

# 土壤盐渍化遥感应用研究进展

翁永玲<sup>1,2</sup>, 官 鹏<sup>1,3,4</sup>

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 东南大学交通学院测绘工程系, 江苏 南京 210096;  
3. 中国科学院遥感应用研究所及北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 4. Department of  
Environment Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, USA)

**摘要:** 文章从地面数据的调查、盐渍土影像的目视判读特征、光谱特征和土壤盐渍化区域的植被特征以及多光谱、高光谱遥感技术等方面综述国内外应用遥感数据探测土壤盐渍化程度及其制图的研究。利用数字图象并结合野外调查数据进行目视解译和计算机自动解译、图象变换提取盐渍土信息; 结合 GIS 方法在分类中加入非遥感数据来提高分类精度; 在研究盐渍土的光谱特征的基础上应用高光谱技术定量或半定量地提取盐渍土信息。这都是制定综合治理措施、决定土地利用方向的关键, 也是进行区域土壤盐渍化动态预报的重要依据。

**关 键 词:** 土壤盐渍化; 地面数据; 遥感; 高光谱

**中图分类号:** S156.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2006)03-0369-07

土壤盐渍化通常出现在气候干旱、土壤蒸发强度大、地下水位高且含有较多的可溶性盐类的地区。它是一定的气候、地形、水文地质等自然条件共同对水盐运动产生影响的结果<sup>[1,2]</sup>。土壤盐渍化问题还与人类活动, 特别是农业灌溉密切相关。土壤盐渍化不但造成了资源的破坏、农业生产的巨大损失, 而且还对生物圈和生态环境构成威胁<sup>[3~5]</sup>。作为主要的土地退化形式之一, 土壤盐渍化已成为一个全球性问题<sup>[6,7]</sup>。据估计, 全球已有近  $10 \times 10^8 \text{ km}^2$  的土壤受到不同程度的盐渍化危害, 占陆地面积的 7%<sup>[8]</sup>。约有  $7\,700 \times 10^4 \text{ km}^2$  的盐渍化土壤是由于人类活动所造成的, 这其中有 58% 集中在灌区<sup>[8]</sup>。中国的盐渍土总面积约为  $2\,670 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中耕地面积约  $667 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 主要分布在 23 个省、市、自治区的平原和盆地<sup>[1]</sup>。各地的自然条件, 如气候、地形地貌、水文地质、成土母质和社会经济条件等的明显差异, 对盐渍土的形成、发展和改良利用途径产生深刻影响。因此, 尽早掌握盐渍土地区土壤盐渍化程度、类型和分布, 是制订综合治理措施, 合理利用土地的关键, 也是预报区域土壤盐渍化动态的重要依据<sup>[9,10]</sup>。

土壤盐渍化的形成是一个复杂的动力学过程, 因而对土壤盐渍化的探测、动态监测和制图是一项

较为困难的工作。遥感技术能大面积重复获取同一地区的信息, 具有宏观、综合、动态、快速的特点, 并在速度、精度和成本花费方面凸显出众多优势<sup>[11,12]</sup>。作为地球资源调查、环境监测的一种新的探测手段, 遥感已被广泛应用于土地退化的研究, 特别是盐渍土的监测与制图<sup>[8]</sup>。世界各国科研工作者经多年的实践, 将多种遥感数据用于土壤盐渍化的调查、制图和动态变化研究, 取得了较好的效果。本文根据国内外最新研究进展, 综述了用遥感方法探测盐渍土过程中的地面数据调查、盐渍土图象的目视判读特征、光谱特征和土壤盐渍化区域的植被特征, 分析讨论的多光谱、高光谱遥感技术探测盐渍化程度及制图的研究近况, 并对未来发展趋势进行了展望。

## 1 土壤盐渍化探测中的地面调查数据

利用遥感方法探测土壤盐渍化状况, 不论采用的处理方式是目视解译、还是计算机数字图象处理, 都要涉及非遥感资料(如: 地形图、土壤图以及土壤调查报告等)的使用。其它重要的非遥感数据还包括土壤电导率, 地物光谱测量数据等。它们一般可以通过若干次野外调查及试验室的分析而

