

滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究

龚绍琦^{1,2}, 王 鑫², 沈润平¹, 刘振波¹, 李云梅²

(1. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京师范大学虚拟地理教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要: 高光谱遥感凭借其极高的光谱分辨率在获取有机质、矿物质等土壤组分定量信息的研究中表现出非凡的潜力。以如东县洋口镇为研究区, 通过对土壤反射光谱的测量和同步的土壤化学分析, 研究了土壤重金属 Cr、Cu、Ni 与土壤粘土矿物、铁锰氧化物以及碳酸盐之间的赋存关系。利用光谱一阶微分、倒数对数和连续统去除法对土壤光谱的处理, 获得了土壤成分的特征波段, 通过土壤重金属与土壤光谱变量的相关分析, 并利用逐步回归分析方法, 确立了 3 种重金属元素的最佳遥感模型。结果表明, 研究区 3 种重金属与波长 429 nm、470 nm、490 nm、1 430 nm、2 398 nm、2 455 nm 处光谱变量具有很好的相关性, 在所建立的逐步回归模型中, 以一阶微分处理的模型精度最高。研究结果可以为高光谱遥感技术反演土壤重金属含量, 进一步应用空间或航空遥感进行大尺度环境污染遥感、遥测信息提取和反演提供技术支撑。

关 键 词: 滨海盐土; 高光谱遥感; 重金属; 逐步回归

中图分类号: TP 79; S 158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2010)02-0169-09

1 引 言

土壤是人类赖以生存的自然环境和农业生产的重要资源。近年来, 随着全球经济的迅速发展, 全世界平均每年排放 Hg 约 1.5 万 t、Cu 约 340 万 t、Pb 约 500 万 t、Ni 约 100 万 t, 大量含重金属的污染物通过各种途径进入土壤, 致使土壤中重金属含量明显高于环境背景值, 从而导致土壤重金属污染的加剧^[1]。由于重金属不易被土壤微生物所分解而在土壤中不断累积, 甚至可能转化为毒性更大的化合物, 一方面严重影响农作物的产量和质量, 并通过食物链在动物、人体内累积危害人类健康, 另一方面通过土壤水的淋溶再次进入水体, 导致水环境质量的进一步恶化。因此, 土壤重金属污染问题引起世界各国的广泛关注。

传统的土壤重金属污染调查是通过野外实地采样, 实验室化学分析如吸收比色分析、火焰发射光谱分析、原子吸收光度分析等^[2,3]测量各种金属元素的含量。这种方法能取得很好的测量精度, 但耗时

费力, 效率低, 且只能对若干采样点剖面进行观测, 对大范围周期性监测能力有限。而遥感技术具有快速、大范围动态监测的优势, 特别是高光谱遥感技术 (Hyperspectral Remote Sensing) 的出现为土壤矿物、水分、养分、盐分等要素的监测成为可能。利用高光谱数据可得到每个地物的连续光谱信息, 从而可以依据地物光谱特征进行地物成分反演和地物识别。目前, 高光谱遥感作为一种新技术已被广泛应用于地表矿物成分的识别及其含量的探测、植物化学成分估测, 土壤调查等方面的研究^[4]。研究结果表明, 利用土壤的反射光谱可以很好地估算土壤有机质、土壤水分、总氮、总磷和铁钙镁等土壤矿物质的含量^[5-12]。Kooistra^[13,14]等研究发现莱茵河流域土壤中的 Cd、Zn 与有机质含量之间存在很好的正相关, 并利用可见光—近红外反射光谱和偏小二乘回归法预测了土壤镉、锌的含量。Thomas^[15]等利用土壤反射光谱预测了西班牙 Aznalcollar 矿区土壤 As、Hg、Pb 及 Fe 元素的含量。吴昀昭^[16]等利用农业用地土壤反射光谱预测了土壤 Hg 元素的

收稿日期: 2009-09-08; 修订日期: 2010-02-08

基金项目: 南京信息工程大学陆面过程遥感科研团队经费; 南京信息工程大学博士科研启动基金(80120); 南京师范大学研究生暑期社会实践项目; 江苏省高校自然科学基金(08KJB17004); 国家自然科学基金项目(40801145)资助。

作者简介: 龚绍琦(1979—), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事资源与环境遥感研究。E-mail: shaoqigong@163.com。

含量。另外李巨宝^[17]等利用 PLS 模型,建立了农田土壤中 Fe、Zn、Se 含量与土壤反射光谱的对应关系,探讨了应用高光谱遥感技术定量监测土壤重金属含量的可行性。王璐^[18]等根据实验室测得的土壤反射光谱,利用偏最小二乘回归法预测了铅、镉、汞等重金属元素的含量,模拟和分析了多光谱数据估算土壤重金属含量的可行性。解宪丽^[19]等研究探讨了可见—近红外反射光谱与土壤铜、铅、锌、镉等 9 种重金属元素之间的相关性。蒋建军^[20]等利用有机质诊断指数进行了土壤镉含量遥感研究。以上研究表明,根据土壤有机质、铁锰氧化物以及粘土矿物对土壤重金属的吸附或赋存关系,利用土壤反射光谱可以定量地研究土壤中的重金属含量。因此,本研究将利用地物光谱仪测定土壤反射光谱,结合实验室测得的土壤重金属含量,探索利用高光谱遥感技术反演土壤重金属的可行性,为利用航天或航空高光谱遥感进行大尺度环境污染监测、信息提取和定量反演提供技术支撑。

