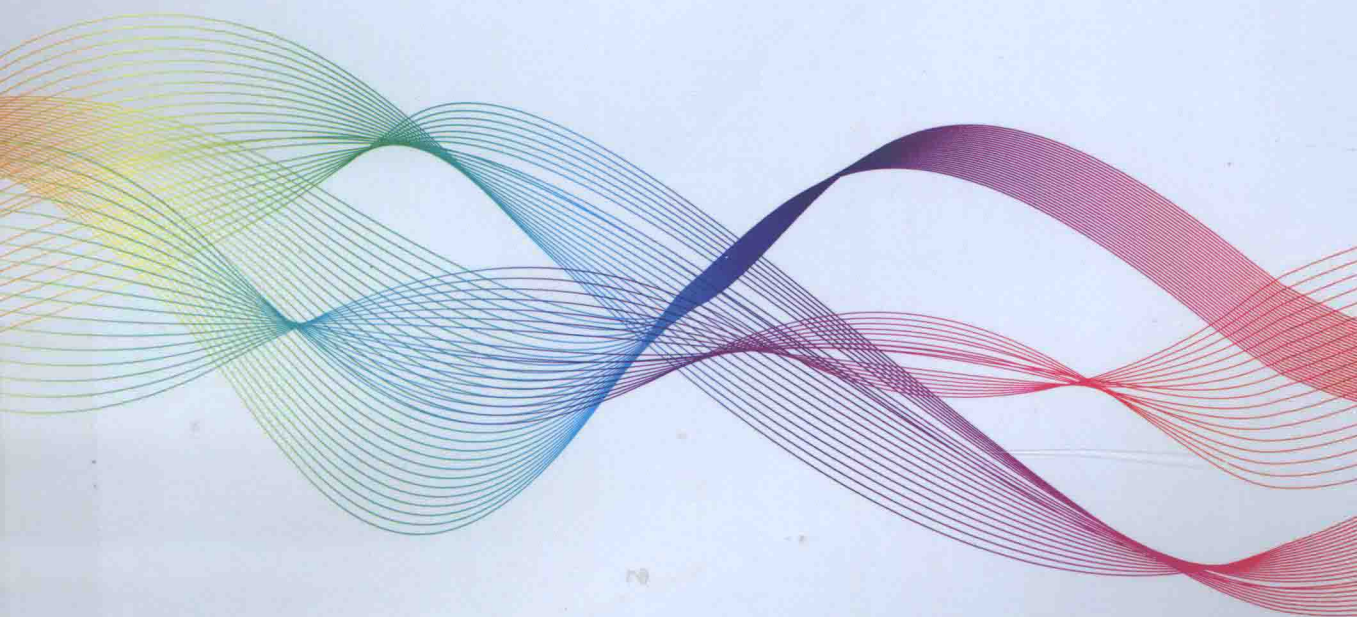



# 土壤地面高光谱遥感 原理与方法

史舟等◎著



 科学出版社

# 土壤地面高光谱遥感 原理与方法

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从土壤可见光和红外遥感高光谱的国内外研究概况与理论基础出发,分别介绍了土壤可见-红外光谱特性和辐射传输原理,以及在当前数字土壤制图、土壤近地传感等领域的应用潜力;然后以中国土壤光谱库为基础,阐述了高光谱遥感技术如何预测土壤水分、盐分、质地、有机质、碳、氮等关键属性;最后介绍了野外农田环境下土壤高光谱的特性与预测制图方法,突出了将土壤高光谱技术从室内推向野外,进一步发挥高光谱遥感技术无损、快速和在线监测的优势。本书附录包括土壤高光谱遥感主要处理软件的介绍,为读者着手开展同类研究提供相关信息。

本书可供从事土壤、遥感、水土保持与数字农业等专业的科技工作者阅读使用,也可供高等院校土壤学、高光谱遥感、数字农业等专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土壤地面高光谱遥感原理与方法/史舟等著.—北京:科学出版社,2014.5

ISBN 978-7-03-040474-9

I. ①土… II. ①史… III. ①光谱分辨率-光学遥感-应用-土壤学  
IV. ①S15 ②TP722

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 080280 号

责任编辑:彭胜潮 孙增英 / 责任校对:张凤琴

责任印制:赵德静 / 封面设计:铭轩堂

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 5 月第一次印刷 印张:16 1/4 插页:1

字数:369 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

19世纪中叶创建了“土壤学”以来，由于受到研究土壤技术手段的限制，土壤学一直处在定性描述研究阶段。自从美国创建的土壤系统分类以后，土壤学开始从定性描述研究向着定量数字化研究发展。但是，由于土壤处在地球表层的岩石圈、大气圈和生物圈的接触面上，并在多种自然因素和人为因素的综合作用下，是不断演变的自然客体，是一个覆盖在地球表层的多界面的开放系统，因此，土壤形态、分布、性质和演变过程都是很复杂的，运用常规技术进行定量数字化研究是不可能的，其中特别是土壤制图的科学性和应用性受到质疑，严重影响着土壤图在生产中的应用。这是一个在国际上没有克服的技术难题。20世纪中期，以遥感技术、地理信息系统技术、全球定位系统技术和模拟模型技术为核心的信息技术蓬勃发展，随之在土壤学中得到应用和发展。到20世纪后期，土壤科学出现了数字化土壤制图、计量土壤学和土壤近地传感等三个研究热点。土壤学进入定量的数字化土壤研究阶段。

