滨海盐土遥感监测的发展趋势*

林 晨[1,2] 周生路[1†] 吴绍华[1,2]

（1 南京大学地理与海洋科学学院，南京 210093）

（2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008）

摘 要 重点阐述国内外滨海盐土遥感监测内容与监测技术的进展，指出尚存问题以及未来的发展趋势。近年来滨海盐土遥感监测，在空间识别上，从基于影像光谱及色相特征的目视解译向计算机自动判读逐渐演变；在盐土性质反演上，由离散样点的统计建模逐渐扩展为空间连续的智能反演；在盐渍化程度监测方面，正由单纯通过土壤理化性质表征盐渍化程度向滨海生态系统的综合监测方向发展。滨海盐土遥感监测深受水分、植被等因素的影响，还存在较大的不确定性，在反演精度、模型通用性以及数据管理上仍有很大发展空间。滨海盐土遥感监测正向时效性、动态性、智能化方向发展，建立多尺度空间的滨海盐土质量通用反演模型以及有效的海量盐土遥感数据管理机制将是未来研究发展的必然趋势。

关键字 滨海盐土；遥感；反演；盐渍化；监测

中图分类号 **S157.1** **文献标识码** **A**

滨海盐土由沿海地区的盐渍淤泥发育而成，含有大量的可溶性盐类。由于含盐量高，对作物生长有较强的抑制或毒害作用，使得该类土地生产力很低。我国滨海盐土在沿海各省都有分布，其中面积最大的是山东、江苏和浙江[1]。这类土壤资源拥有得天独厚的水热资源，所以其开发潜力巨大，很多地区已视其为后备耕地资源和畜牧业、养殖业、盐业的开发基地。随着我国沿海大开发战略的推进，滨海盐土将是未来重要的土壤资源，因此，滨海盐土研究一直受到重视。另一方面，滨海地区物质迁移转化频繁，人类活动响应剧烈，滨海盐土在自然和人为双重作用下演化相对快速，是研究土壤演化的理想类型。

近 30 年来，滨海盐土遥感监测内容与技术发展迅速。早先的研究通过多光谱影像特征进行滨海盐土区域分布范围的识别，为滨海盐土遥感监测技术的发展奠定了基础，但由于受空间分辨率的限制，区域分布范围的识别精度受到了影响，且难以向盐土性质反演的方向发展。随着高光谱技术的应用，盐土理化性质的遥感反演成为研究热点；进入 21 世纪，遥感技术和 GIS 技术等新技术与土壤资源学科逐渐加速融合，滨海盐土遥感监测重点转向土壤盐渍化程度和盐土土壤质量的定量表征，在农业可持续发展和生态环境建设中发挥更为重要的作用。总而言之，国内外滨海盐土的遥感监测的发展体现了时效性、精确性与智能化的特点，并呈现宏观-微观-宏观的发展态势[2-8]。

---

*土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所）开放基金课题（Y052010004）和江苏农用地质量动态监测研究项目（2004LY001）资助

†通讯作者，Email：zhousl@nju.edu.cn

作者简介：林晨（1984-），男，江苏南京人，博士研究生，主要从事遥感技术在土地利用与土地规划中的应用研究。Email：dreamlive_9@163.com

收稿日期：2010-09-05；收到修改稿日期：2011-01-04

在现有综述性研究中，关元秀 [7]从目视解译、数字图像处理 2 个方面阐述了盐渍化土壤遥感监测的技术进展，并简单介绍了遥感动态监测的方法。Metternich[8]从数据源、盐土制图等方面对盐土遥感监测研究进行总结，并提出现有研究在处理时间变化、植被光谱干扰上的不足。上述论文仅对泛指盐土进行综述，并集中描述具体的技术手段，未突出滨海盐土的特点以及遥感研究的总体态势。因此，本文试图从滨海盐土区域分布监测、性质反演以及盐渍化程度动态监测 3 个方面论述当前国内外滨海盐土遥感监测的研究进展，指出研究工作尚存问题和未来发展趋势，为有效进行动态、快速和大范围的盐土区域调查，合理利用并开发滨海盐土资源提供理论与科学依据。

1 滨海盐土区域分布遥感监测

20世纪70年代以来，多波段、多时相的遥感数据在滨海盐土空间范围识别中发挥着越来越重要的作用。近10年来，随着星载成像光谱仪的研究开展，高光谱技术不断发展并得到了广泛应用，其空间分辨率提升到了纳米（nm）数量级。与此同时，滨海盐土空间识别解译在技术手段上也得到了快速提升，基于影像色相以及光谱响应特征的传统目视解译向计算机自动判读逐渐转变。

