

文章编号: 1007-4619(2004)-04-0378-07

基于地面光谱的海涂土壤开发程度评价研究

——以浙江省上虞市海涂围垦区为例

黄明祥, 史舟, 李艳, 吴曙雯

(浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310029)

摘要: 过去30年间, 浙江沿海滩涂地不断地被围垦成农用地。为了科学地掌握海涂土壤的变化规律, 讨论了地面光谱评价海涂土壤开发程度的可行性。以浙江省上虞市北部海涂围垦区作为研究区域, 根据围垦历史时间的不同, 将研究区划分成4个子区域。借助GPS定位, 样区内大致间隔1km进行混合采样。分别在实验室内测定土壤理化性质和土壤光谱反射率。理化性质分析结果表明海涂土壤有机质含量低, 电导率和含砂量高, 并且随着围垦时间的增长呈现出规律性的变化。9个吸收波段与土壤电导率、阳离子交换量和机械组成的Person相关分析表明, 海涂土壤砂粒、粉粒含量与各波段相关性显著。依据不同围垦历史, 对所有土样进行分组, 并进行逐步判别分析。判别结果表明, 处于不同围垦区并具有不同改良程度的土样, 其光谱数据具有很好的类可分性。对原始样点数据回代到Fisher判别函数可以获得86.8%的判别精度, 而对28个待判土样代入判别函数可获89.3%的判别精度。从地面光谱研究结果可见, 相比于常规的野外耗时调查, 星载或机载遥感探测器有可能作为大范围快速评价盐碱土开发程度的有效潜在工具。

关键词: 海涂盐碱土; 光谱; 围垦程度; 预测; 逐步判别分析

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引言

在过去的30多年内, 为了缓解有限的土地资源 and 经济不断发展之间的矛盾, 浙江沿海许多地区通过不断围垦海滩来增加耕地面积^[1]。为了更加合理地开发和利用海涂围垦区, 需要对海涂土壤的理化性质及其变化进行研究。作为反映土壤理化性质变化规律的海涂土壤围垦开发程度, 对其应有快速而全面的认识, 从而为更好掌握现有海涂资源以及更加合理地利用海涂土壤资源提供有效的信息。

传统的区域土壤盐渍化状况是通过野外土壤调查分析得到, 不仅费时、费力, 而且测点少, 代表性差, 无法实现大面积动态监测。遥感由于能够大面积、重复获取区域多波段、多时相的信息, 为大面积实时动态监测盐渍土状况提供了可能^[2]。其中, 高光谱分辨率遥感作为一种手段, 可以用来提供土壤表面状况及其性质的空间信息, 亦可用于评价探测

土壤性质细微差异的潜力^[3]。国外从20世纪60年代初起就开展了土壤光谱反射特性及其应用的研究, 如Stone和Baumgardner在实验室用光谱仪在0.52 μ m到2.32 μ m光谱范围测定485个土样的二向性反射光谱, 并将这些光谱归纳和描述为5类土壤反射光谱曲线^[4]; Jong分析光谱数据用于地中海地区侵蚀土壤板结和土壤类型成图研究^[5]; Leone和Sommer应用实验室光谱进行多元统计分析以评价土壤开发和土壤退化程度^[6]。国内从20世纪70年代初也有相关的研究, 如王人潮等根据360—2500nm的土壤光谱反射率, 划分不同的土壤类型^[7]; 孙毅和林培对盐渍土土壤光谱反射率与表土含盐量关系进行研究^[8]; 吴景贵等应用红外光谱对土壤有机质进行研究^[9]。本研究以浙江省上虞市海涂围垦区作为研究区, 进行野外采样, 室内理化分析和光谱测定, 分析海涂盐土理化性质和光谱特性, 以及应用多元统计方法评价海涂土壤开发程度。

收稿日期: 2002-11-11; 修订日期: 2003-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40001008)、中德合作项目(BMBF-AZ39742)、浙江省重点科技计划项目(001110445)。