本人从事土壤地理和土地资源、土壤和作物营养诊断、农业遥感与信息技术研究近60年，特别是20世纪50年代中期开始接触，并在60年代中期主持土壤调查与制图的教学工作。我深感野外研究土壤的技术落后，无法克服土壤制图中存在的国际性难题。20世纪70年代末开始运用遥感土壤制图，80年代引进信息技术从事土壤学研究，取得一些进展，但还没有跳出定性描述的技术水平。史舟教授从20世纪90年代初开始运用信息技术专心从事数字化土壤研究。他参加或主持国家技术攻关、国家支撑计划、国家自然科学基金等10多个重大项目的科学研究，取得了系列成果，获得农、林、水、气等科技领域的8项省部级科技成果奖，并已出版了《浙江红壤资源信息系统的研制与应用》《农业资源信息系统》《农业资源信息系统实验指导书》《农业信息科学与农业信息技术》《地统计学在土壤学中的应用》等专著和教材。

近10年来，史舟教授在上述研究基础上，专心关注、深入研究土壤光谱技术。土壤光谱技术是一项包含计量土壤、数字土壤制图和

土壤近地传感等内容的数字土壤研究的核心支撑技术。史舟教授领导的科技团队在土壤光谱测定、光谱数据处理、预测建模和土壤制图等重要环节都有新的技术突破，完成了《土壤地面高光谱遥感原理与方法》专著，并建立了中国土壤光谱数据库。该书是一部既有技术理论，又有实验例子，土壤光谱数据翔实的、具有新意的国际水平的科技新著。它将有力地推动数字土壤技术的发展。我为史舟教授成长为我国一名杰出的农业遥感与信息技术科学家而高兴，欣然为该书作序，并预祝在航卫片目视土壤解译制图的基础上，运用该项技术实现卫星遥感数据进行土壤调查制图取得成功，攻克数字土壤制图这一国际性的技术难题。



王人潮

2013年12月12日

# 前 言

自 1840 年的李比希和 1874 年的道库恰耶夫创建土壤学理论开始,土壤学已走过了近一个半世纪。社会的不断进步和科技的快速发展推动着传统土壤学向现代土壤学的迈进,特别是 20 世纪后期信息技术和生物技术的蓬勃兴起,使得土壤学科在宏观拓展、微观深入和学科交叉等领域方兴未艾。在引入信息技术方面,数字土壤的获取、分析、更新、制图等工作一直是现代土壤学的研究热点。为此,国际土壤学会先后出现过计量土壤学(Pedometrics, 1990 年成立)、数字土壤制图(digital soil mapping, DSM; 1998 年成立)、土壤近地传感(proximal soil sensing, PSS; 2008 年成立)三个工作组,其中 Pedometrics 还在 2002 年第 17 届国际土壤科学大会上成为了专业委员会。本著作所提到的土壤光谱技术正是这三个新发展方向中的关键支撑技术之一。

首先是数字化土壤制图, Sanchez 等 2009 年在 *Science* 上撰文介绍了由国际土壤学会(IUSS)、国际土壤参比和信息中心(ISRIC)、联合国粮农组织(FAO)等组织都通过各种途径在研究和推动全球、国家、区域大范围土壤类型数字制图工作,特别是全球数字土壤制图对全球气候变化和人类持续影响下陆地土、水资源循环、土地覆盖变化具有重要科学意义。该工作主要是通过国际协作,采用现代土壤地理学、遥感、土壤近地传感、地理信息系统、数据挖掘等手段和方法,完成全球土壤重要属性的高分辨率数字图。同时研究指出,从现代农业生产和管理的实际需求出发,各类高精度大比例土壤特性的数字化制图需求更为迫切。

其次是计量土壤学,科学家对其定义是“利用数学和统计学方法研究土壤的分布和发生”,引入区域化变量理论作为其发展的理论基础。计量土壤学充分认识到土壤特性存在时空变异性,所以传统的土壤信息的采集手段和分析方法存在很大缺陷。传统方法中采用有限的土壤采样和室内分析往往很难准确表征田间土壤特性的空间分布特征和连续性,难以获得高精度数字化土壤制图,并满足农业生产指导或环境系统建模等所需土壤信息的详细、精确程度。因此,发展各种大面积、快速获取土壤信息的手段成为其重要的发展方向(史舟和 Lark, 2007)。

三是土壤近地传感,2008 年国际土壤学会专门成立工作组,发展各种土壤信息室内外近地快速获取的方法和手段,推进传统土壤理化测试分析向土壤野外实时监测方向发展。2010 年在澳大利亚召开的第 19 届国际土壤学大会,关于土壤近地传感主要涉及电磁感应(electromagnetic induction, EMI)、 $\gamma$  射线、热红外、可见-近红外光谱等技术。Gerbbbers 和 Adamchuk 2010 年在 *Science* 上撰文介绍精确农业与粮食安全问题时,特别提到了土壤遥感、土壤近地传感在田间土壤属性快速获取中的作用,并提出了以可见-近红外高光谱技术为代表的近地传感器是未来数字土壤信息获取、更新和高精度制图的最重要手段之一。