1.1 基于色相与光谱特征的目视解译

针对滨海盐土地理环境景观特征[9]以及其盐碱化程度高的特殊性，目视解译常用的判别依据是图谱颜色与土壤在不同波段上的光谱响应特征[10-14]。Dehaan [10]认为通过植被信息提取盐渍土范围精度更高，从而采取间接解译的方法，首先利用1997年128通道的HyMap影像获取澳大利亚Murray–Darling流域5种耐盐植物的光谱信息，结果发现盐土植被在可见光与近红外波段有区别于一般植被的光谱信息，最终创造了利用植被提取盐土范围的方法，并利用解译结果编制了盐渍土空间分布图。Dwivedi [13]通过TM数据监测印度中部Indo-Gangetic冲积平原的盐渍土范围，证明TM数据1、3 和5 波段组合所含信息量最大，盐土识别的最佳波段合成方式是标准假彩色合成。上述研究都首先通过遥感影像以及地形图、土壤图和土壤调查报告等相关资料，从中提取影像特征(色调或色彩，即波谱特征）和空间特征(形状、大小、阴影、纹理、图形、位置和布局)，并通过野外调查验证，对解译结果进行必要的补充和修正[15]。它们充分利用了遥感影像提供的空间与属性信息，但受影像光谱分辨率与空间分辨率的限制以及主观因素的影响，它们在较为单一的内陆盐土地区有着较高的精度，但并不能满足滨海盐土地区较为复杂的地理环境的需要。

1.2 基于分类算法解译滨海盐土区域分布

相比于内陆干旱区盐土，滨海地区物质迁移转化频繁，多数盐土已经被开垦为耕地，植被覆盖率较高，因此滨海盐土的遥感解译难度较普通盐渍土高。早期的目视解译法易受主观因素影响，植被等地物的干扰也降低了其解译的准确性。20世纪80～90年代，计算机自动判别技术开始应用于滨

海盐土遥感解译的研究中，主要体现在利用专业软件进行光谱变换以及通过分类算法自动判别两个方面。

在光谱变换方面，主要方法有K-T变换、K-L变换、缨帽变换、HIS与PCA变换等[16-18]。关元秀等[18]通过20 世纪80 年代中期、90 年代中期和末期的3组TM遥感数据，基于地物光谱特征以及地下水监测数据，通过缨帽变换，以及对亮度、绿度和湿度分量假彩色合成，在遥感影像上提取滨海盐碱地信息，进行黄河三角洲各主要用地类型的解译制图，并与传统的目视解译法进行比较，结果证明原始方法的精度只有60%，而经过光谱变换后的解译精度达到了80%。

分类算法方面，研究首先通过野外调查和计算机预判读，建立盐碱土与影像特征之间的对应关系，然后选择训练样本进行统计分析，用适当的算法对遥感数据分类。较为传统的算法包括最大似然法、最小距离法、K-Means 法等。尹世源 [19]在 S101 图象处理系统上，对山东丁字湾陆地卫星影像进行一系列处理,通过最大似然法解译滩涂区域分布，结果证明在影像上的白色区域多为滨海盐土，而海水则呈浅灰色。这些算法的特点是图像分辨率越高，则分类越容易，但对同一地区范围，空间分辨率越高，像元数会成倍增加，大大增加了计算工作量。近 20 年来，计算机分类算法向智能化发展，并在方法与内容上不断更新，矢量机（Vector machine）和决策树等智能算法越来越普及。与此同时，为了提高解译精度，很多学者在分类算法中应用了计算机数字图像处理技术[20-21]，首先对不同时相的遥感数据进行几何校正和配准，然后对不同时相的影像进行辐射归一化处理。常用的辐射归一化方法有最大-最小归一化法、平均标准方差法、全景简单线性回归法和直方图匹配法等。最后通过逐个像元对比和分类后对比两种方法进行计算机自动识别。Dwivedi 等[2]采用主成分变换、影像差值法、影像比值法和分类后对比法，将 1975 年与 1992 年两个时相的 TM 影像应用于 Indo-Gangetic 冲积平原的盐碱土动态变化监测，发现这几种方法对监测盐碱土演变都有一定的效果，但对于有目的的演变监测，分类后对比法更合适。

2 滨海盐土理化性质的遥感反演

进入20世纪80年代末，滨海盐土遥感监测研究逐渐向土壤理化性质反演方向深入，主要研究对象是代表性强，时空变化剧烈，能够反映盐土特征的指标，包括土壤盐分及其相关的土壤质地和有机质含量等。

2.1 滨海盐土理化性质光谱反演

滨海盐土理化性质的光谱反演经历了多光谱向高光谱的转变，早期研究通过多光谱影像反演土壤性质，2000年左右，基于高光谱的滨海盐土性质反演研究得到了广泛普及，并逐渐形成较为完整的研究体系。