收稿日期: 2005-02-21; 修订日期: 2005-05-30  
基金项目: 中国科学院海外杰出学者基金项目(2001-1-13)资助。  
作者简介: 翁永玲(1962-), 女, 江苏南京人, 副教授, 博士研究生, 主要从事遥感机理、方法与应用研究。E-mail: mgyly@yahoo.com.cn

获取<sup>[13]</sup>。

土壤盐分常用电导率 (electrical conductivity EC) 来评价。美国盐土实验室将饱和泥浆 25℃ 时的电导率  $EC > 4 \text{ m s/cm}$  作为确定土壤为盐渍土的诊断性指标<sup>[1, 13]</sup>。另外, 有研究者利用基于地面的土壤电导性电磁 (EM) 仪器 (如 EM 31 EM 34-3 EM 38 EM 39) 直接测量土壤的导电性质, 进行土壤盐渍化程度诊断及定量制图<sup>[6 14 15]</sup>。但该方法耗时、费资, 仅适用于小范围监测和制图。因此, 其它经济有效的盐渍化制图方法, 如机载 EM 测量、机载雷达、以及高光谱遥感技术也应运而生<sup>[6 16 17]</sup>。

有效探测盐渍土, 尤其是利用高光谱数据定量半定量进行土壤盐渍化状况制图, 必须依据地面光谱测量数据。理想情况下, 地面光谱数据的测量和相关调查应与遥感图象的获取同步。利用便携式光谱仪直接测量地表的光谱反射率, 是客观地获取地表真实信息, 排除人为因素影响的有效方法。这些地面测量数据可用于遥感数据的定标及验证、混合像元分解、分类及与分类有关的处理<sup>[6 16 18~20]</sup>。另外, 地下水的埋深、地下水矿化度、土壤湿度、土壤蒸发强度等等, 这些都是影响土壤盐渍化的重要因素<sup>[2 19 20 23]</sup>。它们无法从遥感数据获取, 只有依靠野外调查测定。

## 2 盐渍化区域遥感信息特征

### 2.1 光谱特征

利用遥感数据监测土壤盐渍化空间分布和制图, 充分理解盐渍土及耐盐植被光谱特征极为重要<sup>[11]</sup>。地面观察、实验室及野外光谱测量数据表明, 盐渍土矿物成分及其含量、土壤湿度、有机质、土质、颜色以及表面粗糙度共同影响盐渍土的光谱反射率和光谱特征<sup>[8 22 24 25]</sup>。

Rao 等分析了不同时相的 TM 数据以及相应时相的实测光谱, 发现与非盐渍土相比, 盐渍土在可见光和近红外波段光谱反射强, 且土壤盐渍化程度愈高, 光谱反射愈强<sup>[11]</sup>; 重钠质盐渍土壤的光谱反射率比一般重盐渍土的反射率高。这一特征对区分一般重盐渍土壤中的重钠质盐渍土极为有益; 另外, 太阳高度角、土壤含水量也影响盐渍土的光谱响应模式<sup>[11]</sup>。有时因盐分组成不同, 实测光谱反射率与土壤含盐量会出现负相关, 如由  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  组成的高湿度盐土壤, 从周围环境吸收了大量的水分后, 反射率降低<sup>[24]</sup>。

盐渍土中通常含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等离子。蒸发让这些化学物质在土壤表面聚集成盐壳和盐晶。不同化学成分的盐, 如含水氯化钠、硫酸钠、硫酸钾、硫酸钙、硫酸镁等都吸收太阳辐射, 它们与水在晶格结构上的结合方式不同, 会引起吸收峰位置微妙且较稳定的变动<sup>[6]</sup>。Howari 等通过室内实验, 发现并且归纳了石膏以及含有石膏的盐壳、钠盐土、碳酸氢钠和被其影响的土壤、碳酸钙、硫酸钠的诊断性吸收特征<sup>[26~28]</sup>。Dehaan 等在野外测量了澳大利亚 Murray-Darling 盆地的盐壳、重度、中度、轻度盐渍化土壤的光谱, 并且用连续统去除法分析了光谱数据。结果表明, 这 4 类土壤在 505 920 1 415 1 915 和 2 205 nm 附近都有吸收特征峰。当土壤盐渍化程度较高时, 在 680 1 180 1 780 nm 处均具有明显的吸收特征。在 2 200 nm 处有羟基吸收, 吸收强度随着盐渍度的提高而减弱。在 800 和 1 300 nm 之间, 反射率曲线的斜率随土样盐分的提高而减小<sup>[6]</sup>。Metternich 等的研究表明, 利用中红外波段可区分干燥土壤中的硫酸盐和氯化盐, 通过该处的吸收峰能识别表面含有  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  的土壤; 由于分子内部的振动,  $\text{CO}_3^{2-}$  强烈吸收热红外辐射, 因而利用 TM 热红外波段 (10 4~12 5  $\mu\text{m}$ ) 能区分出碱土和盐土<sup>[19]</sup>。

