

# 土壤星地传感技术现状与发展趋势

史 舟<sup>1</sup>, 徐冬云<sup>1</sup>, 滕洪芬<sup>1</sup>, 胡月明<sup>2</sup>, 潘贤章<sup>3</sup>, 张甘霖<sup>3</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642;  
3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘 要:**土壤作为自然地理学的重要研究对象之一,是联系大气、水、生物等其它地理要素的重要枢纽,其信息的快速准确获取研究对现代地理学的发展具有重要意义。本文重点介绍卫星、航空、无人机和地面不同平台搭载的不同类型传感器的探测原理;总结国内外基于星地传感技术的土壤信息快速获取方法及其在土壤属性预测和制图中的应用;阐述现代土壤信息获取在土壤地理学中的应用情况;展望当前土壤星地传感器技术的发展趋势。

**关键词:**土壤信息;遥感;近地传感;土壤地理学

## 1 前言

土壤是形态和演化过程都十分复杂的自然综合体,其形成和地理分布受气候、母质、生物、地形、时间和人类活动等因素的综合交互影响,形成不同空间尺度下土壤分布的地带性与空间异质性。因此,土壤地理学将正确描述和表征土壤分布与演变过程作为其重要研究内容之一,同时将土壤信息获取和动态监测作为重要的基础支撑。

传统土壤信息获取是利用地面土壤取样和实验室化学分析,周期长、成本高、过程复杂、实时性差。受野外调查成本和实际分析样本数量的限制,很难进行大范围土壤信息的重复调查。因此,早在20世纪初,英国洛桑试验站的土壤学家就萌发土壤传感器的想法,设计与开发了第一代土壤信息快速采集器 Dynamometer(Keen et al, 1925),并随后投入商用。该设备利用压力杠杆来测试土壤机械紧实度(传感器原型),用发报机的莫尔斯码来连续记录数据(数据采集终端的原型),用石膏模型来表达土壤机械紧实度的空间异质性(计算机数字制图的原型)。同时,美国首先利用航空像片为辅助资料进

行土壤调查,1938年推广到全美各州(Bushnell, 1929)。不难理解,靠脚步绘出土壤图的传统土壤地理学家,是多么迫切需要引入新技术、新方法。

经过近一个世纪的发展,包括卫星与航空遥感、近地传感在内的星地传感技术蓬勃发展,其研究成果不断涌现(图1),特别是20世纪80年代后有关土壤遥感与近地传感的研究论文快速增长。其中,土壤近地传感主要是利用田间传感器来获取土壤近地面或土体内信息(Viscarra Rossel et al, 1998)。早在1920's出现了机械式传感器;1960's出现了土壤光谱与X射线荧光光谱技术(X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)的研究与应用(Bowers et al, 1965; Ristori et al, 1969);1970's出现了土壤电磁感应技术(Electromagnetic Induction, EMI) (Dejong et al, 1979);1990's激光诱导击穿技术(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)用于土壤微量污染分析(Ciucci et al, 1996)。特别是可见—近红外光谱技术发展迅速。2008年,澳大利亚 Raphael 牵头建立全球土壤光谱库,目前各国都在开展国家尺度的土壤光谱库建设。同时随着现代材料、电子、计算机等技术的快速发展,土壤近地传感器研

收稿日期:2017-12-19;修订日期:2018-01-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

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。

引用格式:史舟,徐冬云,滕洪芬,等. 2018. 土壤星地传感技术现状与发展趋势[J]. 地理科学进展, 37(1): 79-92. [Shi Z, Xu D Y, Teng H F, et al. 2018. Soil information acquisition based on remote sensing and proximal soil sensing: Current status and prospect[J]. Progress in Geography, 37(1): 79-92.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.009

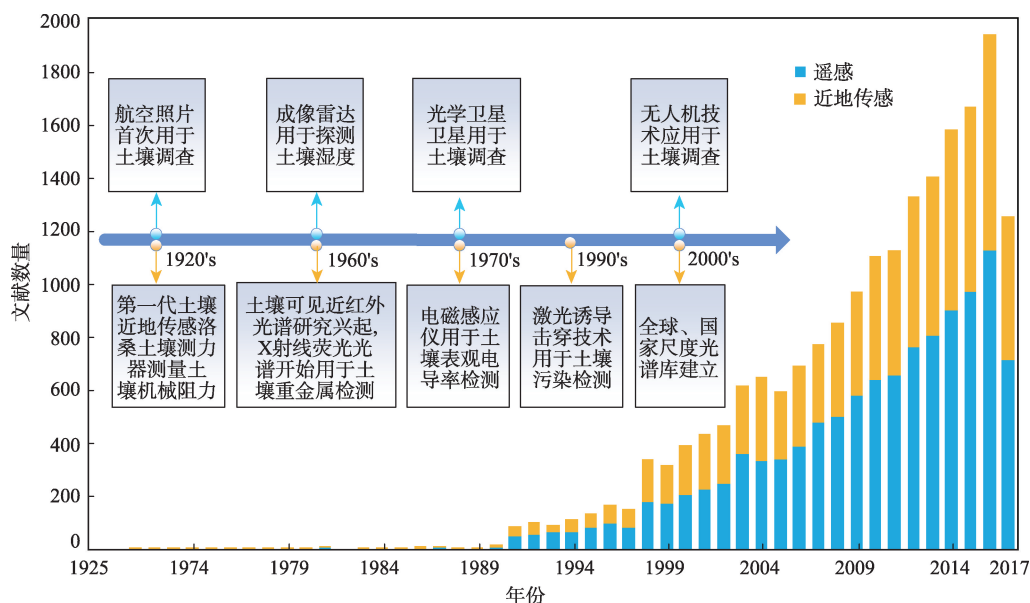


图1 土壤遥感及近地传感发展历程

Fig. 1 Development history of remote and proximal sensing

发成为土壤科学界和国际大型农业装备公司的研究热点。

土壤航空光学遥感在20世纪20年代就出现。1969年, Macdonald等(1971)利用航空成像雷达进行土壤湿度监测试验。随着1972年世界第一颗资源卫星发射成功, 卫星遥感开始用于大面积土壤调查。进入21世纪, 无人机遥感(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术快速发展, 已应用于田间尺度的高分辨率土壤调查与制图(图1)。

## 2 土壤信息星地传感技术平台与原理

### 2.1 土壤信息星地传感技术平台

星地传感技术通过搭载在不同平台(图2)上的传感器获取并提供特定空间和时间范围的观测值。平台属性对遥感数据的时间分辨率、空间分辨率和可搭载传感器类型密切相关, 因而对遥感信息的获取有至关重要的影响。通常按照平台不同可以分为卫星、航空、无人机和地面。卫星平台一般在80 km以上, 航空平台一般指80 km以下的飞机和气球, 无人机平台即无人驾驶有动力飞行器, 地面包括野外静态和车载动态测量两种。部分传感器如光谱成像仪、雷达传感器适用于多种平台; 部分传感器如电磁感应等仅适用于地面。不同平台获取数据的空间和时间分辨率、覆盖面积等差异明显。如卫星遥感有亚米级的高分辨率(Wordview-3、