在多光谱影像反演土壤性质的研究中，曾志远[22-23]利用美国Landsat-1 1972年11月15日拍摄的

1:100万卫星图像，借助多元非线性回归方法，探测新疆南部塔里木盆地北缘盐渍土区土壤表层（0~20cm)有机质含量和全氮含量，把有机质含量和全氮含量表示成卫星图像四个波段辐射值的函数。此类研究为土壤性质遥感反演研究的进一步发展提供了方法和理论基础，但受光谱分辨率所限，精度上无法满足滨海盐土的研究要求。

20世纪90年代以来，高光谱遥感作为遥感学历史上一个概念与技术的创新开始广泛运用于土壤学研究。其能够提供最高l0nm分辨率的目标地物光谱信息，可以捕获地物识别标志性的光谱吸收带，在土壤性质反演上较之多光谱影像有着更强的准确性与时效性[24-25]。 很多学者通过土壤高光谱信息的获取开展了有机质、盐分等滨海盐土特征指标与采样点光谱之间定量关系的反演研究[26-28]。扶卿华利用野外样点的地面实测光谱数据建立土壤盐分含量的统计模型，并与Aster影像结合，利用该影像的反射率反演了渤海沿岸黄骅市滨海盐渍土的盐份含量，并提出植被指数（NDVI）对盐分遥感的干扰规律和适宜于盐分遥感的特殊波段，同时证实土壤盐分高低对飞蝗产卵地选择等方面有着直接影响[28]。

时至今日，滨海盐土理化性质的高光谱反演已经形成公认并且完整的研究体系。大多数研究虽然在高光谱信息的获取以及土壤性质的选择上各不相同，但是均基于以下工作流程：首先将土壤样本分为计算组样与验证组样，利用室内分析仪器测定滨海盐土指标值（水、有机质、盐分等）与计算样本，在一定波长范围内光谱曲线不同的变换形式进行比对分析，根据光谱反射率的波峰与波谷等特征选取各指标的敏感波段 。然后基于优势波段，建立数学模型，并通过验证样本进行验证，预测结果通过均方根误差（Root Mean-Square Error，RMSE）进行评价，具有最小RMSE的光谱波段或波段组合为所选择的波段或波段组合[29]，从而建立最佳反演模型。其中，光谱预处理和数学模型的选取是区分反演方法并影响反演精度的关键所在[30-33]。

经大量研究验证，可见光、近红外和中红外被公认为是土壤性质的重要响应波段[34-36],而从光谱的响应特征角度分析,随土壤水分的增加,土壤光谱反射率在整个波长范围内降低,尤其在760、970、1190、 1450、 1940 和2950 nm等水分吸收波段[37] 。土壤有机质含量与整个可见光波段的反射率、0.62~0.66 μm的反射率、0.6 μm处呈高度负相关(幂函数关系)[38] 。451.42~593.79nm的土壤反射率对盐分含量较为敏感，较适于反演土壤盐分含量。

2.2 滨海盐土理化性质区域分布反演

进入 21 世纪，盐土理化性质反演不再仅仅基于采样点的传统统计建模，而是向区域空间分布建模开拓。从机理上分析，GIS 空间信息技术以及计算机智能算法的快速普及与应用促成了这种转变。

利用 GIS 在时空数据处理与分析上的优势，一些研究通过多种空间插值算法，对遥感影像进行点到面的重构，实现盐土性质区域变异规律的预测[39-40]，严海兵[40]选取了中巴资源卫星(CBERS)2006 年至 2007 年间的 4 幅影像，以江苏省盐城市和南通市境内自海岸线向陆地 25km 范围内的滨海盐土

为研究对象，将地统计法与高光谱技术结合，分析了盐土有机质、速效磷、速效钾、pH 和电导率的空间变异程度，并采用普通克立格法(Ordinary Kriging)进行空间插值，得到各组土壤有机质含量的空间分布图，证明了滨海盐土养分含量会因土壤层面以及距离海岸线远近程度的不同而产生差异，有机质含量的等值线分布与海岸线走向较为吻合。另一方面，也有很多研究以计算机为载体，利用数据挖掘、神经网络、决策树等智能算法规则，将大量无序数据转换成有用的信息知识，达到盐土性质反演的目的。王耿明[41]首先以松辽平原八大盐基离子含量为参考值，估算盐碱土含盐量，然后利用 2001 年至 2005 年间的 4 幅 Aster 遥感影像，进行盐碱土光谱特征分析，以 Aster 影像的 1、2、3 波段作为输入，以含盐量作为输出，尝试构建基于 BP 神经网络的盐碱土含盐量遥感反演模型，通过对比发现反演模型精度比传统统计模型有了显著提高。