因此,以各类可见-近红外反射、热红外等光谱技术为代表的土壤信息近地获取是当前国际土壤学界的发展方向和研究热点。本专著正是围绕着这个新方向,从土壤可见和红外光谱理论基础出发,对光谱测试方法、数据处理技术和各类建模方法进行了详细

的介绍。论著第1章主要介绍土壤近地传感、光谱技术的发展现状和趋势;第2章主要介绍了土壤可见与红外光谱的主要测试设备和测试方法;第3章主要介绍了土壤光谱数据的各类预处理与预测建模方法;第4章关于土壤可见-近红外光谱的原理,以及全球和全国土壤光谱数据库建设和应用;第5章和第6章主要结合本研究组的系列研究成果,对土壤水分、盐分、质地等物理特性和有机质、碳、氮等化学特性的光谱响应特性和预测技术进行论述;第7章介绍土壤的热红外发射光谱技术和分析方法;第8章和第9章,围绕着土壤光谱的机理,介绍了土壤光谱二向反射特性与模型;第10章介绍了土壤野外光谱新技术,也是当前土壤光谱研究的最前沿问题。

本著作是研究组近十年来研究的成果。先后受到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“多尺度农田信息获取与融合技术”(2013AA102301,2013~2017年)、国家自然科学基金“星陆双基土壤有机质光谱响应机理与高精度数字制图研究”(41271234,2013~2016年)、“基于高精雷达卫星的滨海盐土水盐含量遥感监测建模研究”(40871100,2009~2011年)、“滨海盐土高光谱特性和二向反射模型研究”(40571066,2006~2008年)、“土壤空间变异与景观模型支持下的土壤遥感解译技术研究”(40001008,2001~2003年),以及教育部新世纪优秀人才支持计划“区域典型土壤光谱标准数据库和有机质预测模型研究”(NCET-10-0694,2010~2012年)、国家科技支撑计划课题“特色农产品精细化管理和产品防伪关键技术集成与示范”(2011BAD21B04,2011~2013年)和浙江省杰出青年科学基金项目“星陆双基遥感土壤表层含水量同化反演方法研究”(R5100140,2011~2013年)等一系列项目的资助。

相关研究生论文包括《海涂围垦区土壤高光谱特性与土地利用遥感调查研究》《土壤高光谱遥感信息提取与二向反射模型研究》《地面实验条件下土壤热红外光谱特性研究》《滨海土壤微波介电特性研究》《基于高光谱遥感的土壤有机质预测建模研究》《中国典型土壤高光谱特性研究》。

本书由史舟教授负责构思和总体框架设计,并组织撰写。执笔人:前言和第1章(史舟)、第2章(王乾龙、史舟),第3章(陈颂超、李硕),第4章(史舟),第5章(彭杰、李曦),第6章(黄明祥、纪文君),第7章(黄启厅、史舟),第8章(程街亮、史舟),第9章(程街亮、史舟),第10章(纪文君、郭燕),附录(李硕、王乾龙)。撰写本书经过2009年至2013年近五年时间,三易其稿,最后由史舟教授统稿和修改成书。基于土壤光谱的理论、技术和方法还在不停地发展,有些研究内容还停留在研究阶段。因此,本书不足之处实属难免,甚至还会有错误,希望读者批评指正,共同为发展我国数字土壤事业而奋斗。

最后,在本书出版之际,我要特别感谢我国著名的农业遥感与信息技术专家、土壤学家,我尊敬的导师王人潮教授在83岁高龄的情况下为本书作序,这是对我的莫大鼓励。同时感谢浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所、浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室、浙江大学数字农业与农村信息化研究中心、浙江大学唐仲英传感材料及应用研究中心给予的大力支持;以及江西农业大学赵小敏教授、湖南农业大学周清教授、中国农业科学院卢艳丽博士、东北农业大学刘焕军博士、四川农业大学李廷轩教授、华中农业大学汪善勤博士、中国热带农业科学院林清火博士、云南农业大学李成学老师、西藏大学喻武老师等全国各高校科研单位的专家,为建设中国土壤光谱数据库提供土样或光谱数据,在此一并致谢。