Quickbird-2等)到10~100 m的中分辨率(Landsat-8等)到大于100 m的低分辨率(Terra的MODIS等), 可以满足土壤信息获取从田间小尺度、到区域甚至全球大尺度的要求。航空遥感的应用早于卫星遥感, 其空间精度一般在米级以下, 可以搭载卫星上各类传感器, 同时可以搭载LiDAR、伽马射线等无法在卫星平台上实现的传感器。无人机平台是近年来兴起的新遥感信息获取系统, 它以无人驾驶飞行器为载体, 通过搭载雷达扫描仪、光谱成像仪等获取数据。无人机遥感由于其传感器离地面更近, 因此一般能获取10 cm以下的高分辨率影像。由于土壤经常被地面植被所覆盖, 因此卫星遥感多用于大面积退化土壤、障碍性土壤或农闲裸土的直接探测, 或提供成土因素相关信息来辅助土壤制图和监测。航空遥感与无人机遥感具有飞行轨迹和时间的灵活性, 可利用轮作间隙探测土壤信息。地面的平台可以搭载各类传感器, 利用多传感器的数据融合, 来进行土壤各种属性的探测, 但是作业面积相对有限。

### 2.2 土壤特性星地探测的原理

土壤星地探测器按照原理不同可分为电与电磁型、光学与辐射型、机械式型、电化学型等种类。目前卫星和航空遥感搭载的传感器主要是基于光学与辐射型, 有可见—近红外—热红外光谱, 以及主被动雷达方式。地面传感包括这4类方式, 有地面光谱仪, 也有电磁感应的大地电导仪, 以及探地



图2 不同数据获取平台的发展

Fig.2 Development of different data acquisition platforms

雷达、土壤紧实度仪和电化学传感器(表 1)。

光学和辐射测量型传感器主要利用电磁能所表现出的特征对土壤特性进行分析。电磁波产生于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。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。这类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,可用于土壤有机质、全氮、粘土矿物、氧化铁等属性的探测。

电与电磁型传感器主要利用电流的变化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,土壤就成为电磁系统中的一部分,当地理位置发生变化的时候,由于天然物理和化学性

质在空间上的变异,反馈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、Veris3100,二者均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。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,能实现田间尺度的土壤电导率快速扫描成图。

机械式传感器主要利用压力杠杆等来估测土壤的机械阻抗,建立与土壤紧实度、土壤耐旱力、土壤水分分布等关系。这类传感器结合其他类型的

表 1 不同类型土壤传感器的测试指标和代表性传感器设备

Tab.1 Working ranges and representative instruments of different types of soil sensors

| 传感器类型  | 测量指标                             | 平台       | 传感器设备                           |
|--------|----------------------------------|----------|---------------------------------|
| 光学与辐射型 | 质地、有机质、CEC、pH,水分、盐分、温度、土壤粗糙度、矿物等 | 卫星、航空、近地 | 光学遥感、微波遥感<br>地面光谱仪、探地雷达、激光诱导光谱等 |
| 电与电磁型  | 质地、有机质、盐分、水分等                    | 近地       | 大地电导率仪、Veris3100、时域反射仪、频谱反射仪    |
| 机械式型   | 紧实度、耐旱力、水分等                      | 近地       | 指针式土壤紧实度仪                       |
| 电化学型   | pH、硝酸盐、营养元素等                     | 近地       | pH计、离子敏感晶体管传感器                  |



传感器可进行土壤属性的测量和数字制图。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,用于土壤pH值、硝酸盐、钾离子等测定。但是目前这类设备的野外快速探测方面还不够成熟。

### 3 土壤光谱近地探测技术

#### 3.1 土壤光谱特征与处理方法

土壤光谱中包含了大量的分子及化学组分信息,土壤组分不同,各组分的跃迁能级差不同,使土壤吸收光谱曲线存在不同的吸收特征波段,以此来定量分析土壤组分含量。红外光谱主要是基于分子振动的倍频或合频吸收,包括C-H, N-H, O-H等相对轻原子基团,有机物质中的C-O, C-N, N-O, C-C“重”原子基团,以及矿物中的Al-O, Fe-O, Si-O基团。相对轻原子基团的合频和倍频振动主要发生在NIR(700 nm–2500 nm),而“重”原子基团主要位于MIR波段(2500 nm–25000 nm),可见光波段主要是产生电子吸收光谱(400 nm–700 nm) (Kuang et al, 2012; Nocita et al, 2015; Xu et al, 2018)。

目前,土壤光谱探测技术主要开展数据预处理与预测模型的研究。数据预处理主要是针对野外土壤光谱受到各种环境因素以及土壤本身的差异(土壤水分含量、土壤颗粒大小等)的影响,目前国际上主要提出以下3类方法:一是利用室内外干湿样光谱对比,采用外部参数正交化法(External Parameter Orthogonalization, EPO)、直接标准化法(Direct Standardization, DS)、分段直接标准化法(Piecewise Direct Standardization, PDS)等方法直接进行光谱曲线的转换((Minasny et al, 2011; Ji et al, 2015; Liu, Pan, Wang, et al, 2015; Wang et al, 2016);二是采用“Spiking”,从预测样本中挑选有代表性的子集并入建模样本,从而提高模型对预测样本的预测精度(Guerrero et al, 2010);三是通过导数等预处理来提高野外光谱预测精度(Wu et al, 2009)。

土壤光谱预测模型方法主要包括各类线性模型,如多元线性回归、主成分回归、偏最小二乘回归、回归树等(Chang et al, 2001; 史舟, 王乾龙, 等, 2014)以及非线性模型,如支持向量机、Cubist、随机森林、人工神经网络、局部加权回归等方法(Viscarra Rossel et al, 2010; 纪文君等, 2012; 陈颂超等,

2015)。

#### 3.2 土壤光谱库建设

由于不同区域土壤类型多样,成土因素复杂,造成不同类型土壤的波谱特性和预测模型的差异很大,因此国际上致力于国家尺度乃至全球尺度对不同类型土壤进行大样品的测试分析,建立相应的波谱数据库,来全面评价土壤电磁波谱特性和预测能力。

全球尺度的土壤光谱库建设始于2006年,由美国国家土壤调查中心Brown牵头收集全球的土壤样本,共4184土壤样品(Brown et al, 2006)。2008年开始,由澳大利亚联邦科学与工业研究组织的Viscarra Rossel组织35个大学和研究所收集了7大洲23631个土壤样本(Viscarra Rossel et al, 2016)。

此外,在洲和国家尺度上也建有相应的土壤光谱库。如欧洲土壤光谱库(LUCAS)包括了覆盖了整个欧洲的20000个土壤样本(Stevens et al, 2013)。美国采集了32084个土壤剖面共144833条光谱数据(USDA, 2013),澳大利亚收集了4000个土壤剖面共21500条光谱数据(Viscarra Rossel et al, 2012)。此外,如法国(Gog  t et al, 2012)、丹麦(Knadel et al, 2012)、巴西(Terra et al, 2015)、中国(史舟等, 2014)也都建立了土壤光谱库。