### 2.2 间接特征

土壤盐渍化的程度影响土地覆盖和利用模式, 其地表单元在遥感图象上的色调、纹理及模式都存在差异。此外, 土壤含盐量与植被类型、地貌形态、地下水的关系特别密切, 盐渍土的判读可依靠这些间接标志, 利用各种景观要素之间的相互关系来确定<sup>[29]</sup>。

在盐渍土环境中, 植被类型、生长状况在很大程度上受到盐分的影响和控制, 尽管植被覆盖会改变土壤的光谱响应, 但它的确是一个很好的盐渍化程度间接指标<sup>[6 12 13]</sup>。耐盐植被的出现以及对盐敏感的植被的消失, 是最早且最易辨认的盐渍化征兆之一。因此植被被广泛用于盐渍化辅助制图<sup>[16 19 30~32]</sup>。Bui 等通过研究澳大利亚昆士兰州东北部的植被种类以及植被的分布与集群, 确定了土壤盐渍化程度<sup>[30]</sup>。Dehaan 等在图象获取的同时, 于野外测量了 Samphire (圣彼得草) 等 5 种耐盐植物的光谱, 通过连续统去除法对光谱进行归一化处理发现, 它们在可见光和近红外波段内都有区别

于一般植被的光谱特征<sup>[6]</sup>。盐分对农作物生长的最重要负面影响是它抑制了植物从土壤中吸收水分的能力,从而增加了植物的表面阻抗。例如,棉花的表面阻抗与盐渍土电导率的相关系数较高( $R^2 = 0.86$ ),用棉花的表面阻抗来评价土壤含盐量可获得较好的结果<sup>[31]</sup>。植被在近红外波段的反射率表达了植被的活力,也是反映土壤盐渍化程度的最好指征之一<sup>[6]</sup>。NDVI与土壤的电导率有较高的相关性,故NDVI也可作为判别盐渍土的一个间接参数<sup>[6, 12, 13, 20, 32]</sup>。

### 3 盐渍土遥感监测方法

遥感手段已被广泛应用于监测盐渍土和盐生植被、识别土壤中所感染的盐类并进行定量或半定量制图<sup>[6, 7, 12, 13, 16~18, 21, 23, 24, 33]</sup>。Landsat MSS和TM、SPOT、IRS、Aster多光谱数据及高光谱数据Hymap等是常用的遥感数据。

#### 3.1 多光谱遥感技术

##### 3.1.1 考虑因素

土地覆盖、利用模式、土壤湿度、地下水埋深、土壤类型等众多的因素都会影响盐渍土的表面特征、光谱特征以及时空特征<sup>[2]</sup>。利用遥感数据监测土壤盐渍化的空间分布和制图,应综合利用多源数据辅助解译。Vema等利用了多时期TM数据的假彩色合成图象以及热红外波段,分析了土地覆盖、利用模式、不同盐渍土的反射率及土壤盐渍化间接指征(如农作物生长不均匀、出现光板地块、耐盐植被及土壤含水量)之间的关系,依据这些不同的地表细节在假彩色图象上的色调、纹理和模式把盐渍土分为5个级别<sup>[7]</sup>。Karavanova等通过1:2000的全色航空像片与土壤图的叠加,发现不同土壤类型的光谱亮度范围的差异与其所处的相对高程及相应的地下水埋深有关<sup>[24]</sup>。关元秀等在选择训练样区时,充分考虑了地下水埋深和矿化度,成功地将黄河三角洲土地盐碱化的现状分为4个等级<sup>[23]</sup>。骆玉霞等还考虑了地貌、土体构型这两个环境因素,建立复合的独立地理信息“波段”参与遥感信息综合分类,取得了预期的效果<sup>[21]</sup>。因此综合考虑地理环境、生物环境和景观特征,是提高分类精度的有效途径。