作者简介: 黄明祥(1978—), 男, 在读硕士生, 主要从事土壤遥感、地理信息技术应用等, 已发表论文4篇。

2 材料和方法

2.1 研究区

本研究区是在不同围垦历史条件下形成的海涂盐土, 位于杭州湾的南岸, 浙江省上虞市北端(30°4′00″N, 120°38′32″E, 30°13′47″N, 120°51′53″E), 面积26061hm²(图1)。该区土壤主要由近代河海相沉积



图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of study area

物堆积发育而成, 土壤质地以砂土或砂壤土为主。气候属亚热带季风区, 年均温 16.50℃, 年降雨量 1300mm。

为方便研究海涂土壤开发程度, 需要对研究区进行分区。一般不同分类分级和评价目的下的土壤开发程度, 具有不同的分级评价方法和因子。如 Csillag 以电导率 0.4S/m 作为盐土与非盐土的分界点^[10]。彭望^[11]比较精确进行了盐渍化分级图, 其分级标准按表层含盐量大于 1% 和 0.6%—1% 分别为盐土和重度盐化土; 含盐量 0.4%—0.6% 为中度盐化土; 含盐量 0.1%—0.4% 为轻度盐化土; 含盐量小于 0.1% 为非盐化土^[11]。在本研究区, 土壤理化性质受众多因素的影响, 如成土母质、围垦历史、改良管理水平、土壤利用类型等。其中成土母质、人为围垦及管理条件基本相同, 围垦历史能反映不同围垦区土壤理化性质差异, 并且对土壤的改良程度、土壤的利用类型具有重要的指示意义, 所以本研究区根据海涂围垦历史来进行分区。

依据围垦历史时间的不同, 将研究区划分成如下 4 个子区域(图 2): 1996 年围垦的子区域 A; 1991 年围垦的子区域 B; 1981, 1984 年围垦的子区域 C; 1969, 1970, 1975 和 1977 年围垦的子区域 D。



图2 4个子区域及其土壤采样分布图

Fig. 2 Four sub-zone distribution and soil sampling position

2.2 土壤采样及分析

借助 Magellan 全球定位仪, 以大致 1km 为采样

间距, 于 2001 年 4 月 26 日和 29 日在样区共采集 68 个样品。其中子区域 A、子区域 B、子区域 C 和子区域 D 分别采集 15, 14, 13 和 26 个土样, 具体采样点

分布见图 2。每个样点采用 10m×20m 内 5 点采样法(0—20cm 表土)。样品自然风干后,采用直径 2mm 筛孔过筛后分成两组,一组用于土壤理化性质分析,另一组用于室内光谱测定。

为了检验的需要,2002 年 4 月 28 日,在子区域 A 采集 10 个土样作为检验样区 1,子区域 C 采集 10 个土样作为检验样区 2,和研究区相邻的围垦历史与子区域 D 相同的余姚市海涂围垦区(围垦于 1976 年和 1974 年)采集 8 个土样作为检验样区 3。其土

样采集、分析方法与前者相同。

2.2.1 土壤理化性质分析

理化性质由浙江大学资源科学系协助完成,共测定了有机质含量、pH、阳离子交换量、总氮、电导率、机械组成等 6 个土壤理化指标(表 1)。pH 测定用水提悬液 pH 计法测定,有机质用重铬酸钾外加加热法,总氮用半微量开氏法,阳离子交换量用 1 N 中性醋酸铵法,电导率用 5:1 水土比法,机械组成用比重计法。

表 1 研究区及 4 个子区土壤理化性状

Table 1 Descriptive statistics of the physical and chemical characteristics of the saline soil

