用 VNIR 传感器测定土壤有机质含量的时候，当有机质含量大于 2% 时，土壤反射光谱响应敏感，建模得到的有机质含量较准确；而当有机质含量在 2% 以下时，由于在可见光波段有机质与其他土壤组成物质（如铁、锰）相互影响，土壤光谱反射特性的能力有所减弱，建立的模型稳定性就降低，得到的有机质含量误差就大。测定土壤重金属含量的 X 射线荧光光谱仪，当土壤中金属 Pb 含量低于 5 mg kg^{-1} 时，误差增加。

（2）应用的普适性。不同发生发育背景下形成的土壤类型、理化特性差异显著。而很多近地土壤传感器均是基于区域土壤样本或标准土壤样本建立的预测模型，在大范围推广使用时，预测模型的普适性是极大的问题。这就需要我们建立典型地区标准土壤样品库或野外参考样本体系，让各类传感器通过各类大样本的测试，建议相对统一预测模型或校验参数。

（3）需求的实用性。从当前土肥工作和农业生产的实际需求出发，来研发各类新型实用的土壤近地传感器，是 PSS 技术未来发展的真正推动力。如与测土配方评价和咨询模型结合，研发嵌入式的 PDA 系统，使传感器实测数据转换成可指导农业实际生产的建议。如野外大面积快速采集手段与室内的理化分析相互配合，运用计算机技术、GIS 和 GPS，建立不同层次、不同区域的测土配方施肥数据库和咨询模型。

如今，近地土壤传感器作为土壤科学发展的新分支，越来越受到国内外土壤科学家的关注。特别是新型传感材料和传感器的不断出现，使我们有可能研发新的稳定性好、灵敏度高、能连续测试的土壤近地传感器。这些新技术的发展需要国内土壤学家紧密跟踪，共同推动国内 PSS 技术的发展。

参考文献

- [1] Viscarra Rossel R A, McBratney A B. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. *Geoderma*, 1998, 85(1):19-39
- [2] Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. *Proximal soil sensing*. Springer Science+Business Media B V, 2010
- [3] Haines W B, Keen B A. Studies in soil cultivation. II. Test of soil uniformity by means of dynamometer and plough. *Journal of Agricultural Science*, 1925, 15:387-394
- [4] Condit H R. The spectral reflectance of American soils. *Photogramme Eng*, 1970, 36: 955-966
- [5] Bergveld P. Development, operation, and application of ion-sensitive field effect transistor as a tool for electrophysiology. *IEEE Trans Biomed Eng BM*, 1972, 19:342
- [6] Matsuo T, Wise K D. Integrated field-effect electrode for biopotential recording. *IEEE Trans Biomed Eng BM*, 1974, 21:485-487
- [7] Esashi M, Matsuo T. Integrated micro multi ion sensor using field-effect of semiconductor. *IEEE Trans Biomed Eng BM*, 1978, 25:184-192