遥感方法探测土壤盐渍化的最好季相应为雨季前的干旱季,对特定的区域还应同时考虑现势的地表覆盖要素<sup>[7, 12, 19]</sup>。若以植被为探测盐渍土的

间接指征,则应选择8~9月的数据,这一时期植被的生物量几乎达到最大<sup>[31]</sup>。此外,依据各波段的信息量、相关性、结合图象获取的时相及研究对象的特征和应用目的来选择最佳波段组合,以确保各类别的可分性<sup>[33~35]</sup>。

#### 3.1.2 盐渍土专题信息提取

利用遥感数据,通过数据变换(如K-L、K-T变换),协同地理环境、生物环境和景观特征数据,充分利用图象的光谱信息及地理信息进行计算机自动解译分类是提取盐渍土专题信息、监测盐渍土动态变化的有效手段。目前已经得到了广泛的应用<sup>[19~21, 23, 31, 36, 37]</sup>。

监督分类中训练样区的选择至关重要,Mettner等利用Landsat TM数字图象分类,在建立训练样本时,协同实测土壤退化特征以及实验室测定的数据(如土壤电导率EC、钠吸附率SAR、土壤pH值),从土壤数据库中选取各个级别的代表性样本,按用户定义的空间和光谱的制约条件,并考虑相邻像元的信息,确定光谱同质的对象组成训练样区,采用最大似然法分类,成功地提取了土壤盐渍化分布信息<sup>[19]</sup>。若将常规影象分类方法加以改进(如监督分类法与非监督分类法的集成),在分类中加入土壤含盐量、地下水埋深和归一化植被指数(NDVI)这三个辅加特征的数据,并结合“上下文分析”、“掩膜分析”等地理信息系统分析处理,能有效地区分出非盐渍土和轻度盐渍土,且盐渍土信息提取总精度得到提高<sup>[22]</sup>。骆玉霞等采用了K-T、K-L变换和有关经验指数,从Landsat TM数据中提取了盐渍土的光谱特征和纹理特征参与分类<sup>[21]</sup>。关元秀等先对Landsat TM数据作缨帽变换,对亮度、绿度和湿度分量假彩色合成,然后再监督分类,成功地将黄河三角洲土地盐碱化的现状分为:非盐碱地、轻度盐碱地、中度盐碱地、重度盐碱地4个等级<sup>[23]</sup>。Dwivedi等运用主成分变换、影象差值法、影象比值法和分类后逐个像元对比法监测了盐渍土动态变化。但前三种方法仅能识别出未变盐渍土的区域以及变为农田的盐渍土,无法识别变为盐渍土的农田,对于有目的的变化监测而言,分类后逐个像元对比法更合适<sup>[36]</sup>。刘庆生等利用HS和PCA变换将资源一号卫星数据与高分辨率全色数据进行融合分析,更清晰地确定了不同级别盐渍土及农田的分布状况<sup>[37]</sup>。这些研究都不同程度地提高了盐渍土专题信息提取的精度。

### 3.2 高光谱遥感技术

1) 高光谱数据的优势。高光谱遥感传感器获取的图象具有图谱合一的特征, 它能对每个像元提供接近于实验室质量的地物连续光谱信息, 实现了地物的空间信息、辐射信息、光谱信息的同步获取。精细的光谱分辨率反映了地物光谱的细微特征, 使得依据诊断性的光谱吸收特征来识别地物、进行遥感定量分析并且研究地物的化学成分等成为可能<sup>[27 28 38-41]</sup>。高光谱数据蕴涵描述土壤表面状况的光谱信息及其特征的空间信息, 具有评价土壤性质细微差异的潜力, 与多光谱技术相比在识别和探测盐渍土方面具有很大优势<sup>[38 39]</sup>。近年来多位学者应用高光谱技术定量半定量地研究了土壤盐渍化及土壤特性<sup>[6 16 17 26 41]</sup>。