# 目 录

序

前言

第1章 绪 论 .....	(1)
1.1 土壤近地传感与数字制图 .....	(1)
1.1.1 土壤近地传感 .....	(1)
1.1.2 数字化土壤制图 .....	(3)
1.2 土壤高光谱技术与应用 .....	(4)
1.2.1 土壤可见-近红外反射光谱技术进展 .....	(6)
1.2.2 土壤野外光谱技术进展 .....	(7)
1.2.3 土壤热红外光谱技术进展 .....	(8)
1.3 土壤二向反射特性研究进展 .....	(10)
1.3.1 土壤二向反射特性 .....	(10)
1.3.2 土壤二向反射研究进展 .....	(11)
第2章 土壤光谱测定 .....	(13)
2.1 主要土壤光谱测定仪器 .....	(13)
2.1.1 可见-近红外光谱仪 .....	(13)
2.1.2 热红外光谱仪 .....	(18)
2.2 光谱测定方法 .....	(19)
2.2.1 土壤可见-近红外光谱测定 .....	(19)
2.2.2 土壤热红外光谱测定 .....	(21)
2.2.3 土壤二向反射率光谱测量 .....	(23)
第3章 土壤光谱数据处理 .....	(27)
3.1 异常值的剔除 .....	(27)
3.1.1 标准偏差法 .....	(27)
3.1.2 主成分分析法 .....	(28)
3.1.3 马氏距离 .....	(29)
3.1.4 箱形图 .....	(29)
3.2 光谱增强 .....	(30)
3.2.1 多元散射校正 .....	(30)
3.2.2 标准正态变量变换 .....	(30)
3.3 光谱曲线去噪与平滑 .....	(31)
3.3.1 土壤光谱噪声分布 .....	(31)
3.3.2 土壤光谱去噪方法 .....	(32)



3.3.3	光谱去噪效果评价 .....	(35)
3.3.4	不同光谱去噪方法的比较 .....	(35)
3.4	光谱数据的变换与特征提取 .....	(36)
3.4.1	土壤光谱微分处理技术 .....	(36)
3.4.2	土壤光谱特征吸收带的提取与分析;连续统去除 .....	(37)
3.4.3	土壤光谱特性吸收的相关性分析 .....	(38)
3.4.4	土壤光谱吸收特征峰的提取 .....	(40)
3.4.5	光谱曲线形态比较分析 .....	(41)
3.5	土壤光谱建模技术 .....	(41)
3.5.1	线性模型 .....	(41)
3.5.2	非线性模型 .....	(46)
3.5.3	模型精度评价方法 .....	(51)
<b>第4章</b>	<b>土壤反射光谱曲线特征与波谱库 .....</b>	<b>(55)</b>
4.1	土壤反射光谱曲线特征 .....	(55)
4.1.1	可见-近红外光谱的基本原理 .....	(55)
4.1.2	土壤可见-近红外光谱特性 .....	(57)
4.1.3	不同类型土壤反射光谱曲线 .....	(61)
4.2	土壤光谱库建设与应用 .....	(63)
4.2.1	全球光谱数据库 .....	(63)
4.2.2	中国土壤光谱数据库 .....	(66)
4.2.3	基于光谱库的土壤有机质预测 .....	(71)
4.2.4	基于光谱库的土壤氮预测 .....	(73)
<b>第5章</b>	<b>土壤有机质与氧化铁反射光谱特性与预测 .....</b>	<b>(80)</b>
5.1	土壤有机质反射光谱特性 .....	(80)
5.2	土壤有机质光谱预测的线性模型 .....	(83)
5.3	土壤有机质光谱预测的非线性数据挖掘技术 .....	(91)
5.4	土壤氧化铁反射光谱特性与预测 .....	(95)
5.4.1	土壤氧化铁的反射光谱特性 .....	(95)
5.4.2	土壤氧化铁的高光谱响应 .....	(98)
5.4.3	氧化铁对光谱曲线形态的影响 .....	(101)
5.5	土壤氧化铁与有机质光谱的相互影响 .....	(101)
5.5.1	试验土样氧化铁高光谱特征 .....	(101)
5.5.2	氧化铁对有机质高光谱特征的影响 .....	(103)
5.5.3	氧化铁对有机质高光谱定量反演的影响 .....	(104)
<b>第6章</b>	<b>土壤质地与水分反射光谱特性与预测 .....</b>	<b>(108)</b>
6.1	土壤质地光谱预测 .....	(108)
6.1.1	土壤质地对光谱的影响 .....	(108)
6.1.2	土壤砂粒含量的高光谱预测 .....	(109)