大量研究证明滨海盐土土壤有机质、水分的空间变异规律基本一致，离海岸线越远，有机质与水分含量越高，盐分含量则越低。在反演精度上，有机质含量估测的 R^2 值可达 0.96[42]，但盐分的反演受植被覆盖因素干扰较大，随着 NDVI 的减小，土壤光谱与土壤盐度的相关性有着明显增强的趋势。

3 盐渍化程度遥感监测

进入21世纪，随着我国沿海大开发的深入以及国家对土壤生产力状况关注度的提升，土壤盐渍化问题受到了更为广泛的关注[43]。土壤盐渍化是土壤以及周边自然生态环境各要素综合作用产生的，不同程度盐渍化土壤的治理、开发方式也存在区别，因此盐渍化程度的遥感监测是该地域滨海盐土合理利用开发的基础与前提，目前，研究正从通过土壤理化性质表征盐渍化程度的单一监测向以滨海生态系统为研究对象的综合监测转变。

3.1 基于土壤组分之间关系的盐渍化程度遥感监测

盐渍化程度遥感监测的早期研究以土壤本身为研究对象，借助星载高光谱遥感影像的多通道图谱特征，与土壤高光谱信息结合，建立室内土壤光谱-野外土壤光谱-遥感影像之间的互映射模型（图1），实现对滨海盐土盐渍化程度时空变化的监测[44-47]。张东[44]利用2007年江苏省射阳沿海滩涂的星载高光谱遥感影像Hyperion，根据低潮位下沉积物的短波红外光谱反射率与沉积物组分(砂、粉砂、黏土）含量之间的强相关关系，选择2102nm为特征波段，建立了高光谱定量遥感反演模型，获取初步的逐像元沙、粉砂和黏土含量，然后采用线性均衡化处理方法对初步反演结果进行修正，并结合 Shepard 三角分类法建立对照表，自动确定出每一像元对应的沉积物类型，从而得到滨海盐土盐渍化程度的分级结果，总体验证精度为87.19%。

此类研究实现了土壤性质高光谱空间反演向盐渍化程度监测的转变，研究体现出微观向宏观的发展趋势，但是滨海地区物质迁移转化频繁，土壤盐渍化程度也受多种因素影响，仅仅以土壤理化

性质为监测指标明显不够，研究需要面向整个滨海生态系统，以提高盐渍化程度监测的精度。

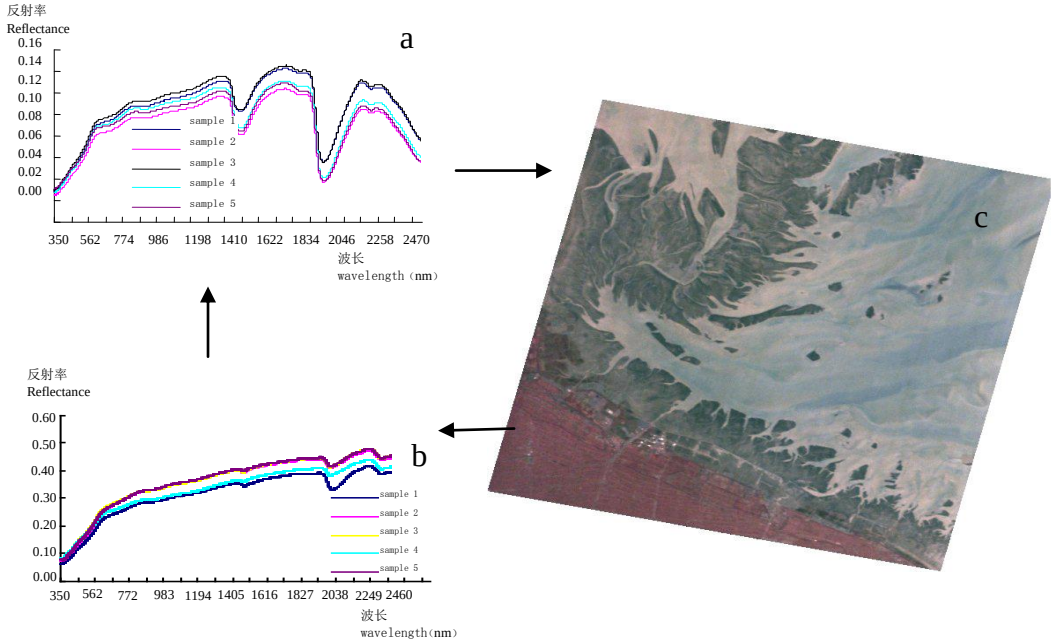

图 1 滨海盐土光谱与影像互映射模型（a 实验室光谱，b 野外光谱，c 卫星高光谱影像）

Fig. 1 Spectrum of coastal saline soil and image mutual mapping model (a spectrum obtained in lab; b. spectrum obtained in the field; c. satellite hyperspectral image)