2) 分类制图技术。利用高光谱遥感数据研究盐渍土, 通过光谱变换与运算 (如连续统去除法、导数光谱、植被指数等) 从光谱特征上发现表征不同盐类的特征光谱区间和参数, 提取原始数据中隐含的信息, 识别盐渍化程度。实地测量盐渍土的光谱, 并且与光谱数据库及图象上得到的光谱曲线对比分析、匹配来识别地物, 通过众多分类方法进行制图<sup>[6 16]</sup>。由于传感器空间分辨率的限制以及地物的复杂多样性, 混合像元普遍存在于遥感图象中。混合光谱分解能真实地反映地物覆盖状况, 提高分类精度。

Dehaan等实地测量了盐渍土及相关的耐盐植被的光谱, 用连续统去除法研究了盐渍土和植被的光谱吸收特征<sup>[6]</sup>。基于这些数据, 通过光谱角制图、匹配滤波、光谱特征自适应等制图方法, 对 Hymap 数据进行了分类, 获取了盐渍化程度指征图。验证结果表明, 选择包含光谱吸收特征的波段范围用光谱特征自适应法得到的结果与实际地表覆盖以及用 EM 38 实地测量值制图结果最相似。因此, 高光谱遥感数据能半定量地揭示土壤盐渍化程度及其空间分布<sup>[6]</sup>。Dehaan等从 Hymap 高光谱图象上提取了盐渍化状况端元光谱, 确定表达盐渍化程度的土壤和植被的指示器, 并用光谱特征自适应、线性混合光谱分解、光谱角制图、匹配滤波、混合调谐匹配滤波等方法制图。通过用地面地球物理方法测量的土壤盐分图检验, 混合调谐匹配滤波法与实地测量的盐分分布最为一致, 同时由表达盐渍化程度的植被指示器与该区域的各种耐盐植被的分布一致, 像元的分类与图象获取时的地表覆盖

条件较为一致<sup>[16]</sup>。这些结果表明, Hymap 高光谱图象能半定量地揭示土壤盐渍化程度及其空间分布<sup>[6 16]</sup>。

另外, 基于统计模型的经验预测方程也是高光谱数据用于盐渍化制图的有效途径。Ben-Dor 利用 DAIS-7915 高光谱数据进行了土壤特性 (包括土壤盐分) 的定量制图。首先对实地采集的具有代表性的土壤样品进行野外及实验室光谱测量和湿化学分析, 获取光谱信息和相关理化特性, 通过线性相关分析选择相关系数高的波段参与多元逐步回归分析, 建立预测土壤特性的经验模型。对高光谱反射率图象进行大气订正, 实现地表反射率的反演, 并对图象掩模了植被覆盖部分, 再依预测方程, 逐个像元计算生成土壤特性定量图<sup>[17]</sup>。根据区域特征先验知识及野外采集的数据检验, 证明结果是成功的。在此基础上对植被覆盖下的土壤进行插值得到全区域土壤表面特性定量图<sup>[17]</sup>。

## 4 结论与展望

### 4.1 结 论

利用遥感方法探测土壤盐渍化状况和制图, 离不开大量的地面和实验室数据。遥感数据只能研究地表裸土、植被等的表面特征。监测土壤盐渍化程度, 必须依据土壤特征直接推演或依据植被特征间接推演, 从而确定它们与反射率的关系<sup>[2 19]</sup>。

利用多光谱遥感数据探测盐渍土信息, 多数研究者运用了 K-L 变换、K-T 变换、土壤盐分指数、NDVI 监督分类法或结合非监督分类等方法。常通过实地调查或现有资料选取检验样本, 采用混淆矩阵的分析方法计算总分类精度以确定其可靠性<sup>[18 21 23]</sup>。前人的研究结果说明, 遥感数据的光谱和空间分辨率、地表景观、地貌形态、分类方法等对分类精度有一定的影响。另外, 地表土壤质地、土壤粒径与颜色、土壤湿度和有机质以及耐盐植被在一定程度上干扰或掩盖了盐分对土壤反射率的作用, 产生光谱混淆现象, 影响分类精度<sup>[19]</sup>。