#### 3.3 土壤光谱近地探测

自20世纪60年代起,研究者对土壤室内vis-NIR光谱做了大量研究,成功预测了有机碳、有机质、全氮含量,机械组成(粘土含量、砂粒含量、粉砂粒含量)、pH值、电导率、CEC等土壤属性状况(Chang et al, 2001; Viscarra Rossel et al, 2006; Stenberg et al, 2010; 史舟, 王乾龙, 等, 2014)。

近20年来,国内外对野外土壤光谱的研究也逐渐增多,包括静态的野外原位光谱测量(“In Situ”)和动态实时测量(“On-The-Go”)。野外光谱的前期研究主要应用于土壤属性的快速预测(Shonk et al, 1991; Mouazen et al, 2005; Stevens et al, 2008)。随着土壤信息快速获取和数字化制图技术的发展,利用“On-The-Go”技术,结合野外原位测量光谱和其他传感器进行空间变异制图的研究越来越广泛。Christy(2008)设计了一款基于vis-NIR的移动式设备用来获取土壤信息并制图,其后被用于商业化发展;Mu  oz等(2011)利用基于vis-NIR的移动平台结合地形因子与航片数据进行了土壤碳制图。同时,野外光谱用于土壤剖面属性预测的研究增多,如Li

S等(2015)发明了野外测试土柱高光谱的装置,进行剖面土壤有机碳含量预测并取得了较好的结果。近年来,研究与开发各类土壤信息多源获取集成平台成为热点。如澳大利亚CSIRO研发的利用EM、vis-NIR、 $\gamma$ 射线等多传感联合装置用于测试农田土壤有机碳含量(Viscarra Rossel et al, 2017);美国Veris公司开发集成的pH电化学测试仪、vis-NIR和EC传感器于一体的商业化MSPS、P4000平台等。此外,光谱在土壤污染检测方面也有一定的应用(Horta et al, 2015),Shi T C等(2014)通过植被光谱对土壤中的砷含量进行了预测;Chakraborty等(2015)利用vis-NIR光谱结合XRF对土壤石油污染进行了预测,证明加入vis-NIR光谱能提高石油污染的预测效果。

## 4 土壤光学遥感探测

自19世纪20年代开始,航空相片用于土壤调查(Bushnell, 1929)。当时的航空作为传统人工绘制地图的一种数据源,统计和数学方法并未用于联系遥感数据和土壤的关系。遥感数据既可直接探测农闲裸土或退化土壤的信息,同时也可作为辅助数据通过建立土壤—景观模型进行土壤信息的预测。Kristof等(1973)首次将统计推断应用于土壤属性与光谱关系的表征。Moore等(1993)在空间上首次将一系列基于遥感的地形数据用于土壤厚度等属性制图,此后,遥感数据被广泛应用于土壤类型制图与土壤属性预测。

(1) 土壤类型遥感制图。土壤类型综合了土壤的发育及自身特性。遥感信息无法提供复杂的土壤发生信息,因而无法作为土壤类型分类的直接信息源。早期人工借助遥感底图进行土壤类型解译与判别,形成不同比例尺的土壤类型图(王人潮等, 1985)。遥感信息也可作为专家知识判断土壤类型的辅助数据,提供被判断土壤的植被、地形、气候等景观环境信息(Skidmore et al, 1996; 亢庆等, 2008)。而随着数字制图技术的发展,遥感数据更多地作为环境协变量,使用分类树或决策树等数据挖掘方法对区域进行土壤类型制图判断(Hahn et al, 2008; Nanni et al, 2012)。

(2) 土壤属性遥感预测。遥感信息被广泛地应用于土壤有机碳、土壤水分、土壤矿物质等关键属性的预测与制图(Grunwald et al, 2015)。部分土壤

属性,如土壤有机碳、土壤矿物、土壤质地、碳酸盐等,在可见—近红外特定波段有特征波谱,可通过获取裸土遥感数据的光谱信息直接进行反演(Mulder et al, 2011),这些研究大部分是在小尺度区域内的裸土上进行(Kruse et al, 2003; Gomez et al, 2008)。当研究扩展到区域尺度以上,简单地通过光谱信息进行反演就不能满足预测的精度要求。一是由于大范围内,非土壤光谱信息,如植被等会影响属性的预测;二是随着范围的增加,通常伴随有复杂的地形,影响光谱特征的因素增加,土壤属性与光谱不再有简单的线性关系。因而,研究者们通过建立遥感获取环境信息与土壤属性建立关系,来进行土壤属性预测。此时遥感已不是获取土壤属性的直接来源,而是为土壤—景观模型提供环境变量。如植被指数、降雨、温度等气候信息、地形等(Minasny et al, 2016)。由于土壤属性异质性的主控环境因子在田间、区域、全球尺度下都不尽相同(O'Rourke et al, 2015),而多平台的遥感信息可满足不同尺度下为土壤属性的预测提供不同比例尺的信息(Miller et al, 2015)。现在通过建立土壤—景观模型已成为土壤属性制图的主流,广泛地用于土壤有机碳等关键属性的区域、国家和全球尺度的预测(Viscarra Rossel et al, 2014; Hengl et al, 2015)。此外,近年来还探索了一些新的数据处理方法用于消除植被覆盖的影响,特别是利用残余土壤光谱(Bartholomeus et al, 2011)、盲源分离法(Ouerghemmi et al, 2011)以及非负矩阵分解法(Liu, Pan, Shi, et al, 2015)等混合光谱分解算法,分离出土壤光谱再用于土壤属性预测,提高了预测精度,这种新的技术路线将有利于开展中低植被覆盖下区域土壤属性的预测及制图。

(3) 土壤退化遥感监测。土壤退化遥感监测主要包括土壤盐碱化、土壤流失和土壤污染等。土壤盐碱化主要发生在干旱—半干旱区,与土壤水分及盐分矿物息息相关。虽然导致盐化的主要成分NaCl在vis-NIR没有光谱特征,但是在某些区域NaCl与石膏具有相关性,而石膏在1500, 1750, 1950和2340 nm具有吸收特征,因此,仍可利用vis-NIR进行土壤盐分预测(Goldshleger et al, 2010)。前人研究还提出了一系列指数,如盐渍化指数(Salinity Index)、归一化盐渍化指数(Normalized Salinity Index)、冠层响应盐渍化指数(Canopy Response Salinity Index),可从HyMap、Landsat、Hyperion等遥感数



据中提取,以表征土壤盐渍化程度(Jabbar et al, 2008; Melendez-Pastor et al, 2010; Scudiero et al, 2015)。此外,在常用的土壤侵蚀方程,修正的风蚀方程(RWEQ)和修正通用流失方程(RUSLE)中重要的因子,如植被指数、地表粗糙度、降水、地形等,也都可通过遥感数据直接或者间接获取(Zhou et al, 2015; Teng et al, 2016)。遥感在土壤污染监测方面的应用研究相对较少。部分学者试图通过建立遥感光谱信息与土壤重金属含量的联系来进行土壤污染研究(Wu et al, 2005; Zhao et al, 2010),目前仅在工矿区重度污染场地的监测有初步的应用。