子区域	围垦时间	土壤类型	理化性质								
			有机质/%	pH	阳离子交换量/(mol/kg)	总氮/%	电导率/(μ S/cm)	机械组成			
								0.02—2mm/%	0.02—0.002mm/%	<0.002mm/%	
子区域 A	1996 年	海积潮湿正常盐成土(15 个土样)	平均值	0.8	8.04	8.9	0.04	632.0	86	9	5
			标准差	0.2	0.3	1.2	0.02	370.6	8	7	2
			变异系数/%	24.6	3.73	14.1	41.1	58.6	9.5	74.5	40
子区域 B	1991 年	海积潮湿正常盐成土(14 个土样)	平均值	0.6	7.76	10.4	0.07	382.2	69	23	8
			标准差	0.2	0.19	1.2	0.02	212.7	14	12	3
			变异系数/%	28.3	2.45	11.5	28.6	55.7	20.3	52.2	37.5
子区域 C	1984 和 1981 年	石灰淡色潮湿锥形土(13 个土样)	平均值	0.7	7.73	9.0	0.09	294.2	68	26	6
			标准差	0.1	0.15	1.0	0.01	175.5	5	5	1
			变异系数/%	16.0	1.94	11.1	11.1	59.7	7.4	19.2	16.7
子区域 D	1969—1977 年	弱盐潮湿正常盐成土(26 个土样)	平均值	0.6	7.70	11.1	0.10	171.6	65	29	6
			标准差	0.1	0.13	1.1	0.01	96.4	7	6	1
			变异系数/%	23.5	1.69	9.9	10.0	56.2	10.8	20.7	16.7
研究区	1969—1996 年	共 68 个土样	平均值	0.7	7.79	10.0	0.08	339.9	71	23	6
			标准差	0.2	0.28	1.5	0.03	260.9	12	11	2
			变异系数/%	26.3	3.59	15.0	37.5	76.8	16.9	47.8	33.3

2.2.2 光谱测定

土壤光谱采用背挂式 ASD 满光谱范围(350—2500nm)野外光谱辐射仪(ASD FieldSpec Pro FR)在实验室条件下,测定其与参考板反射比。ASD FieldSpec Pro FR 光谱仪有较高的抽样间隔和光谱分辨率,在 350—1000nm 抽样间隔和光谱分辨率分别为 1.4nm 和 3nm,而相应的抽样间隔和光谱分辨率在 1000—2500nm 为 2nm 和 10nm。将过筛后的土样装成 1.5cm×7cm 大小,水平放置于实验桌,探头距土样表面的垂直距离为 35cm。光谱测试在等同于暗室的实验室进行,采用美国 Ushio 公司产 A128930 型钨灯为室内试验用照明光源,光源与土样测试点夹角为 30°。

光谱仪进行优化后,测试优良朗伯性漫射材料聚四氟乙烯标定白板反射率(美国 Labsphere 公司产),然后,测试土样光谱反射率,接着再测试标准白板反射率,依此测试所有土样。为减少误差,每个土样测 4 个不同方向上的土壤反射率。取土样光谱反射率与标准白板反射率之比作为该土样光谱反射比。

2.3 波段选择及多元统计分析

光谱数据波段众多,数据量庞大。从中选择能够反映土壤性质差异的最佳波段,对土壤光谱分析、土壤遥感解译等具有重要意义。通常较为常用的波段提取方法有特征波段、平均波段、TM 或 MSS 等传

传感器相应波段以及波段选取模型等。依据所选波段,应用主成分分析,以进行土壤光谱的物理意义分析及其应用,最具代表性^[12,13]。

本研究在综合考虑波段选择对分类精度影响基础上,根据以前的相关研究,选取 Leone 和 Sammer 评价土壤开发和退化程度所选用的 9 个特征吸收波段(488nm, 530nm, 670nm, 880nm, 940nm, 1400nm, 1900nm, 2200nm, 2300nm),作为多元统计分析变量^[9]。在对主成分分析和其他方法对分类精度影响的比较下,选择多元逐步判别分析评价海涂土壤开发程度。