高光谱遥感对每个像元能提供接近于实验室光谱质量的反射率, 具有不同于常规遥感图象的特征, 其处理方法也有别于常规的遥感图象处理方法<sup>[6 35]</sup>。在可见光和近红外波段能够快速低成本地提供样品的矿物及化学成分的信息<sup>[42]</sup>。对数据预处理、各波段信息量分析和面向分类目标的特征参数统计以实现波段优选, 是高光谱数据应用的前

提。目前的研究中广泛应用了光谱吸收特征分析技术、线性混合光谱分解技术及光谱特征自适应、光谱角制图、匹配滤波等制图方法<sup>[6 16 42]</sup>。相关性分析及多元逐步回归分析选择波段, 建立盐渍化预测方程, 进行定量半定量制图得到初步应用<sup>[18]</sup>。

## 4 2 展 望

随着现代科学研究对数据精度要求的提高, 依据遥感数据提取专题信息的理论和方法也在不断的更新与发展。遥感用于盐渍化的探测的发展趋势是结合 GIS 手段, 以遥感影像数据分析处理为依托, 以传统的野外调查为辅助, 将地理环境数据与影像光谱信息、空间信息和时间信息, 盐渍化程度状况的生物地学规律和其外在表现有机结合<sup>[21]</sup>; 已逐渐出现较为成熟的应用化的模式识别技术, 在算法上以知识库为基础的推理决策、多种复合分类方法相继产生并将迅速发展<sup>[43 44]</sup>; 特征提取和设计合理的分类器成为人们研究的热点。

高光谱数据的应用, 使得遥感定量化成为可能, 并已成为目前研究的热点。遥感理论模型与遥感应用模型的深化是定量遥感迫切需要解决的问题<sup>[45]</sup>。定量与半定量地探测土壤盐渍化, 首先要对高光谱图象进行大气校正以获取地表真实反射率图象。尽管许多学者致力于大气纠正方面的研究, 提出了多种大气纠正方法, 但精度还远远不够<sup>[45]</sup>。因此如何提高大气纠正的精度对定量化探测土壤盐渍化尤为重要。其次, 对盐分光谱特征作精细研究分析, 建立盐渍土成分及类型的识别谱系与识别规则, 选择探测盐渍土的最佳波段, 建立有效的盐渍土指数。研究影响土壤盐渍化的影响因子, 对采样点的地面观测数据作相关性分析, 确立权重及定量表达盐渍化程度的综合因子, 建立可靠的预测方程, 进行定量化制图。

植被的生物物理特性、植被指数与土壤盐分的关系, 以及如何充分利用植被这一间接指征, 揭示土壤表层与植被根部之间的土壤盐渍化状况, 扩展探测深度, 并为土壤改良、土地利用规划提供依据还有待进一步研究。