-
- [8] McNeill J D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Tech Note TN-6. Geonics, ON, Canada, 1980
- [9] McNeill J D. Electrical conductivity of soil and rocks. Tech Note TN-5. Geonics, ON, Canada, 1980
- [10] 戴昌达. 中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究//遥感文集. 北京: 科学出版社, 1981: 315-323. Dai C D. Research on major soil spectral reflection characteristic classification and the data processing of China (In Chinese)//Remote sensing corpus. Beijing: Science Press, 1981: 315-323
- [11] 王伟, 齐长乐. 土壤水分传感器的研制. 传感器技术, 1991(2):21-24. Wang W, Qi C L. Soil-moisture sensors (In Chinese). Journal of Transducer Technology, 1991(2):21-24
- [12] 张为政, 殷立娟. 电磁感应电导仪(EM38)测定土壤含盐量的研究. 应用生态学报, 1993, 4(3):289-294. Zhang W Z, Yin L J. Determination of soil salt content with electromagnetic induction conductometer (EM38) (In Chinese). Chinese Journal of Application Ecology, 1993, 4(3):289-294
- [13] Veris Technologies Inc. [2010-10-25]. <http://www.veristech.com/products.aspx>
- [14] Myers D B, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Combining proximal and penetrating soil electrical conductivity sensors for high-resolution digital soil mapping//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010: 233-243
- [15] Besson A, Cousin I, Richard G, et al. Changes in field soil water tracked by electrical resistivity//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:275-282
- [16] 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究. 土壤学报, 2010, 47(2):359-363. Li H Y, Shi Z, Tang H L. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary kriging method (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2)359-363
- [17] 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法. 农业机械学报, 2002, 33(4):12-14,24. Zhao Y D, Wang Y M. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio (In Chinese). Transactions of CSAE, 2002, 33(4):12-14,24
- [18] 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析. 农业工程学报, 2002, 18(2):5-8. Zhao Y D, Wang Y M. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 18(2):5-8
- [19] van Egmond F M, Loonstra E H, Limburg J. Gamma ray sensor for topsoil mapping: The mole//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:323-332
- [20] Söderström M, Eriksson J. Gamma ray sensing for cadmium risk assessment in agricultural soil and grain: A case study in Southern Sweden//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:333-342
- [21] Eusterhues K, Wagner F E, Hausler W, et al. Characterization of ferrihydrite-soil organic matter coprecipitates by X-ray diffraction and mossbauer spectroscopy. Environmental Science & Technology, 2008, 43(3):256-266
- [22] Ciucci A, Palleschi V, Rastelli S, et al. Trace pollutants analysis in soil by a time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy technique. Applied Physics B-Lasers and Optics, 1996, 63(2):185-190
- [23] Theriault G A, Bodensteiner S, Lieberman S H. A real-time fiber-optic LIBS probe for the in situ delineation of metals in soils. Field Analytical Chemistry and Technology, 1998, 2(2):117-125
- [24] 陈素兰, 胡冠久, 周春宏, 等. X 射线荧光光谱法测定土壤及底泥中多种元素. 环境监测管理与技术, 2006, 18(4):15-18. Chen S L, Hu G J, Zhou C H, et al. To measure variety elements in the soil and mud by X-ray fluorescence spectrographic (In Chinese). The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2006, 18(4):15-18

-
- [25] 张彪. 用野外便携式 X 射线荧光分析仪分析土壤和沉积物中的重金属污染物. 国外铀金地质, 2000, 17(2):180-185. Zhang B. To measure the heavy metals pollutants content in soil and sediment by X-ray fluorescence analyzer (In Chinese). Overseas Uranium and Gold Geology, 2000, 17(2):180-185
- [26] 许洪光. 土壤中重金属元素的 LIBS 实验研究. 芜湖: 安徽师范大学, 2007. Xu H G. An investigation on the Laser induced breakdown spectroscopy of the metal element in soil (In Chinese). Wuhu: Anhui Normal University, 2007
- [27] Viscarra Rossel R A, Fouad Y, Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. Biosyst Eng, 2008, 100:149-159
- [28] Shonk G A, Gaultney L D, Schulze D G, et al. Spectroscopic sensing of soil organic matter content. Trans ASAE, 1991, 34:1 978-1 984
- [29] 李民赞. 光谱分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2006. Li M Z. Spectral analysis technology and its application (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006
- [30] Sudduth K A, Kitchen N R, Sadler E J, et al. VNIR spectroscopy estimates of within-field variability in soil properties//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:153-163
- [31] Shibusawa S, I Made Anom S W, Sasao A, et al. Soil mapping using the real-time soil spectrometer//Grenier G, Blackmore S. Precision agriculture' 01. Proceedings of the 3rd European conference on precision agriculture, BIOS, Oxford, UK, 2001, 497-508
- [32] Christy C D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. Comput Electron Agric, 2008, 61:10-19
- [33] Janik L J, Merry R H, Skjemstad J O. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? Australian Journal of Experimental Agriculture, 1998, 38(7): 681-696
- [34] Jahn B R, Upadhyaya S K. Determination of soil nitrate and organic matter content using portable, filter-based mid-infrared spectroscopy//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:143-152
- [35] Reeves J B, McCarty G W, Hively W D. Mid-versus near-infrared spectroscopy for on-site analysis of soil//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:133-142
- [36] Du S, Rummel P. Reconnaissance studies of moisture in the surface with GPR//Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, 1994: 1 241-1 248
- [37] Richard G, Rouveure R, Chanzy A, et al. Using proximal sensors to continuously monitor agricultural soil physical conditions for tillage management//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing. Springer Science+Business Media B V, 2010:313-321
- [38] 刘恒柏, 张佳宝, 朱安宁. 砂壤土中目标物的 GPR 图像解译及土壤含水量反演. 灌溉排水学报, 2008, 27(4):55-57. Liu H B, Zhang J B, Zhu A N. Ground penetrating radar imagery interpretation of target in sand loamy soil and soil water content inversion (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4):55-57
- [39] 赵丽华, 马桂莲, 钱新标. 微波辐射法测定土壤吸湿水的含量. 浙江林学院学报, 2002, 19(3):261-263. Zhao L H, Ma G L, Qian X B. Measurement of soil hygroscopic water by microwave radiation method (In Chinese). Journal of Zhejiang Forestry College, 2002, 19(3):261-263
- [40] Chung S O, Sudduth A K, Hummel J W. Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. Trans Am Soc Agric Biol Eng, 2006, 49:5-14
- [41] Whelan B M, Sun Y, Zeng Q, et al. Field-scale draught resistance and soil moisture measurement in Australia using a tine-based force-capacitance sensing system//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal soil sensing.