3 结果与分析

3.1 海涂土壤理化性质

由近代河海相沉积物堆积发育而成的海涂盐碱土,随着人类不断的围垦开发和利用,呈现出一些特殊的理化性质(表1)。表现为,68个土样平均pH值为7.79,呈弱碱性;有机质、总氮含量较低,平均含量分别为0.7%和0.08%;阳离子交换量平均值为10.0mol/kg;由于人为洗盐、脱盐及开发利用,电导率相比其他海涂土壤低,平均为339.9 μ S/cm;海涂土壤砂粒含量(0.02—2mm)高,平均达71%。

由于围垦历史的长短和利用方式的不同,海涂土壤理化性质呈现出规律性变化。其中最为显著的是随着围垦历史的生长,砂粒含量逐渐递减,从子区域A的86%,迅速下降到子区域B的69%,子区域C的68%和子区域D的65%。与之相应的土壤粉粒含量逐渐上升,而粘粒含量变化不大。从变化规律可以看出,相比未利用的子区域A,已利用的子区域B、C和D含砂量明显降低,但子区域B、C和D之间的变化不大,说明种植利用对其机械组成具有明显的改良作用。围垦历史的不同对土壤有机质、总氮也有显著的影响,围垦时间越长,其含量也越高。作为反映海涂土壤性状重要因子的电导率,在子区域A较高,平均达632 μ S/cm。随着围垦历史增长其含量不断降低,其中,从子区域A到子区域B下降幅度最大,可见,围垦时的人为洗、脱盐措施对降低海涂土壤含盐量具有明显的效果。与其他研究一样,本研究区土壤pH呈弱碱性,并随围垦时间增长不断降低。本研究区土壤阳离子交换量,变化规律不明显,但总体趋于升高。

3.2 海涂土壤光谱特性

目前,普遍认为土壤的有机质含量、含水量、氧

化铁含量、机械组成、母质、土壤颜色、土壤含盐量等是影响土壤光谱特性的主要理化性状^[14,15]。然而,不同母质、不同历史条件下形成的土壤,影响其光谱反射特性的主要理化性质也不同。为揭示海涂土壤光谱特性,对所选的9个波段与68个土样电导率、阳离子交换量以及机械组成进行了Pearson相关分析。分析结果见表2。据Baumgardner等研究,土壤有机质的含量在大于20%时,其与光谱反射率之间相关性较好,而含量小于20%时,其它土壤理化性质对光谱的影响将会掩盖土壤有机质对光谱的影响^[16]。本研究区土壤有机质含量较低,故没有对土壤有机质进行相关分析。反映盐分含量的电导率,在去除其它因素的影响下,Szilagy对6个不同土壤进行了9个不同盐分的批处理,认为依据所选的光谱波段可以很好地区分含盐量不同的土壤^[17]。本研究土壤电导率仅与488nm、530nm和940nm相关性显著。土壤光谱特性是土壤理化性质综合作用的结果,研究区内土壤经脱盐、洗盐后,其含盐量不高、以至电导率与其它波段之间的关系并不明显。根据季耿善等对宁芜地区不同土壤类型、不同粘土矿物类型和不同发生层的95个样品进行相关分析表明,1900—2300nm各波长上反射率与阳离子交换量呈负相关^[18],然而在本研究中,阳离子交换量与488nm和530nm波段上的反射率呈负相关,而与2300nm呈正相关,与1900nm、2200nm相关性不显著。研究区土壤机械组成是土壤理化性质最显著的特征,其砂粒含量较高。土壤机械组成是影响土壤光谱反射特性重要因素。一方面颗粒大小的不同,会造成表面具有不同的粗糙度,二是颗粒大小会间接影响土壤持水能力,从而产生间接影响。Bowers等发现,随着颗粒的变细,反射率会呈指数增加^[19]。但有文献报道,土壤中粘粒、粉砂和砂粒的相对比例,影响着反射率的变化,表现在随着粘粒含量的增加,反射率明显下降;而随着粉砂和砂粒含量的增加,反射率明显地增大^[12]。本研究区砂粒和粉粒与9个波段都呈显著的相关性,粘粒只与可见光的前二个波段有相关性。砂粒与可见光的488nm和530nm呈正相关,与其它波段呈负相关,而粉粒则成相反的相关性。正好与4个子区域的平均光谱曲线关系(图3)相吻合。如子区域A的砂粒含量最高,其在近红外波段范围内的光谱反射率则最低,而大约在600nm之前的可见光范围内其反射率最高。从图3可以看出,大约在600nm处存在这一转折点。机械组成对海涂土壤光谱的这种影响可能与海涂土