## 5 土壤微波探测技术

### 5.1 土壤微波遥感

微波遥感的理论基础是土壤介电特性与土壤水分密切相关,因而微波遥感主要应用于土壤水分监测及与水分相关的土壤盐分和干旱度的监测。微波遥感分为主动获取与被动获取2种方式。被动微波遥感主要特性是不受云层、天气和日照条件的限制,对土壤水分响应高,但空间分辨率低(Moran et al, 2004)。主动微波遥感有更高的空间分辨率,但其反射信息对地表起伏和植被响应敏感,反演土壤水分时需考虑更多的地表信息(Petropoulos et al, 2015)。因此多种土壤水分模型应运而生,如土壤水分反演模型(考虑土壤粗糙度)包括半经验模型(Wang et al, 1981; Oh et al, 1992)、理论模型(Fung et al, 1992; Chen et al, 2003)和参数化模型(Shi et al, 1997, 2005; Zhao et al, 2015)。

被动微波遥感在水分反演上比主动微波遥感更具优势(Petropoulos et al, 2015)。自1978年开始,一些被动遥感的卫星已经发射并应用于监测土壤水分。其中主要的卫星微波遥感土壤水分产品有2006年发射的ASCAT(Advanced Scatterometer)、2002年发射的AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS)、2009年发射的SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity)以及2015年发射的SMAP(Soil Moisture Active Passive)。其中,SMOS和SMAP传感器采用对植被覆盖穿透性更强的L波段,对地面水分的反演精度更高。SMOS采用被动微波传感器,其空间分辨率在35 km; SMAP同时包括主动和被动微波,空间分辨率在3 km-40 km之间(Petropoulos et al, 2015)。这两个数

据产品由于全球尺度的要求及微波遥感自身特点,空间分辨率低。为获取更高质量的土壤水分数据,很多研究聚焦于数据融合,包括主动遥感与被动遥感的融合(Shi J C, et al, 2014)、微波遥感与光谱遥感的结合(Piles et al, 2014; Colliander et al, 2017)。多数据的融合既提高了土壤水分反演的精度,也提高了土壤水分数据的空间分辨率以满足不同尺度研究的需求。主被动遥感的融合优势可在统一平台装载2个传感器获取相同时相的主被动遥感数据,从而提高土壤水分反演的精度及空间分辨率。光谱遥感的优势是可提供更多的数据选择,如地表温度、植被类型及更高的空间分辨率(Petropoulos et al, 2015)。

通过微波遥感获取的介电常数受水分的影响最大,相对而言,通过微波遥感进行土壤盐渍化的研究较少。然而实验证实虽然介电常数的虚部与土壤含盐量无显著的相关性,但是虚部与土壤的盐分含量相关;当含水量一定的时候,盐度的增加会使得介电常数变大,且与土壤碱化无关(Jackson et al, 1987; 邵芸等, 2002)。根据这一特性,微波遥感在土壤盐渍化的应用中主要包括盐渍化土壤的识别与分类(Metternicht, 1998; Li et al, 2014),以及土壤盐分含量的制图研究(Bell et al, 2001; Shrestha, 2006)。

### 5.2 土壤地面探地雷达

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是以探索地下不同介质的电磁性质(介电常数、电导率、磁导率)的差异为物理前提的一种射频(0.10 GHz-3 GHz)电磁技术,浅表地球物理科学技术中的一项重要手段,在工程检测、环境保护、资源勘探、水文水利等科学技术领域中发挥着其他手段无法取代的重要作用。Huisman等(2003)综述了利用GPR检测土壤水分的四种方法。Minet等(2012)利用GPR进行了田间尺度土壤水分制图分析;Tran等(2015)利用探地雷达与频域反射数据联合分析方法对坡面土壤水分高分辨率时空特征进行了定量研究。刘恒柏等(2008)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;崔凡等(2014)利用探地雷达对砂壤进行探测并建立了砂壤物理模型,实现了砂壤含水率和紧实度的准确、连续观测。王瑞燕等(2017)探讨分析了利用低频探地雷达技术探测土壤累积入渗量的方法,并得出使用低频探地雷达可实现对土壤累积入渗量的准确探

测。胡振琪等利用探地雷达对复垦土壤的分层结构进行了探测(胡振琪等, 2005; 刘宁等, 2016)。此外, 也有学者利用探地雷达回波信号进行土壤污染物含量检测(侯晓冬等, 2008), 但目前这方面研究还比较少。

## 6 电磁感应与其他技术

电磁感应技术(EMI)主要用于土壤水分、盐分及黏粒等的监测, 特别是在土壤盐分快速监测方面有独特优势(Doolittle et al, 2014; Shanahan et al, 2015; Li et al, 2013; Li H Y, 2015)。早期研究主要是对土壤水分及盐分的二维分析及制图, 如Martínez等(2010)利用EMI进行了田间尺度水分含量制图分析。但单纯监测土壤表层盐分很难满足盐碱地改良和利用的要求, 要达到排盐、减盐的目的, 必须掌握土壤整个剖面的盐分含量情况。李洪义等(2010)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正则化预测了土壤剖面电导率, 首次实现了土壤盐分的三维制图分析; Huang等(2015)利用EM38对坡面土壤盐分进行了不同深度的制图分析。

X射线荧光光谱分析仪(XRF)和激光等离子体光谱分析仪(LIBS), 主要应用于土壤重金属含量的测量(Scheinost et al, 2002; El Haddad et al, 2013; Hu et al, 2017)。O'Rourke等(2016)基于vis-NIR, mid-IR以及XRF利用模型平均的方法对土壤多种元素进行了分析研究。Kim等(2014)利用LIBS对不同类型土壤Zn污染进行插值分析。冉景(2014)对比研究了PXRF与原子吸收荧光法(AAS)来测定土壤重金属的含量, 表明XRF适用于土壤重金属含量的快速测量与评价; 余克强等(2017)利用LIBS对土壤中的Al, Fe, Mg等多种元素进行了分析。

除上述探测技术外, 机械式传感器也广泛应用于土壤信息获取, 主要是结合其它传感器进行土壤属性测量及数字制图等(Grunwald et al, 2001; Quraishi et al, 2013)。

## 7 土壤信息获取与土壤地理学应用

地理学综合研究是对地球表层系统(水圈、土壤圈、大气圈、生物圈)的相互作用以及人地关系的

研究(傅伯杰, 2014)。其中, 土壤圈作为地球表面最重要的圈层系统, 是水圈、大气圈和生物圈共同作用的产物, 并且维系着全球地表生物圈的存在。土壤地理学旨在理解与回答诸如“土壤是什么”, “为什么是这样”, 以及“如何演变成这样等问题”, 即研究土壤形态特征、物理化学性质、土壤的形成机理和演变过程、未来土壤变化预测、土壤系统分类、土壤景观信息等(张甘霖等, 2008)。

(1) 土壤信息与土壤空间表征土壤的形成演变形式繁多, 演变过程与成土过程的发展及环境因素的变化(如气候和地形等)密切相关。研究土壤属性特征和时空演变信息, 能为合理规划和配置利用土壤资源提供基础信息, 并作为评价土壤圈与地表陆地系统之间的耦合关系提供最直接的依据。土壤信息能针对土壤地理格局进行大小、形状、数量、类型和空间组合上的描述, 并且能反映出土壤地理格局的空间结构特征、地带性和非地带性规律, 以及监测目标的尺度效应(O'Rourke et al, 2015; Zhou et al, 2016)。