3.2 基于滨海生态系统的多学科综合监测

随着学科之间联系与融合的深入，越来越多的学者意识到盐渍化程度不仅受土壤本身性质的影响，更与其所处的生态环境密不可分。因此，近年来很多研究通过多学科理论与技术的集成，对滨海地区生态环境进行系统化的监测与管理。研究内容主要分为两个方面，一是 GIS 与计算机科学在滨海盐土遥感研究中的进一步应用，主要体现为方法技术上的更新，二是地球物理、水文地理等学科的融合，主要体现为理念上的扩展。上述研究最终实现了基于滨海生态系统的土壤盐渍化程度与土壤质量的动态监测，取得了良好的研究成果。

一方面，很多学者利用计算机智能算法与 GIS 技术在集成并分析多种空间数据上的优势，通过一体化的管理模式将多源空间信息与地面土壤信息集成耦合，形成一套完整的滨海盐土盐渍化程度以及土壤质量管理与评价体系[48-49]。Corwin[47]指出利用 GIS 的空间信息集成，可以通过最小化的数据成本获取最大量的变量与敏感参数，并将地下水模型与 GIS 提供的空间信息集成，通过地下水流动来实时反演土壤盐分迁移，从而实现盐渍化程度的动态表征。Farifteh[49]以荷兰西北部的 Texel 岛屿以及匈牙利东北部的 Tedej 沿海区为研究区，基于 HyMap 影像，比较了偏最小二乘回归（PLSR）和神经网络（ANN）等较为通用的计算机智能算法在定量表征并预测盐土质量上的优劣，结果两者都能较好的拟合反射率与盐渍化程度之间的关系，其中 PLSR 精度略高，从而证明多元回归模型是

滨海盐土质量建模的最佳手段。另一方面，许多学者将植物学、地球物理学以及水文地理学的模型及技术应用到滨海盐土盐渍化程度以及质量监测中，电导率、磁化率、放射性以及地下水平衡、植被覆盖等要素常常被用作盐渍化程度的监测指标，研究领域得到了进一步扩展[50-53]。Silvestri[53]基于1998 年 9 月 MIVIS 卫星提供的高光谱影像与 DEM 地形数据，对意大利威尼斯湖流域的植被空间分布状况进行研究，证明了植被与盐渍化程度之间显著的相关性，并通过多元线性回归建立预测模型。

经大量研究验证，以水、有机质和盐分为代表的土壤理化性质以及以植被、气候、农业产值为代表的综合性因素被认为是表征滨海盐土盐渍化程度的关键指标。滨海盐土盐渍化程度越低，其土壤含水量、有机质含量越高，且农业产量越高。多数研究的平均精度在0.7左右，总体而言基于高光谱技术的滨海盐土盐渍化程度研究可以达到有效结果。

4 结论与展望

遥感数据源的更新与多学科技术的不断融合是促进近几十年来滨海盐土遥感研究迅速发展的关键因素。高光谱、高空间分辨率遥感数据源的出现以及多源遥感数据的广泛应用，在提高研究精度的同时，也使研究领域得以从滨海盐土的范围识别向土壤理化性质与盐渍化程度监测方向发展；GIS、计算机、地球物理等学科与遥感技术的不断融合，既使研究从土壤本身扩展到了滨海生态系统的层面，也为研究进一步充实提供了基础。总体而言，滨海盐土遥感研究的发展呈现出时效性、动态性、智能化的特点，但问题依然存在。首先，滨海盐土盐渍化程度以及土壤质量的表征缺少统一的空间多尺度定量模型，现有方法存在较大时空不确定性，使不同空间区域内的反演模型通用性不佳；其次，对逐年增多的大量盐土遥感数据缺乏有效的管理机制，不利于数据的充分利用。因此，滨海盐土在时空尺度上的动态定量监测以及数据与模型的系统化管理将是未来研究的重点，归纳为以下 3 个方面。

（1）多源遥感数据的有效应用。未来研究在遥感数据源方面，不仅要注重分辨率与精度的提升，更重要的是将高光谱与多光谱遥感数据合理结合，从而充分利用数据的光谱信息、空间信息和时间信息，并提高大气校正的精度，从而不断推动滨海盐土计算机判读技术向前发展。

（2）海量滨海盐土遥感与高光谱数据库的建立与管理。在提倡科学数据共享的未来，遥感工作者可掌握海量滨海盐土数据，但如今影像数据与光谱数据往往独立存在，如英国的萨特勒 Sadtler 光谱数据库等，这样无序且割裂的数据形式使研究无法形成完整体系，需结合 GIS 与计算机技术，以空间数据库的形式对这些数据进行集成与管理。浙江大学的农业资源信息数据库已经进行了较好的尝试，但如何建立完整的国家滨海盐土空间数据库，并向世界范围拓展，研究尚需在数据共享性以及存储机制上进一步加强。