壤盐分有关。对影响海涂土壤光谱特性的理化因子 分析还有待进一步研究。

表 2 土壤理化性质与 9 个波段的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between wavelength bands and soil properties

相 关 系 数 土壤理化性质	波 长 / nm	488	530	670	880	940	1400	1900	2200	2300
电 导 率		0.539 **	0.436 **	—	—	-0.268 *	—	—	—	—
阳 离 子 交 换 量		-0.554 **	-0.470 **	—	0.322 *	0.336 *	0.322 *	—	—	0.284 *
	0.02—2mm	0.533 **	0.373 **	-0.407 **	-0.5 **	-0.507 **	-0.493 **	-0.405 **	-0.408 **	-0.419 **
	0.02—0.002mm	-0.513 **	-0.324 *	0.479 *	0.574 **	0.58 **	0.574 **	0.495 **	0.5 **	0.507 **
	< 0.002mm	-0.36 **	-0.411 **	—	—	—	—	—	—	—

*, ** 分别表示显著性水平为 5%和 1%; — 表示无显著性水平。各理化性质单位与表 1 相同。

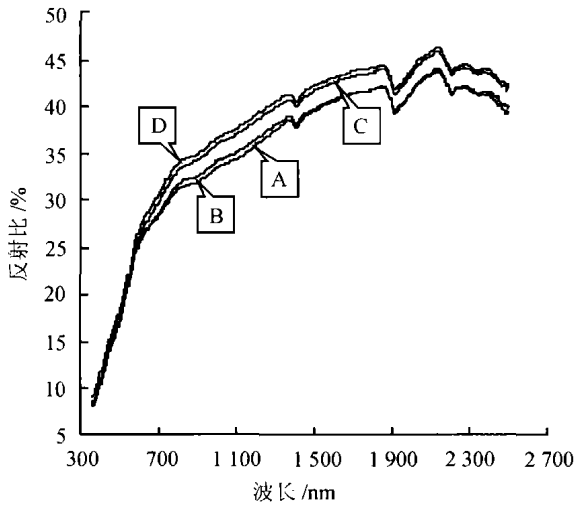


图 3 4 个子区域平均光谱曲线

Fig 3 Average spectral reflectance curves of four sub-zones

3.3 逐步判别分析预测海涂土壤开发程度

土壤光谱是土壤各理化性质综合作用的结果,也是土壤基本性质之一。各子区域围垦历史水平和利用方式的不同,造成各子区域理化性质不同,从而各子区域土壤光谱曲线亦有差异。各子区域平均光谱反射曲线能够反映出不同围垦历史下的海涂土壤的光谱特性(图 3)。

使用统计软件 SPSS 对所测光谱数据进行多元逐步判别分析。在划定的 4 个子区域基础上,对所选择的 9 个特征波段进行逐步判别分析^[20]。

逐步判别分析的基本情况为:辨别组数 $L=4$, 辨别变量数 $V=9$, 各已知组中样品数 $N_A=15$, $N_B=14$, $N_C=13$, $N_D=26$, 样品总数为 68 个。待辨别样品数为 28 个。应用马氏距离作为变量逐步提取方法,取引入和剔除变量的临界值 $F_1=3.84$ 和 $F_2=2.71$ 。其结果见表 3。