2 数据的采集与预处理

2.1 土壤样品的采集与分析

本文的研究区为如东县洋口镇,濒临南黄海,北部有重要的化工园区,陆地是典型的滨海平原,地势较平坦,土壤类型为滨海盐土,成土母质以海相沉积物为主,有机质含量水平较低。由于该区特殊的地理位置,经常海水涨潮会使得海水顺着连通的河流进入周边农田旱地,导致土壤含盐量增加,土壤重金属含量随之升高,严重影响农作物的生长。

本研究于 2007 年 8 月 1~4 日于实地进行等间距的格网采样,样点间隔控制在 2 km 左右,取样深度为 20 cm,采集地包含了农田、旱地和荒草地 3 种土地利用类型,共采集 22 个土壤样品,样点分布见图 1。土样在实验室自然风干,用木棒压磨粗略去除沙砾和植物残体,然后过 100 目尼龙筛混合均匀。每个样品分成两份,一份用于化学分析,土壤有机质(OM)采用外热重铬酸钾氧化法,土壤中铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铝(Al)、硅(Si)、镁(Mg)、铁(Fe)、锰(Mn)等元素的测定主要经硝酸—高氯酸—氢氟酸消解,用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES 法)^[3]进行;另一份用于土壤光谱测量。

2.2 土壤光谱的测定

采用 ASD FieldSpec Pro 地物光谱仪测量土壤反射光谱,其波长范围为 350~2 500 nm。光谱仪在 350~1 000 nm 范围的抽样间隔和光谱分辨率

分别为 1.4 nm 和 3 nm,在 1 000~2 500 nm 范围的抽样间隔和光谱分辨率为 2 nm 和 10 nm。光谱重采样后间隔为 1 nm,输出波段数为 2 151。实验室光谱测试方法严格按照有关规范进行操作,5°视场角的光谱探头距土样表面 15 cm 垂直进行光谱采集,1 000 W 的卤灯光光源为距土样中心 30 cm,光源照射方向与垂直方向成 15°夹角。40 cm × 40 cm 的白色漫参考板用于获取绝对反射率,每个土样测 5 条光谱曲线求平均值,以消除测量的不稳定性。

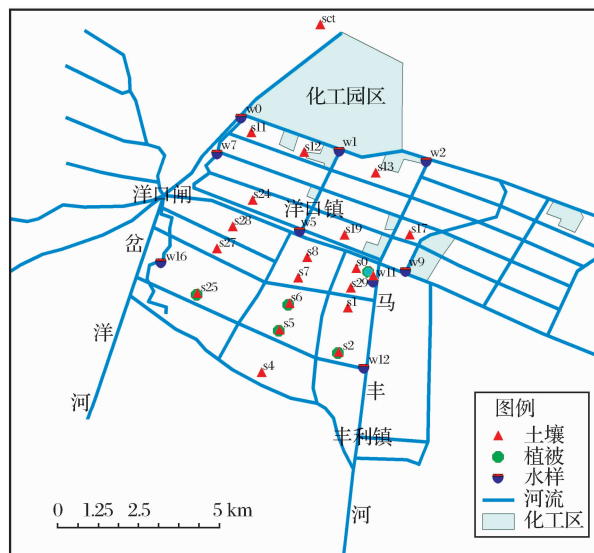


图 1 调查点位分布图

Fig. 1 Distributed map of soil sampling sites in the research area

2.3 土壤光谱数据的预处理

为了从高光谱数据中有效地提取土壤元素信息,需要对原反射光谱进行预处理,从而消除背景噪声、增强相似光谱之间的差别、突出光谱的特征值。因此,本文将利用光谱一阶微分、光谱倒数对数($\log(1/R)$)和连续统去除等方法对原始反射光谱进行处理。

2.3.1 光谱一阶微分

光谱测量容易受观测角度、照度、样品表面粗糙度等诸多因素的影响,使得光谱数据的信噪比偏低。对光谱的一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响。光谱数据的一阶微分可用以下公式近似计算:

$$R'(\lambda_i) = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

其中: λ_{i+1} 、 λ_i 、 λ_{i-1} 为相邻波长, $R'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱。

2.3.2 光谱倒数对数

在光谱定量分析过程中,光谱倒数对数(log(1/R))可以有效地增强相似光谱之间的差别,是植被和土壤高光谱研究中常用的方法。

2.3.3 连续统去除

包络线消除法是一种常用的光谱分析方法,它可以有效地突出光谱曲线的吸收和反射特征,光谱的吸收特征也归一化到一致的光谱背景,有利于和其它光谱曲线进行特征数值的比较。“连续统”定义为逐点直线连接那些光谱曲线上凸出的“峰”值点,并使折线在“峰”值点上的外角大于 180°,逐点连接线称为包络线。连续统去除法就是用实际光谱反射率值去除包络线上相应波段反射率值,其特点就是将反射率光谱归一化到 0~1 之间的值^[21,4]。