(2) 土壤信息与土壤过程演变。土壤信息获取技术能发现和揭示土壤地理现象与过程中时空分布规律和变异性特征。此外, 土壤信息获取技术能发现时空尺度上土壤景观及其相关驱动因子的演变规律。通过土壤信息获取技术, 能对土壤元素运移、水分迁移、土壤退化、土壤与人类相互作用等等土壤地理过程进行监测和表达。并且通过土壤景观格局的动态变化和空间异质性, 揭示土壤地理单元的时空关系及相应的演变过程。土壤信息获取技术能对由侵蚀过程引起的土壤碳迁移进行模拟(Chappell et al, 2016; Teng et al, 2016), 还能通过对地表反射率或土壤水分变化过程的监测, 对土壤机械组成进行反演分析(Liu et al, 2012; Zeng et al, 2017)。

(3) 土壤信息与地理模拟模型。在复杂多参数的全球生物地球化学模型中, 土壤信息获取技术能为土壤的物理、化学、生物和矿物学过程提供相应的微观、动态、综合、定量的指标, 从而参与到生物地球化学模型当中。尤其是在刻画与勾勒C、N、P、S等与生命过程和全球变化密切相关的元素循环中, 土壤信息获取技术发挥了重要的作用, 得到了地理学界的广泛应用(Goglio et al, 2014; Ito et al, 2017)。

(4) 土壤信息与数字土壤制图。土壤制图是土



壤地理的主要内容之一,传统的土壤制图主要是进行土壤理化性质、肥力、类型等属性的地理空间分布表达。其成果主要表现为以多边形为基础的矢量表达形式,并服务于地球表层系统研究的各个环节。随着多源、多平台传感器的发展以及土壤地理信息的不断进步,数字土壤制图结合数据挖掘技术对大范围区域乃至洲际、全球尺度的土壤相关属性,及其在生物、气候、地形、母质等综合作用下的时空分布特征和推演过程进行模拟(Mulder et al, 2011; 周银等, 2015)。

## 8 土壤星地传感发展趋势

土壤遥感与近地传感技术具有快速、实时、有效获取土壤属性信息,揭示土壤地理类型的复杂性、空间分布规律和非规律性、时空异质性等特点,已广泛应用于各尺度范围的土壤制图、水土过程模拟、地球生物化学模型中,成为土壤地理学研究中非常重要的一种信息获取手段。综合国家战略和土壤地理学发展规划,土壤遥感与近地传感技术的未来发展趋势可归为以下4点:

(1) 发展土壤新型传感器综合平台,拓展土壤特性及其变化过程的长期动态监测。加强各类土壤光谱传感器向轻型化、便携式、高可靠性和商业化发展,拓展 LIBS、电化学传感器走向野外。加强多卫星联网、多无人机协同监测和地面车载多传感集成平台的研发,实现对土壤关键属性及相关环境参数的长期全方位自动采集。搭建远程控制无线传感器及其节点和基站等立体综合监测设备,构建土壤—环境物联网监测体系。推进成果在耕地地力调查与监测、农田测土配方施肥、土壤环境监测网络、土壤碳库估算、典型生态脆弱区土壤退化的监测等方面的应用。

(2) 发展基于多源传感信息的土壤-景观知识模型,开展土壤数字综合制图研究。发挥土壤遥感和近地传感技术的优势,在传统土壤—景观知识框架下,利用土壤形成及演化相关地学背景信息,引入机器学习、人工智能等数据挖掘新技术,发展高精度数字制图模型,进行土壤类型和关键属性的快速更新制图,同时提供更多有关土壤质量、土壤功能等衍生数据产品,提高数字土壤地图产品的现势性、多样性和功能性。此外,发展虚拟现实建模技术,揭示三维乃至四维尺度上土壤属性的特征信

息。促进中国土壤数字制图与全球土壤图协调发展,共同解决全球性问题,发挥土壤数字综合制图在土壤功能分析、土地管理、农田综合防治、粮食丰产增效等方面的作用。

(3) 发展全球尺度的地球观测系统,实现土壤圈与其他陆表圈层的联合观测与综合分析。基于主、被动遥感技术,发展全球尺度的土壤水分、地表温、粗糙度等信息的快速提取技术体系,实现与植被、水文、大气圈层的联合观测。并发展基于多传感技术的高分辨率地球系统模式,构建土壤关键属性信息与地球系统模式之间的多尺度、多物理耦合的协调同化方法,综合分析各圈层之间的相互作用关系及耦合循环的动力学过程,完善关键带(Critical Zone)观测体系,预测未来气候变化对土壤碳源汇强度及其它土壤环境关键属性的影响,为长期的全球变化影响与风险评估服务。

(4) 发展共建共享的土壤大数据平台,推进土壤信息化工程建设。基于现代数字地球建设框架,完善现有土壤遥感、近地传感和地面监测等途径,加强土壤重要参数的综合观测,发展土壤多源数据获取及同化核心技术,建成面向全国乃至全球的土壤大数据平台。加强数据标准体系建设,形成土壤大数据集成分析技术体系和关键属性共享数据集,提供土壤关键属性数据共建共享、在线分析和个性化以及可视化服务。推进土壤信息在粮食安全决策、生态环境保护及风险评估、全球变化和灾害应对、以及文化—自然遗产保护与发展等领域的应用,实现土壤信息化工程建设。

## 参考文献(References)

- 陈颂超, 冯来磊, 李硕, 等. 2015. 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演[J]. 土壤学报, 52(2): 312-320. [Chen S C, Feng L L, Li S, et al. 2015. Vis-NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression[J]. Acta Pedologica Sinica, 52(2): 312-320.]
- 崔凡, 刘杰, 吴志远, 等. 2014. 探地雷达功率谱模型在砂壤含水率和紧实度探测中的应用[J]. 农业工程学报, 30(16): 99-105. [Cui F, Liu J, Wu Z Y, et al. 2014. Application of ground penetrating radar power spectrum model in detection of water content and degrees of compactness in sandy loam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(16): 99-105.]
- 傅伯杰. 2014. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程