6.2 土壤水分光谱预测 .....	(114)
6.2.1 土壤水分特性 .....	(114)
6.2.2 土壤水分的光谱特征 .....	(115)
6.2.3 土壤水分含量对土壤光谱反射率影响的一般规律 .....	(117)
6.2.4 基于光谱技术的土壤水分含量预测 .....	(118)
<b>第7章 土壤热红外光谱特性 .....</b>	<b>(127)</b>
7.1 土壤表温和发射率的分离 .....	(127)
7.1.1 典型温度发射率分离算法 .....	(128)
7.1.2 基于模拟数据的算法评价 .....	(132)
7.1.3 影响因素分析 .....	(137)
7.2 土壤热红外光谱特征及其特性预测 .....	(140)
7.2.1 不同类型土壤发射光谱特征 .....	(140)
7.2.2 不同含沙量土壤的发射光谱特征及其预测 .....	(143)
7.2.3 不同含水量土壤的发射光谱特征及其预测 .....	(153)
7.2.4 土壤有机质含量变化的发射光谱特征 .....	(158)
<b>第8章 土壤二向反射特性研究 .....</b>	<b>(160)</b>
8.1 二向性反射分布函数 .....	(160)
8.2 土壤二向反射模型 .....	(162)
8.2.1 经验模型 .....	(162)
8.2.2 辐射传输模型 .....	(163)
8.2.3 几何光学模型 .....	(164)
8.3 土壤二向反射特性研究 .....	(165)
8.3.1 土壤二向反射率随观测角度变化的规律 .....	(165)
8.3.2 表面粗糙度对土壤二向反射率的影响 .....	(171)
8.3.3 水分含量对土壤二向反射率的影响 .....	(173)
<b>第9章 土壤二向反射率模拟及模型参数反演 .....</b>	<b>(174)</b>
9.1 基于辐射传输模型的土壤二向反射率模拟及反演 .....	(174)
9.1.1 Hapke 二向反射模型 .....	(174)
9.1.2 模型灵敏度检验 .....	(178)
9.1.3 土壤二向反射率模拟及模型参数反演 .....	(180)
9.2 基于几何光学模型的土壤二向反射率模拟及反演 .....	(197)
9.2.1 Irons 几何光学模型 .....	(197)
9.2.2 模型预测 .....	(198)
9.2.3 土壤二向反射率模拟及模型参数反演 .....	(200)
<b>第10章 田间原状土壤光谱特性与属性预测 .....</b>	<b>(210)</b>
10.1 野外土壤光谱的影响因素及处理 .....	(210)
10.1.1 野外土壤光谱测量中的影响因素 .....	(210)
10.1.2 野外土壤光谱测量中的影响因素去除算法 .....	(211)
10.1.3 野外土壤光谱测量中的影响因素去除算法应用 .....	(215)

10.2 野外土壤特性光谱预测制图 .....	(219)
10.2.1 光谱指数和插值方法 .....	(219)
10.2.2 野外水稻土有机质制图应用 .....	(220)
参考文献 .....	(226)
附录 土壤地面高光谱实验处理主要软件介绍 .....	(239)
彩图	

# 第 1 章 绪 论

土壤是地球陆地表面具有肥力并能生长绿色植物的疏松层,具有为植物生长提供并协调营养条件和环境条件的能力。土壤不仅是人类农业生产的基地,同时也是地球表层系统自然地理环境的重要组成部分(黄昌勇,2000)。土壤的形成过程是由岩石风化过程和成土过程所推动的。俄罗斯学者 Dokuchaev(1883)和美国的 Jenny(1941)等认为土壤成土主要受母质、气候、生物、地形和时间等因素影响。由于土壤空间分布的广泛性、类型的多样性、理化特性的差异性,使得土壤信息快速获取和大面积土壤数字制图与更新工作尤为重要。

由于野外土壤时空变异特性的存在,传统采样与制图方法中采用有限的土壤采样和室内分析往往很难准确表征田间土壤特性的空间分布特征和连续性,难以获得高精度数字化土壤属性信息,并满足农业生产指导或环境系统建模等所需土壤信息的详细、精确程度。因此,当前的数字土壤主要从两个方面来加强机理、方法和技术上的研究:一是研究快速原位获取土壤特性信息的原理和方法,获得尽量多的土壤样点实测信息;二是研究高精度数字化土壤信息分析的方法和模型,探索多源背景信息支持下的空间数据表征、信息挖掘和规则推理模型。土壤可见-近红外光谱技术涉及室内光谱探测、田间近地传感和卫星遥感三种方式,是当前土壤信息快速获取最具潜力和最广泛采用的手段。土壤可见-近红外光谱技术的基础研究内容就是土壤高光谱的地面实验以及土壤高光谱特性的研究,这也是本书的主要章节内容。

## 1.1 土壤近地传感与数字制图

土壤可见-近红外光谱技术的飞速发展主要是受到土壤近地传感、土壤数字制图、精确农业等实际工作的需求。特别是近十年来,土壤学新发展的土壤近地传感(proximal soil sensing, PSS)方向吸引了众多科学家和国际大型农业装备公司的关注。土壤信息的快速获取与数字化制图一直落后于作物信息研究领域。由于土壤受作物覆盖的影响,包括卫星遥感和各种地面传感器在非接触式和直接获取土壤信息方面受到很大的挑战。因此,当前的土壤可见-近红外技术主要是集中突破地面试验研究与近地传感设备的研发(史舟等,2011)。

### 1.1.1 土壤近地传感

土壤近地传感最早由 Viscarra Rossel 和 McBratney 在 1998 年提出的,他们认为相对于遥感(remote sensing),土壤近地传感主要指能够在近表土 1m 深内可快速获取土壤特性的方法和设备。在 2010 年他们又重新给予了新的定义,认为土壤近地传感是利用田间传感器获取土壤近地面(2m 深内)或是土体内信息的技术。土壤近地传感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 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研究工作,具有代表性的是 1970 年 Condit 分析了美国 160 种土壤从  $0.32 \sim 1.0 \mu\text{m}$  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 Bergvel 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。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 就通过此原理利用电磁感应式传感器(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、王人潮等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。

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、电化学型等种类。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 1.1。