表 3 逐步引入变量结果

Table 3 The result of variables entered

引入变量步骤	1	2	3	4	5	6
引入的变量波长/nm	880	670	1900	1400	530	488
各变量进入模型时 Wilks' s λ 值	0.6613	0.3223	0.2604	0.1998	0.1469	0.1040
显著性检验 F 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

根据模型中确定的 6 个变量推导出 Fisher 线性判别函数。4 组判别函数分别如下:

子区域 A 的判别函数:

$$F_A = -68.276 \times \lambda_{488nm} + 105.845 \times \lambda_{530nm} - 8.054 \times \lambda_{670nm} + 17.077 \times \lambda_{880nm} - 49.62 \times \lambda_{1400nm} + 44.434 \times \lambda_{1900nm} - 598.468$$

子区域 B 的判别函数:

$$F_B = -86.376 \times \lambda_{488nm} + 116.864 \times \lambda_{530nm} - 5.662 \times \lambda_{670nm} + 13.919 \times \lambda_{880nm} - 50.86 \times \lambda_{1400nm} + 47.777 \times \lambda_{1900nm} - 564.42$$

子区域 C 的判别函数:

$$F_C = -101.947 \times \lambda_{488nm} + 134.491 \times \lambda_{530nm} - 12.594 \times \lambda_{670nm} + 25.315 \times \lambda_{880nm} - 66.588 \times \lambda_{1400nm} + 57.834 \times \lambda_{1900nm} - 633.256$$

子区域 D 的判别函数:

$$F_D = -117.775 \times \lambda_{488nm} + 154.921 \times \lambda_{530nm} - 32.049 \times \lambda_{670nm} + 39.273 \times \lambda_{880nm} - 70.323 \times \lambda_{1400nm} + 59.562 \times \lambda_{1900nm} - 615.58$$

Fisher 判别准则为:将实测的 6 个波段数据代入以上 4 个函数,得到 4 个函数值,比较 4 个函数值,

哪个函数值大, 被测的土壤样本就属于哪一类。对原分组数据进行回判, 判别结果见表4。对28个待

判别土样代入 Fisher 判别函数进行判别分析。结果如表5。

表4 原始样点的 Fisher 线性函数回判结果

Table 4 The classification results of Fisher's linear discriminant functions

子区域	判别函数判别分组情况					总体精度/%
	子区域 A	子区域 B	子区域 C	子区域 D	精度/%	
子区域 A	14	1	0	0	93.3	86.8
子区域 B	1	11	2	0	78.6	
子区域 C	0	0	11	2	84.6	
子区域 D	0	2	1	23	88.5	

表5 待判别土样分类统计

Table 5 The classification results of soil samples not involved in the stepwise discriminant analysis

检验样区	判别函数判别分组情况					总体精度/%
	子区域 A	子区域 B	子区域 C	子区域 D	精度/%	
检验区 1	10	0	0	0	100	89.3
检验区 2	0	0	8	2	75.0	
检验区 3	0	0	1	7	85.7	

由于影响土壤光谱特征的因素较多, 以及土壤采样点和波段选取的影响, 存在少量样本错分。但从原始分组样本以及待判别样本的总体辨别精度可以看出, 利用地面光谱数据可以很好地预测海涂土壤的开发程度。

4 结论与讨论

不同围垦历史条件下的海涂土壤, 其理化性质不同。随着围垦历史的增加, 土壤理化性质表现出一定的规律性。土壤有机质、总氮含量较低, 并随着围垦历史的增加不断升高。人为改良对土壤电导率的下降起很大作用, 并随着不断的耕作利用, 电导率不断降低。其中, 土壤理化性质中最为显著的是土壤机械组成, 土壤含砂量高, 并随围垦历史增加, 砂粒含量不断降低。而整个研究区土壤粘粒含量较低, 不同围垦区其含量也变化不大。