致谢: 感谢新西兰奥克兰大学地理系高家庆博士的建议。

## 参考文献:

[1] 朱庭芸. 灌区土壤盐渍化防治 [M]. 北京: 农业出版社, 1992 32~ 38

- [2] Sreenivas K, Venkataratnam L, Narasimha Rao P V. Dielectric properties of salt- affected soils[ J]. International Journal of Remote Sensing 1995, **16**(4): 641- 649
- [3] 崔保山, 刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策[ J]. 地理科学, 2001, **21**(3): 250~ 256
- [4] Taylor G R, Mah A H. Characterization of Saline Soils Using Airborne Radar Imagery[ J]. Remote Sensing of Environment 1996, **57**(3): 127- 142
- [5] 杨劲松. 土壤盐渍化研究展望[ J]. 土壤, 1995 (01): 23~ 27.
- [6] Dehaan R L, Taylor G R. Field- derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation- induced soil salinization[ J]. Remote Sensing of Environment 2002, **80**: 406- 418
- [7] Vema K S, Saxena R K, Barthwal et al Remote sensing technique for mapping salt affected soils[ J]. International Journal of Remote Sensing 1994, **15**(9): 1901- 1914.
- [8] Mettemicht G I, Zink J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[ J]. Remote Sensing of Environment 2003, **85**: 1- 20
- [9] 刘庆生, 刘高焕, 刘素红. 黄河口遥感图像光谱混合分解[ J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2001, **26**(3): 266~ 269.
- [10] 李取生, 袁善文, 邓伟. 松嫩平原土地次生盐碱化研究[ J]. 地理科学, 1998, **18**(3): 268~ 272
- [11] Rao B R M, Ravisankar T, Dwivedi R S et al Spectral behaviour of salt- affected soils[ J]. International Journal of Remote Sensing 1995, **16**(12): 2125- 2136
- [12] Khan Nasir M, Rastokuev Victor V, Shalina Elena V, et al Mapping salt- affected soils using Remote sensing indicators- a simple approach with the use of GIS [DR SI][ J]. Proceedings ACRS 2001- 22nd Asian Conference on Remote Sensing 2001, Singapore, **1**: 25- 29
- [13] Rao B R M, Dwivedi R S, Venkataratnam L, et al Mapping the Magnitude of Sodicity in Part of the Indo- Gangetic Plains of Uttar Pradesh, Northern India Using Landsat- TM Data[ J]. International Journal of Remote Sensing 1991, **12**(3): 419- 425
- [14] Triantafyllis J, Odeh I O A, McBratney A B. Five Geostatistical Models to Predict Soil Salinity from Electromagnetic Induction Data Across Irrigated Cotton[ J]. Soil Science Society of America Journal 2001, **65**: 869- 878.
- [15] Johnston M, Savage M, Moohan J et al Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements[ J]. Soil Science Society of America Journal 1997, **61**: 1627 - 1633.
- [16] Dehaan R, Taylor G R. Image- derived spectral endmembers as indicators of salinization[ J]. International Journal of Remote Sensing 2003, **24**(4): 775- 794
- [17] Ben- Dor R, Palkin A, Banin A, et al Mapping of several soil properties using DAIS- 7915 hyperspectral scanner data- a case study over clayey soils in Israel[ J]. International Journal of Remote Sensing 2002, **23**(6): 1043- 1062

- [ 18] Silvestri S, Marani M, Settl J et al. Salt marsh vegetation radiometry Data analysis and scaling [ J]. Remote Sensing of Environment, 2002, **80**: 473– 482.
- [ 19] Mettenicht G, Zinck JA. Spatial discrimination of salt- and sodium- affected soil surfaces[ J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, **18**( 12): 2571– 2586.
- [ 20] 关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[ J]. 遥感学报, 2001, **5**( 1): 46~ 52.
- [ 21] 骆玉霞, 陈焕伟. GIS支持下的TM图像土壤盐渍化分级[ J]. 遥感信息, 2000( 4): 12~ 15.
- [ 22] 宋长春, 邓伟. 吉林西部地下水特征及其与土壤盐渍化的关系[ J]. 地理科学, 2000, **20**( 3): 246~ 250.
- [ 23] 关元秀, 刘高焕, 王劲峰. 基于GIS的黄河三角洲盐碱地改良分区[ J]. 地理学报, 2001, **56**( 2): 118~ 205.
- [ 24] Karavanova E J, Shrestha D P, Orlov D S. Application of remote sensing techniques for the study of soil salinity in semi-arid Uzbekistan [ A]. In: Bridges EM, Hannan ID, O'Henan LR, et al. Response to Land Degradation[ C]. New Delhi: Indian Oxford & IBH Publishing Co Pvt Ltd, ISBN no. 2001- 81- 204- 1494- 2, 261– 273.
- [ 25] Mougenot B, Epema G F, Pouget M. Remote sensing of affected soils[ J]. Remote Sensing Review, 1993, **7**: 241– 259.
- [ 26] Howari F M. Reflectance spectra of common salts in arid soils (320– 2500 nm): application of remote sensing[ M]. USA: PHD thesis University of Texas at El Paso, 2001. 5.
- [ 27] Howari F M, Goodell P C, Miyamoto S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils[ J]. Journal of Environment Quality, 2002, **31**: 1453– 1461.
- [ 28] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near- infrared spectral features of salt crusts formed from different brines[ J]. Annali di Chimica, 2004, **94**( 4): 315– 323.
- [ 29] 霍东民, 孙家柄, 刘高焕, 等. 3S技术在黄河三角洲土壤盐分分析样点采集中的应用[ J]. 遥感信息, 2001, ( 2): 35~ 37.
- [ 30] Bui E N, Henderson B L. Vegetation indicators of salinity in northern Queensland [ J]. Austral Ecology, 2003, **28**: 539 – 552.
- [ 31] Fouad A I- Khaier. Soil Salinity Detection using satellite remote sensing[ M]. Master's thesis International institute for Geo- information science and earth observation, Enschede the Netherlands, 2003. 3.
- [ 32] Dwivedi R S, Rao B R M. The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt- affected soils [ J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, **13**( 11): 2051– 2058.
- [ 33] Saha S K, Kudrat M Bhan. Digital processing of Landsat TM data for wasteland mapping in parts of Aligarh District Uttar Pradesh, India [ J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, **11**: 485– 492.
- [ 34] 赵庚星, 窦益湘, 田文新, 等. 卫星遥感影像中耕地信息的自动提取方法研究[ J]. 地理科学, 2001, **21**( 4): 224~ 229.
- [ 35] 张定祥, 刘顺喜, 尤淑撑, 等. 基于机载成像光谱数据的宜兴市土地利用/土地覆盖分类方法对比研究[ J]. 地理科学, 2004, **24**( 2): 193~ 198.
- [ 36] Dwivedi R S, Sreenivas K. Image transforms as a tool for the study of soil salinity and alkalinity Dynamics [ J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**( 4): 605– 619.
- [ 37] 刘庆生, 骆剑承, 刘高焕. 资源一号卫星数据在黄河三角洲地区的应用潜力初探[ J]. 地球信息科学, 2000, **2**( 2): 56~ 57.
- [ 38] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectroscopy for Earth remote sensing[ J]. Science, 1985, **228**: 1147 – 1153.
- [ 39] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[ M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 115.
- [ 40] Howari F M. Comparison of Spectral Matching Algorithms for Identifying Natural Salt Crusts[ J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2003, **70**( 5): 782– 787.
- [ 41] Howari F M. The use of remote sensing Data to Extract information from agricultural land with emphasis on soil salinity[ J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, **41**: 1243– 1253.
- [ 42] Freek van der Meer. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery[ J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo information, 2004, **5**: 55 – 68.
- [ 43] 沙占江, 马海州, 李玲琴, 等. 多尺度空间分层聚类算法在土地利用与土地覆被研究中的应用[ J]. 地理科学, 2004, **24**( 4): 477~ 483.
- [ 44] 付炜. 土壤类型遥感识别推理决策器研究[ J]. 地理科学, 2002, **22**( 1): 72~ 78.
- [ 45] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[ M]. 北京: 科学出版社, 2004. 25~ 30, 309.