表 1.1 不同类型土壤传感器的测试指标和主要代表性仪器

Table 1.1 Working ranges and representative instruments of different types of soil sensors

传感器类型	测量指标	代表性仪器
电与电磁型	质地、有机质、盐分、水分等	大地电导率仪、Veris 3100、时域反射仪、频谱反射仪
光学与辐射测量型	质地、有机质、CEC、pH、水分、盐分、温度、土壤粗糙度、矿物等	光谱仪、探地雷达、激光诱导光谱
机械式型	紧实度、耐旱力、水分等	指针式土壤紧实度仪
电化学型	pH、硝酸盐、营养元素等	pH 计、离子敏感晶体管传感器

其中光学与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。电磁波的原理及应用见图 1.1。目前利用的波段主要是可见光(Vis: 400~700nm)、近红外(NIR: 700~2 500nm)、中红外(mid-IR: 2 500~25 000nm)及高能射线(如 X 射线、 $\gamma$  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。

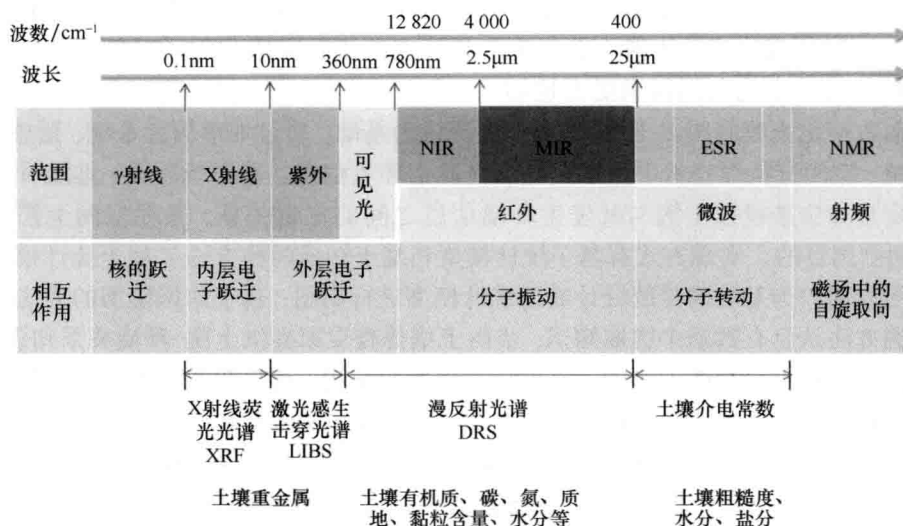


图 1.1 光波原理及其应用范围

Fig. 1.1 Principle of optical waves and range of its application scale  
(彩图见书后)

### 1.1.2 数字化土壤制图

土壤信息是土地管理和环境模型的基本参数。传统土壤制图方法以多边形为基本表达方式,以手工勾绘为基本技术,依据地形图、航空像片或卫星像片进行土壤制图的基本范式。基于多边形和手工制图的传统土壤调查方法存在很多缺陷。它假设土壤空间变异的不连续性、离散分布,认为土壤类型在地理空间上有明晰的界线,这与实际上土壤连续变化的特性不符。另外,传统土壤制图依靠大量野外调查和手工制图,普查周期长,花费大量人力、物力和经费,消耗巨大,已不能满足信息时代快速更新信息的需求。

近年来,随着计算机技术和“3S”技术的不断发展,越来越多的数字技术运用到土壤调查中来。在过去的几十年中,信息技术的发展为数字化土壤制图提供了新的技术与数据支持,数字化土壤制图(digital soil mapping, DSM)成为当前国内外土壤科学的研究热点。基于 GIS 和遥感技术的数字化土壤制图多采用栅格的表达方式,且不再采用手工绘制的方法,因此土壤类型和土壤属性的表达在地理空间上更为详细、在属性空间上更为精确,提高了制图的效率和效果。

国际土壤学会(IUSS)、国际土壤参比和信息中心(ISRIC)、联合国粮农组织(FAO)等组织都通过各种途径在研究和推动全球、国家、区域大范围土壤类型数字制图工作。通过国际协作,采用现代土壤地理学、遥感、土壤近地传感、地理信息系统、数据挖掘等手段和方法,完成全球土壤重要属性的高分辨率的数字图(GlobalSoilMap.net)。Sanchez等2009年在*Science*上撰文介绍了开展全球数字化土壤制图对全球气候变化和人类持续影响下陆地土水资源循环、土地覆盖变化具有重要科学意义。同时研究指出,从现代农业生产和管理的实际需求出发,对各类高精度大比例土壤特性的数字化制图需求更为迫切。

目前数字化土壤制图以土壤-景观模型理论为基础,通过地理信息系统、遥感、全球定位系统、空间分析等技术手段来获取土壤发生环境信息,采用统计学、地统计学等其他数字定量方法来模拟土壤与其发生环境信息之间的定量关系,并在空间上扩展该关系,达到制图目的。实现方式有基于统计模型和基于知识两种方法。基于统计模型的方法多采用以回归为基础的传统统计或地统计模型进行制图;基于知识模型的方法或通过数据挖掘方法从已有数据中提取知识,或由土壤普查专家提供土壤-环境关系知识。