作为滨海盐土理化性质综合反映的土壤光谱, 同样具有很好的规律性。据所选的九个波段与电导率、阳离子交换量以及机械组成的 Pearson 相关系数可见, 反映土壤含盐量的电导率, 与可见光波段的 488nm、530nm 和 940nm 相关性显著。土壤砂粒、粉粒含量与各波段相关性显著, 表现为土壤砂粒含量与前二个可见光波段呈正相关, 与其他波段呈负相关, 而土壤粉粒含量与各波段的相关性正好与此相反。由此可见, 海涂盐土砂粒含量越高, 在可见光波

段反射率越高, 而在近红外波段反射率越低。大约在 600nm 处存在这一转折点。

依据海涂土壤光谱随围垦历史表现出的差异性, 按不同围垦历史, 对所有土样进行分组, 并进行逐步判别分析。判别结果表明, 处于不同围垦区并具有不同改良程度的土样, 其光谱数据具有很好的类可分性。基于研究获得的 fisher 判别函数, 对周边围垦地区的盐碱土可采用地面光谱数据对其改良程度做出快速评价。从地面光谱研究结果可见, 相比于常规的野外耗时调查, 星载或机载遥感探测器有可能作为大范围快速评价盐碱土开发程度的潜在有效工具。

参考文献(References)

- [1] Shi Z, Wang R C, Huang M X. Detection of Coastal Saline Land Use with Multi-temporal Landsat Image in Shangyu City, China[J]. *Environmental Management*. 2002, 30(1): 142-150.
- [2] Guan Y X, Liu G H. A Review of Regional Soil Salinization Monitoring by Remote Sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2001, 16(1): 40-44. [关元秀, 刘焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(1): 40-44.]
- [3] Pu R L, Gong P. Hyperspectral Remote Sensing and its Applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [浦瑞良, 宫鹏. 光谱遥感及其应用[M] 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [4] Stone E R, Baumgardner M F. Characteristic Variations in Reflectance of Surface Soils[J]. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 1981, 45: 1161-1165.
- [5] Jong, S D M. The Analysis of Spectroscopical Data to Map Soil Types and Soil Crusts of Mediterranean Eroded Soils[J]. *Soil Technology*,