（3）空间多尺度、高精度滨海盐土盐渍化程度与土壤质量评价模型。如今大多数评价模型仅仅针对研究区的小空间尺度，扩展性与通用性差，建立空间多尺度的评价模型可以满足不同空间区域的需要，是未来研究的发展趋势；同时，评价模型必须对多源遥感与 GIS 数据进行实时管理与更新，

从而保证研究准确性。

综上所述，随着高分辨率多源遥感数据的更新以及土壤学、遥感技术、地理信息技术的不断发展融合，滨海盐土的遥感研究将会继续沿智能化、时效性、动态性的方向发展，并最终为土壤的合理治理、开发以及滨海地区农业可持续发展服务。

致谢 本文得到中国科学院南京土壤研究所赵其国院士和其他老师的精心指导，在此一并致谢。

参考文献

［1］巴逢辰.中国海涂土壤资源.土壤通报, 1997,28(2):49-51. Ba F C. Tideland soil resources in China(In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1997,28(2):49-51

［2］Dwivedi R S, Sreenivas K. Image transforms as a tool for the study of soil salinity and alkalinity dynamics. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(4):605-619

［3］Dwivedi R S, Sreenivas K. Inventory of salt-affected soils and waterlogged areas:a remote sensing approach. International Journal of Remote Sensing, 1999,20 (8):1589-1599

［4］汪善勤, 舒宁. 土壤定量遥感技术研究进展. 遥感信息, 2007(6):89-93. Wang S Q, Shu N. A review on quantitative remote sensing technique of soil(In Chinese). Remote Sensing Information, 2007(6):89-93

[5] 田庆久. 遥感信息定量化理论、方法与应用. 遥感知识创新文集.北京:中国科学技术出版社,1999:20-29. Tian Q J. Quantitative theory, methods and applications of remote sensing(In Chinese). Proceedings of Remote Sensing Knowledge Innovation. Beijing: China Science and technology Press,1999:20-29

［6］浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京：高等教育出版社, 2000:115. Pu R L, Gong P. Hyperypevtral remote sensing and applications(In Chinese). Beijing:Higher Education Press, 2000:115

[7] 关元秀, 刘高焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述. 遥感技术与应用, 2001(3):40-44. Guan Y X, Liu G H. A review of regional soil salinization monitoring by remote sensing(In Chinese). Remote Sensing Technology and Application, 2001(3):40-44

［8］Metternicht G I. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Remote Sensing of Envirment, 2003,64(5):1-20

［9］Kalra N K, Joshi D C. Potentiality of Landsat, SPOT and IRS Satellite Imageries, for recognition of salt affected soils in Indian arid zone. International Journal of Remote Sensing, 1996,17(15):3001-3014

［10］Dehaan R L,Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil-salinizatlon. Remote Sensing of Environment, 2002,63(2):406-417

［11］Bui E N, Henderson B L.Vegetation indecators of salinity in northern Queensland. Austral Ecolgy, 2003, 28(9):549-552

［12］Dematt êJ A M, Fiorio P R, Ben-Dor E. Estimation of soil properties by orbital and laboratory reflectance means and its relation with soil classification. The Open Remote Sensing Journal, 2009, 2:21-23

［13］Dwivedi R S, Rao B R M. The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt-affected soils. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(11) : 2051-2058

［14］Rao B R M, Sankar T R, Dwivedi R S, et al. Spectral behaviour of salt-affected soils. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12):2125-2136

[15] 濮静娟. 遥感图像目视解译原理与方法. 北京:中国科学技术出版社,1992. Pu J J. The Principle and Method of Visual Interpreting from Remote Sensing Image(In Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1992

[16] 陈述彭. 国土普查卫星资料应用研究(第二集) . 北京:科学出版社,1989. Chen S P. The research of Territorial survey satellite data(The second set) （In Chinese）.Beijing: Science Press,1989

［17］彭望王彖, 李天杰. TM 数据的 Kauth-Thomas 变换在盐渍土分析中的作用- 以阳高盆地为例. 环境遥感, 1989, (3) : 183-190. Peng W L, Li T J. The effect of kauth-thomas transformation of TM data in the analysis of saline soil—An example in Yanggao basin(In Chinese). Remote Sensing of Environment China, 1989,(3):183-190

［18］关元秀, 王劲峰, 刘高焕. 黄河三角洲土地盐碱化遥感监测、预测和治理研究. 北京：中国科学院地理科学与资源研究所,2001:78-181 .Guan Y X,Wang J F, Liu G H. Remote sensing detection of dynamic variation of the saline land in the Yellow River Delta(In Chinese). Beijing:Institute of Geographic Sciences and Natural Resource.2001:78-181