遥感技术在土壤制图工作中一直发挥着重要的作用,从早期的资源卫星数据目视解译制图到目前高精度卫星数据的数字化制图,遥感技术发挥着其特有的作用。但土壤遥感受到大气干涉、地面覆盖物遮挡、粗糙地表二向反射效应、混合像元、土壤空间异质性等影响,其很多机理、方法和应用方面还存在许多科学问题需要研究。

而引入地面高光谱测试技术,对于数字化土壤制图特别是区域高精度制图是一个很重要的信息来源。澳大利亚的Viscarra Rossel等(2010)首先提出了引入地面土壤光谱信息和更多的卫星遥感土壤指数,建立新的土壤-景观数字化制图模型,并用于澳大利亚高精度土壤分类和属性数字制图的研究,得到了较好的结果。因此,研究室内外土壤高光谱探测方法是数字化土壤制图的一种重要技术支撑。

## 1.2 土壤高光谱技术与应用

高光谱分辨率遥感(hyperspectral remote sensing),简称高光谱遥感,是指利用很多很窄的电磁波波段(一般光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda \sim 10^{-3}\lambda$ ,即nm级)从感兴趣的物体获取有关光谱数据,其基础是测谱学(spectroscopy)。测谱学起源于20世纪20年代,它是在分子、原子结构理论和量子力学基础上发展起来的,是用于识别分子、原子类型及其结构的实验科学(浦瑞良和宫鹏,2000)。

20世纪80年代建立起来的成像光谱学(imaging spectroscopy),是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域获得许多非常窄且光谱连续的图像数据的技术,这种记录的光谱数据能用于多学科的研究和应用之中,该技术融合了成像技术和光谱技术,可将视域中观测到的各种地物以完整的光谱曲线记录下来(图1.2),高光谱图像信息量较宽波段而言成十倍乃至数百倍增加,所得光谱数据能用于多学科的研究和应用中。它奠定了高光谱遥感的技術基础,也是高光谱遥感建立的标志。

国际遥感界的共识是光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ 数量级范围的称为多光谱(multispectral),这样的传感器在可见光和近红外光谱区只有几个波段,如美国Landsat MSS和TM,法国

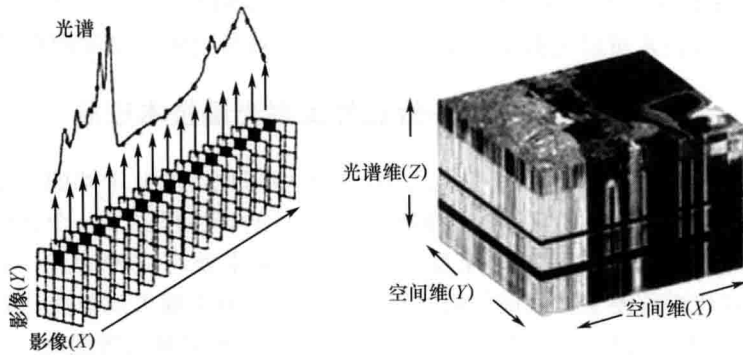


图 1.2 高光谱影像立方体

Fig. 1.2 Hyperspectral image cube

资料引自:AVIRIS 影像立方体

的 SPOT 等; 而光谱分辨率在  $10^{-2}\lambda$  数量级范围的遥感信息称之为高光谱遥感 (hyperspectral); 随着遥感光谱分辨率的进一步提高, 在达到  $10^{-3}\lambda$  时, 遥感即进入超高光谱 (ultraspectral) 阶段 (陈述彭等, 1998)。

高光谱遥感的特点是光谱分辨率高, 波段连续性强, 能获得多光谱传感器无法获得的精细的光谱信息, 由于其光谱分辨率高达纳米数量级, 遥感器在  $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$  范围内可细分成几十个, 甚至几百个波段, 光谱分辨率为  $5\sim 10\text{nm}$ 。它在特定光谱域内以高光谱分辨率同时获取连续的地物光谱图像, 其光谱图像上每一个像元点在各通道的灰度值都可形成一条精细的光谱线 (图 1.2), 从而可以构成独特的超多维光谱空间, 使得遥感应用着重于在光谱维上进行空间信息展开, 获得更多的精细光谱信息, 为定量分析地球表面生物物理、生物化学过程提供参数和依据。研究表明: 许多地表物质的吸收特征在吸收峰深度一半处的宽度为  $20\sim 40\text{nm}$  (Hunt, 1980), 而高光谱遥感所获得数据的波段宽度一般在  $10\text{nm}$  以内, 因此这种数据能以足够的光谱分辨率区分那些具有诊断性光谱特征的地表物质, 使得高光谱遥感具有广泛的应用前景。

在 20 世纪 40 年代, 土壤光谱学研究就已经出现, 但直到 80 年代, 土壤光谱分析技术作为一种快速、简便易行、对样品无破坏性的检测方法, 才得到广泛研究和应用。人们沿用了一般光谱学的研究方法, 在实验室条件下获取经过制样处理的土壤样品的光谱, 能精确地预测土壤多种理化性质。