- 1992, 5: 199—211.
- [6] Leone A P, Sommer S. Multivariate Analysis of Laboratory Spectra for the Assessment of Soil Development and Soil Degradation in the Southern Apennines (Italy) [J] . *Remote Sens. Environ.*, 2000, 2: 346—359.
- [7] Wang R C, Su H P, Wang S F. Study on Spectral Reflectance of Typical Soil and its Fuzzy Category in Soil Classification in Zhejiang Province [J] . *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis*. 1986, 12(4): 464—471. [王人潮, 苏海萍, 王深法. 浙江省主要土壤光谱反射特征及其模糊分类在土壤分类中的应用研究. 浙江农业大学学报, 1986, 12(4): 464—471.]
- [8] Sun Y, Lin P. The Relationship Between the Reflectance Ratio of Saline Soils and the Saline Content of Top Soils [J] . *Shanxi Agriculture Science*, 1991, 8: 19—20. [孙毅, 林培. 盐渍土土壤光谱反射率与表面含盐量的关系 [J] . 陕西农业科学, 1991, 8: 19—20.]
- [9] Wu J G, Xi S Q, Jiang Y. Infrared Spectroscopy Application in Soil Organic Matter, *Spectroscopy and Spectral Analysis* [J] , 1998, 18(1): 52—57. [吴景贵, 席时权, 姜岩. 红外光谱在土壤有机质研究中的应用 [J] . 光谱学与光谱分析, 1998, 18(1): 52—57.]
- [10] Csillag F, Pásztor L, Biehl L L. Spectral Band Selection for the Characterization of Salinity Status of Soils [J] . *Remote Sens. Environ.*, 1993, 43: 231—242.
- [11] Peng W L. An Experiment of Remote Sensing and GIS Based on Quantity of Soil Salinity [J] . *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3): 237—240. [彭望 . 土壤盐渍化量化的遥感与 GIS 实验 [J] . 遥感学报, 1997, 1(3): 237—240.]
- [12] Palacios-Onueta A, Uatin S L. Remote Sensing of Soil Properties in the Santa Monica Mountains I. Spectra Analysis [J] . *Remote Sens. Environ.*, 1998, 65: 170—183.
- [13] Xu B B. Research of China's Soil Spectral Line [J] . *Remote Sensing of Environment China*, 1991, 6(1): 61—71. [徐彬彬. 我国土壤光谱曲线之研究 [J] . 环境遥感, 1991, 6(1): 61—71.]
- [14] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of Radiant Energy from Soils [J] . *Soil Science*, 1965, 100(2): 130—138.
- [15] Xu B B, Ji G S. The Research of Soil Spectral Reflectance Characteristics and its Application [J] . *The Progress of Pedology*. 1987, 15(1): 1—7. [徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特性研究及其应用 [J] . 土壤学进展, 1987, 15(1): 1—7.]
- [16] Baumgardner M F, Kristof S, Johansen C J, Zachary A. Effects of Organic Matter on the Multi-spectral Properties of Soils [C] . LARS Information Note 030570, Purdue Univ. , Lafayette, Ind. , 1970.
- [17] Szilagy A, Baumgardner M F. Salinity and Spectral Reflectance of Soils [C] . Proc Ann. Meeting ASPRS/ACSM, 1991 (USA; Baltimore, Maryland) .
- [18] Ji G S, Xu B B. Reflectance of Soil Clay Minerals and its Application in Pedology [J] . *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(1): 67—76. [季耿善, 徐彬彬. 土壤粘土矿物反射特性及其在土壤学上的应用. 1987, 土壤学报, 24(1): 67—76.]
- [19] Bowers S. A, Hanks R J. Reflection of Radiant Energy from Soils. *Soil Science*, 1965, 10(2): 130—138.
- [20] Dai W D, Zhu Y L, Sha J *et al.* SPSS for Windows from Elementary to Proficiency [M] . Publishing house of electronics industry, 1997. [卢纹岱, 朱一力, 沙捷等. SPSS for Windows 从入门到精通 [M] . 电子工业出版社, 1997.]

Estimating Reclamation Level of Saline Soil Using Laboratory Spectra

HUANG Ming-xiang, SHI Zhou, LI Yan, WU Shu-wen

(Institute of Agricultural Remote Sensing and Information

System Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Over the past 30 years, considerable parts of coastal tideland have been enclosed and reclaimed for agricultural land uses in Zhejiang province. The purpose of this work was to evaluate whether the laboratory spectral data could be used to estimate the reclamation levels of saline soils. The northern region of Shangyu City in Zhejiang Province as a study area was divided into four sub-zones with different historical years of reclamation. Soil samples were collected from field at approximate 1 kilometer intervals using GPS. Soil physic-chemical properties analyzed in laboratory showed that saline soils had low organic matter, high electrical conductivity and sand content, and some soil properties changed with reclamation years. These changing trends of soil chemical and physical properties can be indicated by laboratory reflectance spectra of soil samples. The Pearson correlation analysis showed that there existed good relationships between nine absorption bands and selected soil properties. Stepwise Discrimination Analysis (SDA) was applied to estimate the reclamation levels of saline soil. The results showed that saline soil with different reclamation years could be classified with an overall accuracy of 86.8% for 68 original grouped cases and 89.3% for 28 cases not involved in SDA according to the Fisher's discriminant functions. The study suggests that remote sensing should be potentially useful and effective tool to estimate saline soil reclamation, by comparison to the time-consuming conventional field investigation.

Key words: saline soil; spectral; development; estimation; stepwise discriminant analysis