# A Review on Remote Sensing Technique for Salt-Affected Soils

WENG Yong-Ling<sup>1,2</sup>, GONG Peng<sup>1,3,4</sup>

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093; 2. Department of Surveying and Mapping Engineering, College of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096;

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101;

4. Department of Environment Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, USA)

**Abstract** Soil salinity is one of the major problems that affect crop growth and yield, and often lead to degradation of cultivated land. Recent advance in mapping and monitoring salt-affected soils by means of remote sensing has shown that this technology holds great promise in generating accurate results at enhanced speed and reduced cost. This paper first summarizes the role of ground data in detecting salt-affected soils, such as electrical conductivity of soils, underground water table, degree of mineralization, field-derived spectra of saline soils and vegetation. In situ collected and laboratory data are very important in mapping and detecting salinity based on remote sensing technique. This paper then discusses the spectral properties of salt-affected soils, visual interpretation of saline features from remote sensing images, and use of vegetation as an indirect indicator. Key issues in and approaches of identification and mapping of salt-affected areas based on remote sensing technique are reviewed next. This review reveals that a multiplicity of remotely sensed data has been employed widely to investigate, identify, and monitor the surface salinity status of soils and its spatial distribution. The obtained results have demonstrated the value of spectral reflectance data for the calibration of remotely sensed data, ascertained the optimal bands in detecting salt-affected soils using spectrum mixing, established training range selection and mapping methods based on hyperspectral data for the validation of the quantitative information extracted from satellite data. These studies have used digital image interpretation, image transformation, hyperspectroscopy techniques in combination with GIS in order to map the distribution of salt-affected soils. Some studies have shown that hyperspectral remote sensing data have been applied to study soil salinity at an increasing pace. This technology carries great promise in producing more detailed and accurate soil salt information.

**Key word** soil salinity; field data; remote sensing; hyperspectrum; detecting