- [42] Whelan B, Sun Y, Zeng Q, et al. Paddock-scale draught resistance and soil moisture measurement in Australia using a tine-based force/capacitance sensing system. Proceedings of the 1st Global Workshop on High Resolution Digital Soil Sensing and Mapping, held under the auspices of the International Union of Soil Sciences (IUSS), Working Group on Digital Soil Mapping, Sydney, Australia, 5-8 February 2008
- [43] Adamchuk V I. Development of on-the-go soil sensor systems 2008. Proceedings of the 1st Global Workshop on High Resolution Digital Soil Sensing and Mapping, held under the auspices of the International Union of Soil Sciences (IUSS), Working Group on Digital Soil Mapping, Sydney, Australia, 5-8 February 2008
- [44] Loreto A B, Morgan M T. Development of an automated system for field measurement of soil nitrate. Paper No. 1996, 96-1087. ASAE, St Joseph, Michigan
- [45] Adsett J F, Thottan J A, Sibley K J. Development of an automated on-the-go soil nitrate monitoring system. *Appl Eng Agric*, 1999, 15:351-356
- [46] Adamchuk V I, Lund E, Sethuramasamyraja B, et al. Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Comput Electron Agric*, 2005, 48:272-294
- [47] Sethuramasamyraja B, Adamchuk V I, Dobermann A, et al. Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. *Comput Electron Agric*, 2008, 60:212-225
- [48] Artigas J, Beltran A, Jimenez C, et al. Application of ion sensitive field effect transistor based sensors to soil analysis. *Comput Electron Agric*, 2001, 31:281-293
- [49] Birrell S J, Hummel J W. Real-time multi ISFET/FIA soil analysis system with automatic sample extraction. *Comput Electron Agric*, 2001, 32:45-67
- [50] 马瑞峻, Short M, Lobsey C, 等. 多土壤信息测量传感器的硬件系统集成设计. *农业工程学报*, 2010, 26(4):156-161. Ma R J, Short M, Lobsey C, et al. Integrated multi-sensor hardware system for soil information measurement (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4):156-161

ADVANCEMENT IN STUDY ON PROXIMAL SOIL SENSING

Shi Zhou^{1†} Guo Yan¹ Jin Xi¹ Wu Haoxiang^{2†}

(1 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(2 Department of Land Management, College of Public Administration, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract How to acquire soil physico-chemical parameters instantly in the field is an important orientation of the research of soil science, and the technology is also a potential way to complement or replace the conventional soil laboratory analysis with field-based measurements. In 2008, a Working Group on Proximal Soil Sensing was formed in the International Union of Soil Sciences (IUSS). The working group is oriented to provide a platform for academic exchange on theories, technology, equipment and application of various proximal soil sensors. In this paper, researches on proximal soil sensors are classified per operation principles of the sensors and elaborated separately, and in the end, main problems and trends of the development of PSS are pointed out.

Key words Proximal soil sensing (PSS); Pedometrics; Soil spectral