- 耦合[J]. 地理学报, 69(8): 1052-1059. [Fu B J. 2014. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(8): 1052-1059.]
- 侯晓冬, 郭秀军, 贾永刚, 等. 2008. 基于探地雷达回波信号获取污染土壤中污染物含量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 23(3): 962-968. [Hou X D, Guo X J, Jia Y G, et al. 2008. Progress on detection of contamination content in the contaminated soil based on ground penetrating radar[J]. *Progress in Geophysics*, 23(3): 962-968.]
- 胡振琪, 陈宝政, 陈星彤. 2005. 应用探地雷达检测复垦土壤的分层结构[J]. 中国矿业, 14(3): 73-75. [Hu Z Q, Chen B Z, Chen X T. 2005. Study on layer structure of rehabilitated soil using ground-penetrating radar[J]. *China Mining Magazine*, 14(3): 73-75.]
- 纪文君, 李曦, 李成学, 等. 2012. 基于全谱数据挖掘技术的土壤有机质高光谱预测建模研究[J]. 光谱学与光谱分析, 32(9): 2393-2398, 2408. [Ji W J, Li X, Li C X, et al. 2012. Using different data mining algorithms to predict soil organic matter based on visible-near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(9): 2393-2398, 2408.]
- 亢庆, 张增祥, 赵晓丽. 2008. 基于遥感技术的干旱区土壤分类研究[J]. 遥感学报, 12(1): 159-167. [Kang Q, Zhang Z X, Zhao X L. 2008. A study of soil classification based on remote sensing in arid area[J]. *Journal of Remote Sensing*, 12(1): 159-167.]
- 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 2010. 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[J]. 土壤学报, 47(2): 359-363. [Li H Y, Shi Z, Tang H L. 2010. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary kriging method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 47(2): 359-363.]
- 刘恒柏, 张佳宝, 朱安宁. 2008. 砂壤土中目标物的GPR图像解译及土壤含水量反演[J]. 灌溉排水学报, 27(4): 55-57. [Liu H B, Zhang J B, Zhu A N. 2008. Ground penetrating radar imagery interpretation of target in sand loamy soil and soil water content inversion[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 27(4): 55-57.]
- 刘宁, 李新举, 郭斌, 等. 2016. 基于修正介电常数模型的煤矿区复垦土壤压实评价[J]. 水土保持学报, 30(4): 318-322. [Liu N, Li X J, Guo B, et al. 2016. Compaction evaluation of reclamation soil in coal mining district based on modified dielectric constant model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30(4): 318-322.]
- 冉景, 王德建, 王灿, 等. 2014. 便携式X射线荧光光谱法与原子吸收/原子荧光法测定土壤重金属的对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 34(11): 3113-3118. [Ran J, Wang D J, Wang C, et al. 2014. Comparison of soil heavy metals determined by AAS/AFS and portable X-ray fluorescence analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(11): 3113-3118.]
- 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 2002. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感学报, 6(6): 416-423. [Shao Y, Lu Y, Dong Q, et al. 2002. Study on soil microwave dielectric characteristic as salinity and water content[J]. *Journal of Remote Sensing*, 6(6): 416-423.]
- 史舟, 等. 2014. 土壤地面高光谱遥感原理与方法[M]. 北京: 科学出版社. [Shi Z, et al. 2014b. *Turang dimian gao-guangpu yaogan yuanli yu fangfa*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 史舟, 王乾龙, 彭杰, 等. 2014. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. 中国科学: 地球科学, 44(5): 978-988. [Shi Z, Wang Q L, Peng J, et al. 2014a. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(7): 1671-1680.]
- 王人潮, 王深法, 苏海萍. 1985. MSS卫片目视土壤解译与制图技术研究[J]. 科技通报, 1(1): 39-41. [Wang R C, Wang S F, Su H P. 1985. MSS weipian mushi turang jieyi yu zhi-tu jishu[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1(1): 39-41.]
- 王瑞燕, 尹涛, 胡盈盈, 等. 2017. 基于低频探地雷达的土壤累积入渗量的探测方法研究[J]. 土壤学报, 54(4): 885-893. [Wang R Y, Yin T, Hu Y Y, et al. 2017. Method for measurement of soil cumulative infiltration based on low frequency GPR[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 54(4): 885-893.]
- 余克强, 赵艳茹, 刘飞, 等. 2017. 应用激光诱导击穿光谱对土壤中多元素同时定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 37(9): 2879-2884. [Yu K Q, Zhao Y R, Liu F, et al. 2017. Laser-induced breakdown spectroscopy for simultaneous quantitative analysis of multi-elements in soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(9): 2879-2884.]
- 张甘霖, 史学正, 龚子同. 2008. 中国土壤地理学发展的回顾与展望[J]. 土壤学报, 45(5): 792-801. [Zhang G L, Shi X Z, Gong Z T. 2008. Retrospect and prospect of soil geography in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(5): 792-801.]
- 周银, 刘丽雅, 卢艳丽, 等. 2015. 星地多源数据的区域土壤有机质数字制图[J]. 遥感学报, 19(6): 998-1006. [Zhou Y, Liu L Y, Lu Y L, et al. 2015. Regional scale mapping of soil organic matter using remote sensing and visible-near

- infrared spectroscopy[J]. *Journal of Remote Sensing*, 19 (6): 998-1006.]
- Bartholomeus H, Kooistra L, Stevens A, et al. 2011. Soil organic carbon mapping of partially vegetated agricultural fields with imaging spectroscopy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 81-88.
- Bell D, Menges C, Ahmad W, et al. 2001. The application of dielectric retrieval algorithms for mapping soil salinity in a tropical coastal environment using airborne polarimetric SAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 75(3): 375-384.
- Bowers S A, Hanks, R J. 1965. Reflection of radiant energy from soils[J]. *Soil Science*, 100(2): 130-138.
- Brown D J, Shepherd K D, Walsh M G, et al. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geoderma*, 132(3-4): 273-290.
- Bushnell T M. 1929. Aerial photography and soil survey[J]. *Soil Science Society of America Journal*, (2001): 23-28.
- Chakraborty S, Weindorf D C, Li B, et al. 2015. Development of a hybrid proximal sensing method for rapid identification of petroleum contaminated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 514: 399-408.
- Chang C W, Laird D A, Mausbach M J, et al. 2001. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2): 480-490.
- Chappell A, Baldock J, Sanderman J. 2016. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes[J]. *Nature Climate Change*, 6: 187-191.
- Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. 2003. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(1): 90-101.
- Christy C D. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1): 10-19.
- Ciucci A, Palleschi V, Rastelli S, et al. 1996. Trace pollutants analysis in soil by a time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy technique[J]. *Applied Physics B*, 63 (2): 185-190.
- Colliander A, Fisher J B, Halverson G, et al. 2017. Spatial downscaling of SMAP soil moisture using MODIS land surface temperature and NDVI during SMAPVEX15[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(11): 2107-2111.
- De Jong E, Ballantyne A K, Cameron D R, et al. 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 43(4): 810-812.
- Doolittle J A, Brevik E C. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. *Geoderma*, 223-225: 33-45.
- El Haddad J, Villot-Kadri M, Ismaël A, et al. 2013. Artificial neural network for on-site quantitative analysis of soils using laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 79-80: 51-57.
- Fung A K, Li Z, Chen K S. 1992. Backscattering from a randomly rough dielectric surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 356-369.
- Gogé F, Joffre R, Jolivet C, et al. 2012. Optimization criteria in sample selection step of local regression for quantitative analysis of large soil NIRS database[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 110(1): 168-176.
- Goglio P, Grant B B, Smith W N, et al. 2014. Impact of management strategies on the global warming potential at the cropping system level[J]. *Science of the Total Environment*, 490: 921-933.
- Goldshleger N, Ben-Dor E, Lugassi R, et al. 2010. Soil degradation monitoring by remote sensing: Examples with three degradation processes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 74(5): 1433-1445.
- Gomez C, Viscarra Rossel R A, McBratney A B. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study [J]. *Geoderma*, 146(3-4): 403-411.
- Grunwald S, McSweeney K, Rooney D J, et al. 2001. Soil layer models created with profile cone penetrometer data[J]. *Geoderma*, 103(1-2): 181-201.
- Grunwald S, Vasques G M, Rivero R G. 2015. Fusion of soil and remote sensing data to model soil properties[J]. *Advances in Agronomy*, 131: 1-109.
- Guerrero C, Zornoza R, Gómez I, et al. 2010. Spiking of NIR regional models using samples from target sites: Effect of model size on prediction accuracy[J]. *Geoderma*, 158(1-2): 66-77.
- Hahn C, Gloaguen R. 2008. Estimation of soil types by non linear analysis of remote sensing data[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15(1): 115-126.
- Hengl T, Heuvelink G B M, Kempen B, et al. 2015. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions[J]. *PLoS*