［19］尹世源. 计算机最大似然法分类在海岸调查中应用的探讨. 海岸工程, 1983, (6) : 75-78. Yen S Y. Study on application of computer maximum likelihood classification on investigation of coastal zone(In Chinese). Coastal Engineering,1983,(6):75-78

［20］Singh A N, Kristof S J, Baumgardner M R. Delineating salt affected Soils in the Gangetic Plain India by digital analysis of Landsat Data. Purdue University Laboratory for Aplications of Remote Sensing.Technical Report, 1999:111—477

［21］赵立军. 基于 MODIS 数据的北京地区土壤含水量遥感信息模型研究. 北京:中国农业大学博士学位论文, 2004. Zhao L J. Research on the remote senseing information models of soil moisture based on MODIS data in Beijing(In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2004

［22］曾志远. 卫星图像土壤类型自动识别与制图的研究 : 计算机分类及其结果的光谱学和地理学分析. 土壤学报, 1984, 21 (2). 183-193. Zeng Z Y. Automatic recognition and mapping of soil types using Landsat images: Geographical analyses of the results(In Chinese). Acta Pedologica Sinica,1984,21(2).183-193

［23］曾志远. 卫星图像土壤类型自动识别与制图的研究 : 自动识别结果的成图及其与常规土壤图的比较. 土壤学报, 1985,22(3):265-273. Zeng Z Y. Automatic recognition and mapping of soil types using landsat image:Soil mapping based on the autiomatically recocnized categories and the maps optained in comparison with the conventional soil map(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1985,22(3):265-273

［24］程街亮. 土壤高光谱遥感信息提取与二向反射模型研究. 杭州 : 浙江大学博士学位论文，2008. Chen X L. Hyperspectral remote sensing information extraction and BRDF model of soil (In Chinese). Hangzhou :Zhejiang University, 2008

［25］徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. 土壤, 2000(6):281-287. Xu B B. The reflectance spectra of soil profile(In Chinese).Soils, 2000(6):281-287

［26］黄明样, 史舟, 李艳, 等. 基于地面光谱的海涂土壤开发程度评价研究一以浙江省上虞市海涂围垦区为例. 遥感学报, 2004, 8(4):378-384. Huang M X, Shi Z, Li Y, et al. Estimating reclamation level of saline soil using laboratory spectra(In Chinese). Journal of Remote Sensing, 2004, 8(4):378-384

［27］Cecillon L, Barthes B G, Gomez C, et al, Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) . European Journal of Soil Science, 2009, 60 (5): 770-784

［28］扶卿华. 土壤盐分含量的遥感反演及其在东亚飞蝗研究中的应用. 南京 : 南京师范大学博士学位论文, 2008. Fu Q H. Soil salt content inversion using remote sensing and its application in study on oriental migratory locust(In Chinese). Nanjing: NanJing Normal University, 2008

[29] 高永光, 胡振琪.高光谱遥感技术在土壤调查中的应用. 矿业研究与开发,2006,(1):44-46. Gao Y G, Hu Z Q. Application of hyperspectral remote sensing in soil investigation(In Chinese). Mining Research and Development, 2006,(1):44-46

［30］Leone A P, Sommer S, Multivariate analysis of laboratory spectra for the assessment of soil development and soil deg-

radation in the southern Apennines (Italy) . Remote Sensing of Environment, 2000, 72 (3), 346-359

[31] Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral analysis. Remote Sensing of Environment, 1998, 65 (2), 170-183

[32] 谢伯承，薛绪掌，刘伟东, 等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析. 土壤学报，2005, 42: 171-175. Xie B C, Xue X Z, Liu W D, et al. Hull-curve-method-based extraction and analysis of soil spectral characteristics(In Chinese). Acta Pedologica Sinica., 2005, 42: 171-175

[33] Ben-Dor E, Chabrillat S, Dematte J. Using imaging spectroscopy to study soil properties. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1):S38-S55

[34] Chang C W, Laird D. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of soil C and N. Soil Science, 2002,167(2):110-116

[35] 贺军亮，蒋建军，周生路, 等. 基于吸收特征参数的有机质含量光谱估算模型研究. 农机化研究, 2009,31(3):30-33. He J L, Jiang J J, Zhou S L, et al. Studying on retrieval of soil organic matter content using the absorption spectra(In Chinese). Journal of Agricultural Mechanization Research,2009,31(3):30-33

[36] Rossel R A V, Walvoort D J J, McBratney A B, et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 2006, 131 (12): 59-75

[37] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soil. Soil Science, 1965, 100: 130-138

[38] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Sci, 1981, 45: 1161-1165

[39] 李晓燕, 张树文. 吉林省大庆市近 50 年土地盐碱化时空动态及成因分析. 资源科学,2005.27(3):92-97. Li X Y, Zhang S W. Tempo-spatial dynamics and driving factors of saline-alkali land in Daan city of Jilin province(In Chinese). Resources Science,2005.27(3)：92-97

[40] 严海兵. 江苏滨海盐土养分空间变异研究. 南京:南京信息工程大学博士学位论文, 2008. Yan H B. Study of saline soil nutrient spatial variability in Jiangsu coastal area. (In Chinese) NanJing: NanJing University of Information Science&Technology, 2008.