在过去 20 年间 Vis-NIR 漫反射光谱在土壤科学中的应用备受关注, 大量发表的关于土壤和农业科学文献呈指数增长。第一份报道水分、粒径与化合物对土壤反射光谱影响的研究报告可以追溯到 20 世纪二三十年代 (Ångström, 1925)。相关应用的快速增多可能是由于光谱含有丰富的信息, 且伴随着计算方法的进展、仪器制造和化学计量学的发展, 以及农业和土壤科学应用存在巨大的潜力。Vis-NIR 漫反射光谱技术是土壤所含有有机质、矿物、水分、粒径和颜色的综合响应。这使得该技术为探测各种土壤理化及生物属性尤其有效。该技术也较常规土壤分析有一些重要的优势, 如快速、无损、可重复性好、成本低、易用性强、少量样本即可进行分析, 并且不使用对环境有害的萃取剂, 可用于原位测量。重要的是, 一次测量即可得到多种土壤属性值。这种漫反射光谱的多参数



功能意味着一条光谱包含多种土壤成分的信息,即 Vis-NIR 光谱对土壤有机物和无机物均敏感。因此,该技术可以为数字土壤制图、土壤监测及土壤环境建模提供定量信息。

### 1.2.1 土壤可见-近红外反射光谱技术进展

土壤光谱反射特性是土壤基本性质之一,和土壤理化性质有密切的关系。这种关系是土壤遥感技术的物理基础,而且也为研究土壤本身的属性提供了一个新的途径和指标(徐彬彬和季耿善,1987)。目前土壤反射光谱的获取主要有三种途径:实验室波谱测试、野外手提式波谱仪测量以及航空航天成像光谱仪。航空航天成像光谱仪主要是获取土壤表面对太阳自然光为主的反射光谱。而地面的实验和田间光谱观测,其采用的光谱仪辅助探头装置和光源不一样。实验室土壤反射光谱测量以人工光源为主,分接触式和非接触式两种,是在一定的条件下进行,是可控制的。而野外光谱测量即存在接触式和非接触式,也存在太阳光源和人工光源之分。特别是采用以太阳为光源进行非接触式反射光谱测量,会受到诸多因素的影响,如观测角度的变化、照度的改变以及土壤粗糙度等因素的影响。由于以上因素以及大气衰减的存在,使得所获波谱数据的信噪比偏低,所以野外波谱测试要求较好的大气透明度及较佳的光照条件,而这种测试方式目前主要用于卫星或航空遥感的地物辐射定标、同步光谱光测、遥感定量反演等研究。对于精确农业的田间土壤信息快速获取,目前主要采用野外人工光谱和车载接触式田间现场反射光谱测试的方法。

国外在野外及实验室内获取土壤光谱数据已做了大量工作。其中具代表性的是 Condit(1970)分析了美国 160 种土壤从  $0.32 \sim 1.0 \mu\text{m}$  波段的光谱曲线,根据谱线形状将它们分为三种主要类型。Stoner 和 Baumgardner(1981)在实验室利用光谱仪在  $0.52 \sim 2.32 \mu\text{m}$  光谱范围测定取自美国 39 个州和巴西境内的 485 个土壤样品,分析它们的光谱特征,将它们分为 5 类土壤反射光谱曲线:有机质控制类型、最小改变型、铁影响类型、有机质影响类型、铁控制类型。然而他们获得的土壤信息仍很有限,对土壤的进一步细分受到了阻力。Kimes 等(1993)在 Stoner 和 Baumgardner 的数据基础上找到了一个较为有效的土壤细分的方法。他们的工作已做到能分离出有机质含量高与低、纹理的粗与细的同类土壤而成分上有少许细微差别的光谱曲线。

随着更为先进的高光谱仪的不断出现,高光谱遥感技术在土壤学科的应用也得到了逐步的深入,在侵蚀土壤板结和土壤类型成图、土壤风化状况监测以及土壤开发和土壤退化评价等方面进行了应用。

国内学者戴昌达(1981)测定了我国 23 种土壤类型在  $0.36 \sim 2.50 \mu\text{m}$  波段范围内的光谱曲线,把我国主要土壤的光谱反射特性曲线划分为平直型(富含有机质土壤)、缓斜型(与水耕熟化相联系的水稻土)、陡坎型(热带、亚热带高铁铝土壤)和波浪型(干旱地区土壤)四类,基本概括了我国土壤类型的特点,对土壤分类具有一定的指导意义;王人潮等(1986)根据对浙江省主要土壤光谱反射特性曲线的形态与斜率的变化关系,将其分为陡坎型(红壤类)、缓坡型(黄壤类)和平直型(水稻土类)三种类型;王绍庆(1990)将北京的反射光谱曲线大致分为四类:曲线上升较快的高反射率类型、曲线上升较慢的低反射率类型、曲线上升较快的中等反射率类型、曲线斜率在  $0.35 \sim 0.75 \mu\text{m}$  处急剧改变类型。吴豪翔和王人潮(1991)通过对南方山地丘陵的砖红壤、红壤、黄壤、水稻土和紫