- One, 10(6): e0125814.
- Horta A, Malone B, Stockmann U, et al. 2015. Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review[J]. *Geoderma*, 241-242: 180-209.
- Hu B F, Chen S C, Hu J, et al. 2017. Application of portable XRF and VNIR sensors for rapid assessment of soil heavy metal pollution[J]. *PLoS One*, 12(2): e0172438.
- Huang J, Taghizadeh- Mehrjardi R, Minasny B, et al. 2015. Modeling soil salinity along a hillslope in Iran by inversion of EM38 data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4): 1142-1153.
- Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. 2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2(4): 476-491.
- Ito A, Wagai R. 2017. Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies[J]. *Scientific Data*, 4: 170103.
- Jabbar M, Chen X L. 2008. Land degradation due to salinization in arid and semi-arid regions with the aid of geo-information techniques[J]. *Geo-spatial Information Science*, 11(2): 112-120.
- Jackson T J, O'Neill P E. 1987. Salinity effects on the microwave emission of soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(2): 214-220.
- Ji W, Viscarra Rossel R A, Shi Z. 2015. Accounting for the effects of water and the environment on proximally sensed vis- NIR soil spectra and their calibrations[J]. *European Journal of Soil Science*, 66(3): 555-565.
- Keen B A, Haines W B. 1925. Studies in soil cultivation. I. The evolution of a reliable dynamometer technique for use in soil cultivation experiments[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 15(3): 375-386.
- Kim K R, Kim G, Kim J Y, et al. 2014. Kriging interpolation method for laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) analysis of Zn in various soils[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(1): 76-84.
- Knadel M, Deng F, Thomsen A, et al. 2012. Development of a Danish national Vis-NIR soil spectral library for soil organic carbon determination[C]//Digital soil assessments and beyond: Proceedings of the 5th global workshop on digital soil mapping. Sydney, Australia: CRC Press: 403-408.
- Kristof S J, Baumgardner M F, Johannsen C J. 1973. Spectral mapping of soil organic matter[R]. LARS Technical Reports. Purdue, IN: Laboratory for Applications of Remote Sensing: 26.
- Kruse F A, Boardman J W, Huntington J F. 2003. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1388-1400.
- Kuang B, Mahmood H S, Quraishi M Z, et al. 2012. Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: A Review [J]. *Advances in Agronomy*, 114: 155-223.
- Li H Y, Shi Z, Webster R, et al. 2013. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil[J]. *Geoderma*, 195-196: 31-41.
- Li H Y, Webster R, Shi Z. 2015b. Mapping soil salinity in the Yangtze delta: REML and universal kriging (E-BLUP) revisited[J]. *Geoderma*, 237-238: 71-77.
- Li S, Shi Z, Chen S C, et al. 2015a. In situ measurements of organic carbon in soil profiles using vis- NIR spectroscopy on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Science & Technology*, 49(8): 4980-4987.
- Li Y Y, Zhao K, Zheng X M, et al. 2014. Identification of saline-alkali soil based on target decomposition of full-polarization radar data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 083511.
- Liu F, Geng X Y, Zhu A X, et al. 2012. Soil texture mapping over low relief areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS[J]. *Geoderma*, 171- 172: 44-52.
- Liu Y, Pan X Z, Shi R J, et al. 2015. Predicting soil salt content over partially vegetated surfaces using non-negative matrix factorization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(11): 5305-5316.
- Liu Y, Pan X Z, Wang C K, et al. 2015. Predicting soil salinity with Vis - NIR spectra after removing the effects of soil moisture using external parameter orthogonalization[J]. *PLoS One*, 10(10): e0140688.
- Macdonald H C, Waite W P. 1971. Soil moisture detection with imaging radars[J]. *Water Resources Research*, 7(1): 100-110.
- Martínez G, Vanderlinden K, Giráldez J V, et al. 2010. Field-scale soil moisture pattern mapping using electromagnetic induction[J]. *Vadose Zone Journal*, 9(4): 871-881.
- Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Koch M, et al. 2010. Applying imaging spectroscopy techniques to map saline soils with ASTER images[J]. *Geoderma*, 158(1-2): 55-65.
- Metternicht G I. 1998. Fuzzy classification of JERS-1 SAR data: An evaluation of its performance for soil salinity mapping[J]. *Ecological Modelling*, 111(1): 61-74.



- Miller B A, Koszinski S, Wehrhan M, et al. 2015. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties [J]. *Geoderma*, 239-240: 97-106.
- Minasny B, McBratney A B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons[J]. *Geoderma*, 264: 301-311.
- Minasny B, McBratney A B, Bellon-Maurel V, et al. 2011. Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 167-168: 118-124.
- Minet J, Bogaert P, Vanclooster M, et al. 2012. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping[J]. *Journal of Hydrology*, 424-425: 112-123.
- Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, et al. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2): 443-452.
- Moran M S, Peters-Lidard C D, Watts J M, et al. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5): 805-826.
- Mouazen A M, De Baerdemaeker J, Ramon H. 2005. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer[J]. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2): 171-183.
- Mulder V L, De Bruin S, Schaepman M E, et al. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review[J]. *Geoderma*, 162(1-2): 1-19.
- Muñoz J D, Kravchenko A. 2011. Soil carbon mapping using on-the-go near infrared spectroscopy, topography and aerial photographs[J]. *Geoderma*, 166(1): 102-110.
- Nanni M R, Dematte J A M, Chicati M L, et al. 2012. Soil surface spectral data from Landsat imagery for soil class discrimination[J]. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 34(1): 103-112.
- Nocita M, Stevens A, Van Wesemael B, et al. 2015. Soil Spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring[J]. *Advances in Agronomy*, 132: 139-159.
- Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. 1992. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces[J]. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 370-381.
- O'Rourke S M, Angers D A, Holden N M, et al. 2015. Soil organic carbon across scales[J]. *Global Change Biology*, 21(10): 3561-3574.
- O'Rourke S M, Stockmann U, Holden N M, et al. 2016. An assessment of model averaging to improve predictive power of portable vis-NIR and XRF for the determination of agro-nomic soil properties[J]. *Geoderma*, 279: 31-44.
- Petropoulos G P, Ireland G, Barrett B. 2015. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84: 36-56.
- Piles M, Sánchez N, Vall-llossera M, et al. 2014. A downscaling approach for SMOS land observations: Evaluation of high-resolution soil moisture maps over the Iberian Peninsula[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9): 3845-3857.
- Ouerghemmi W, Gomez C, Naceur S, et al. 2011. Applying blind source separation on hyperspectral data for clay content estimation over partially vegetated surfaces[J]. *Geoderma*, 163(3-4): 227-237.
- Quraishi M Z, Mouazen A M. 2013. Calibration of an on-line sensor for measurement of topsoil bulk density in all soil textures[J]. *Soil and Tillage Research*, 126: 219-228.
- Ristori G, Bruno V. 1969. Metallic microelements of soil determined by X-ray fluorescence[J]. *Agrochimica*, 13(4-5): 367.
- Scheinost A C, Kretzschmar R, Pfister S, et al. 2002. Combining selective sequential extractions, x-ray absorption spectroscopy, and principal component analysis for quantitative zinc speciation in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 36(23): 5021-5028.
- Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. 2015. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM + canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 169: 335-343.
- Shanahan P W, Binley A, Whalley W R, et al. 2015. The use of electromagnetic induction to monitor changes in soil moisture profiles beneath different wheat genotypes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 79(2): 459-466.
- Shi J C, Guo P, Zhao T J, et al. 2014. Soil moisture downscaling algorithm for combining radar and radiometer observations for SMAP mission[C]//Proceedings of the 31th URSI general assembly and scientific symposium (URSI GASS). Beijing, China: IEEE: 1-4.
- Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, et al. 2005. A parameterized multifrequency- polarization surface emission model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12): 2831-2841.
- Shi J C, Wang J, Hsu A Y, et al. 1997. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using