[41] 王耿明. 基于 BP 神经网络的松辽平原盐碱土含盐量遥感反演研究. 长春:吉林大学博士学位论文, 2006. Wang G M. Research on remote sensing inversion of salt content in saline-alkali soil based on BP neural network in Songliao Plain(In Chinese). Changchun:Jilin Universtiy, 2006

[42]Fidencio P H, Poppi R J, De Andrade J C. Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near infrared spectroscopy. Analytica Chimica Acta, 2002, 453:125-134

[43] 陆登槐，郑学坚. 遥感技术在农业工程中的应用.北京:清华大学出版社,1997. Lu D H, Zheng X J. The application of remote sensing technology in agricultural engineering(In Chinese). Beijing:TsingHua University Press,1997

[44] 张东，张鹰，李欢，等. 基于组分反演的高光谱潮间带表层沉积物自动分类研究. 海洋学报，2008,30(13):62-70. Zhang D, Zhang Y, Li H, et al. Component content reversion based surface sediment classification in muddy intertidal flat by means of hyperspectral remote sensing data(In Chinese). Acta Oceanologica Sinica, 2008,30(13):62-70

[45] Doran J, W, Parkin T B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America Special Publication. SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 1996, 49: 25-37

[46] Weng Y L, Gong P, Zhu Z L, Soil salt content estimation in the Yellow River delta with satellite hyperspectral data. Canadian Journal of Remote Sensing, 2008, 34 (3): 259-270

[47] 张飞,塔西甫拉提.特依拜,丁建丽.渭干河一库车河三角洲绿洲盐渍化土壤特征研究.干旱地区农业研究,2007,25(2):146-161. Zhang F, Tashpolat Tiyip, Ding J L. Analysis on characteristics of soil salinization in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers(In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2007,25(2):146-161.

[48] Corwin D L. Applications of GIS to the modeling of nonpoint source pollutants in the vadose zone: A conference overview. Journal of Environmental Quality, 1996.25(3):403-411

[49] Farifteh J. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra:A comparison of two adaptive methods (PLSR

and ANN) . Remote Sensing of Environment, 2007,110 (1) :59–78

[50] Farifteh J. Assessing salt-affected soils using remote sensing,solute modelling,and geophysics. Geoderma 2006,130(3/4):191-206

[51] Howlett A, Roach M J, Reid J E. Geophysical characteristics of salinization at Cape Portland,NE Tasmania. Explor Geophys, 2001. 32: 214-218

[52] Sayse1 A K. A dynamic model of salinization irrigated lands. Ecological Modelling, 2001, 13(9):177-199

[53] Silvestri S. Hyperspectral remote sensing of salt marsh vegetation,morphology and soil topography. Physics and Chemistry of the Earth, 2003,28 (1/3) 15－25

Development of Remote-sensing Monitoring of Coastal Saline Soil

Lin Chen[1,2] Zhou Shenglu[1†] Wu Shaohua[1,2]

(1School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210093,China)

(2 The State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture,Institute of Soil Science,Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract This review elaborates contents of remote-sensing monitoring of coastal saline soil and advancement in monitoring technology at home and abroad, while pointing out existing problems and future development trendr. In recent years, the technology of space identification in remote-sensing monitoring of coastal saline soil has gradually evolved from visual interpretation based on image spectrum and hue characteristics towards computer automated interpretation; in inverting coastal saline soil properties, from statistical modeling based on discrete samples to spatially continuous intelligent inversion; in monitoring salinization degree, from mere characterization of salinization degree with soil physical and chemical properties to monitoring of overall coastal ecosystems. However, remote-sensing of the coastal saline soil is deeply affected by factors, like soil moisture, vegetation, etc., and subject to large spatial uncertainty. Therefore, the research still has much room for development in inversion accuracy, model universality and data management. To sum up, the remote-sensing monitoring of coastal saline soil is developing towards of timeliness, dynamicity and intelligentization. It is an inevitable trend of the research in this field in future to build up a multi-scaled general model for inversion of quality of coastal saline soil and efficient mechanism for management of mega-store of saline soil remote-sensing data.

Key words Coastal saline soil; Remote sensing; Inversion; Soil salinity; Monitoring