- L-band SAR image data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1254-1266.
- Shi T Z, Liu H Z, Wang J J, et al. 2014. Monitoring arsenic contamination in agricultural soils with reflectance spectroscopy of rice plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 48(11): 6264-6272.
- Shonk J L, Gaultney L D, Schulze D G, et al. 1991. Spectroscopic sensing of soil organic matter content[J]. *Transactions of the ASAE*, 34(5): 1978-1984.
- Shrestha R P. 2006. Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand[J]. *Land Degradation & Development*, 17(6): 677-689.
- Skidmore A K, Watford F, Luckananurug P, et al. 1996. An operational GIS expert system for mapping forest soils[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(5): 501-511.
- Stenberg B, Viscarra Rossel R A, Mouazen A M, et al. 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science[J]. *Advances in Agronomy*, 107: 163-215.
- Stevens A, Nocita M, Tóth G, et al. 2013. Prediction of soil organic carbon at the European scale by visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. *PLoS One*, 8(6): e66409.
- Stevens A, Van Wesemael B, Bartholomeus H, et al. 2008. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils[J]. *Geoderma*, 144(1-2): 395-404.
- Teng H F, Viscarra Rossel R A, Shi Z, et al. 2016. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia[J]. *Environmental Modelling & Software*, 77: 156-167.
- Terra F S, Demattê J A M, Viscarra Rossel R A. 2015. Spectral libraries for quantitative analyses of tropical Brazilian soils: Comparing vis-NIR and mid-IR reflectance data[J]. *Geoderma*, 255-256: 81-93.
- Tran A P, Bogaert P, Wiaux F, et al. 2015. High-resolution space-time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data[J]. *Journal of Hydrology*, 523: 252-261.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2016. Rapid Carbon Assessment (RaCA): Methodology, Sampling, and Summary[EB/OL]. [2018- 01- 16]. [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_052841.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052841.pdf).
- Viscarra Rossel R A, Behrens T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra[J]. *Geoderma*, 158(1-2): 46-54.
- Viscarra Rossel R A, Behrens T, Ben-Dor E. 2016. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. *Earth-Science Reviews*, 155: 198-230.
- Viscarra Rossel R A, Lobsey C R, Sharman C, et al. 2017. Novel proximal sensing for monitoring soil organic C stocks and condition[J]. *Environmental Science & Technology*, 51(10): 5630-5641.
- Viscarra Rossel R A, McBratney A B. 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content[J]. *Geoderma*, 85(1): 19-39.
- Viscarra Rossel R A, Walvoort D J J, McBratney A B, et al. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties[J]. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75.
- Viscarra Rossel R A, Webster R. 2012. Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database[J]. *European Journal of Soil Science*, 63(6): 848-860.
- Viscarra Rossel R A, Webster R, Bui E N, et al. 2014. Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change [J]. *Global Change Biology*, 20(9): 2953-2970.
- Wang C K, Pan X Z. 2016. Improving the prediction of soil organic matter using visible and near infrared spectroscopy of moist samples[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 24(3): 231-241.
- Wang J R, Choudhury B J. 1981. Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C6): 5277-5282.
- Wu C Y, Jacobson A R, Laba M, et al. 2009. Alleviating moisture content effects on the visible near-infrared diffuse-reflectance sensing of soils[J]. *Soil Science*, 174(8): 456-465.
- Wu Y Z, Chen J, Wu X M, et al. 2005. Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils[J]. *Applied Geochemistry*, 20(6): 1051-1059.
- Xu D Y, Ma W Z, Chen S C, et al. 2018. Assessment of important soil properties related to Chinese Soil Taxonomy based on vis - NIR reflectance spectroscopy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144: 1-8.
- Zeng C Y, Zhu A X, Liu F, et al. 2017. The impact of rainfall magnitude on the performance of digital soil mapping over

- low-relief areas using a land surface dynamic feedback method[J]. *Ecological Indicators*, 72: 297-309.
- Zhao T J, Shi J C, Bindlish R, et al. 2015. Parametric exponentially correlated surface emission model for L-band passive microwave soil moisture retrieval[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84: 65-74.
- Zhao Y C, Wang Z G, Sun W X, et al. 2010. Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban-rural transition area in Yangtze River Delta region of China[J]. *Geoderma*, 156(3-4): 216-227.
- Zhou Y, Biswas A, Ma Z Q, et al. 2016. Revealing the scale-specific controls of soil organic matter at large scale in Northeast and North China Plain[J]. *Geoderma*, 271: 71-79.
- Zhou Y, Guo B, Wang S X, et al. 2015. An estimation method of soil wind erosion in Inner Mongolia of China based on geographic information system and remote sensing[J]. *Journal of Arid Land*, 7(3): 304-317.

## Soil information acquisition based on remote sensing and proximal soil sensing: Current status and prospect

SHI Zhou<sup>1</sup>, XU Dongyun<sup>1</sup>, TENG Hongfen<sup>1</sup>, HU Yueming<sup>2</sup>, PANG Xianzhang<sup>3</sup>, ZHANG Ganlin<sup>3</sup>

(1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Natural Resources and Environment of South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Soil as an important study object of physical geography, acts as the essential link between geographical elements such as water, atmosphere, organisms, and so on. Therefore, research on accurate and efficient acquisition of soil information has great significance in the development of modern geography. In this article, the operation principles of various sensors equipped on satellite, aviation, and unmanned aerial vehicle platforms and ground devices for soil information acquisition were introduced. Then the authors summed up the findings on the methods and techniques of rapid acquisition of soil information based on remote sensing and proximal soil sensing and their applications in soil mapping and soil attribute prediction. Applications of soil information acquisition in soil geography were also explained. Finally, this article discussed the prospect of development of remote and proximal soil sensing.

**Key words:** soil information; remote sensing; proximal soil sensing; soil geography