3 结果与分析

3.1 土壤化学成分含量的统计分析

表 1 为研究区土壤采样实测的统计特征值,从表上可知,土壤有机质含量总体较低,主要是由于本区属滨海平原盐土带,成陆历史较短,土壤耕作熟化

程度低,肥力相对较差。土壤中元素 Al、Mg、Si 通常以层状硅酸盐矿物或硅铝氧化物的形态存在,元素 Fe、Mn 则以氧化铁锰的形态存在,本次化学分析测得的均为元素的全量,可以很好地指示硅酸盐矿物和氧化铁锰在土壤中的含量,并进一步定量分析土壤粘土矿物对重金属的吸附或聚集共生关系。研究区土壤重金属元素 Cr、Cu 和 Ni 含量均低于国家土壤环境质量一级标准^[22],说明该区并未受周边化工厂废弃物的污染。对于土壤元素在空间分布状况,元素 Si 和 Cu 接近正态分布,其它元素则表现为空间随机分布。土壤中 Al 含量的空间变化较小,变异系数≤10%,属弱变异,而 Mn 含量的空间变化较大,变异系数≥100%,属强变异,其它土壤属性值的变化均属中等变异,变异系数在 10%~100% 之间。

在地球化学中,有成因联系而且性质相近的元素同时赋存于某一地质体中的现象称元素共生组合^[23]。因此,同类元素容易相互聚集共生,用相关系数可以反映土壤元素之间的共生程度。表 2 是土壤属性含量的相关系数矩阵,土壤有机质与各种金

表 1 研究区实测土壤化学成分含量的统计特征值

Table 1 Statistical values for measured content of soil components in the research area

项目	OM	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Ni
	/g · kg ⁻¹					/mg · kg ⁻¹			
最小值	1.468	82.326	6.707	176.390	14.617	0.321	27.960	14.870	9.820
最大值	10.098	107.076	12.041	321.779	25.247	0.724	78.330	28.470	24.280
平均值	5.450	93.824	9.030	188.558	19.271	0.503	51.225	19.335	16.310
标准差	2.677	6.395	1.397	68.067	2.747	1.128	12.279	2.987	3.355
偏度	0.121	0.035	0.698	1.697	0.521	0.240	-0.010	1.287	0.521
峰度	-1.242	-0.237	-0.111	3.882	-0.331	-0.502	0.106	2.866	0.624
变异系数/%	49.12	6.82	15.47	36.10	14.25	224.17	23.97	15.45	20.57

表 2 土壤化学成分含量的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of soil components content

	OM	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Ni
OM	1								
Al	-0.295	1							
Mg	-0.077	0.696**	1						
Si	-0.185	0.160	-0.161	1					
Fe	0.049	0.756**	0.834**	0.148	1				
Mn	-0.068	0.623**	0.431*	-0.044	0.529*	1			
Cr	-0.265	0.639**	0.524*	0.416	0.648**	0.265	1		
Cu	-0.061	0.767**	0.463*	0.313	0.709**	0.574**	0.498*	1	
Ni	-0.037	0.743**	0.713**	0.207	0.880**	0.425*	0.745**	0.786**	1

注: *、** 分别表示显著相关($p<0.05$)和极显著相关($p<0.01$)

属元素的相关性很低,主要是该研究区有机质含量低,对土壤中其它金属吸附作用较弱。亲石元素(Al、Mg、Si、Mn 及 Cr)之间,除 Si 元素外,所有元素都有很好的相关性,相关程度达到显著或极显著水平,说明同类元素的地球化学行为很相似。此外,亲石元素 Al、Mg 与异类元素 Fe、Cu、Ni 也有很好的相关性,相关程度均达到极显著水平,说明该研究区土壤成土过程中各种粘土矿物聚集共生程度较高,这进一步说明土壤粘土矿物、铁锰氧化物对重金属元素具有吸附或赋存作用。因此,利用粘土矿物和铁锰氧化物在土壤光谱曲线中典型的光谱特征,间接地预测土壤重金属元素含量。

3.2 土壤光谱特征分析

图 2(a)是土壤样品的反射光谱曲线,所有样品的光谱曲线形态大致相同,可见光波段(VIS)的反射率小于近红外(NIR)波段,特征吸收带出现的波段位置基本一致,只是土壤成分含量不同,导致特征波段反射率大小不同,而且土壤光谱中的特征值与

某些特定的土壤化学成分有关。一般来说,在可见光和近红外波段,土壤光谱的吸收特征主要是由于 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{3+} 等金属离子的电子跃迁形成的,而短红外(SWIR)波段,土壤光谱的吸收特征主要是 Al-OH 、 Mg-OH 、 Fe-OH 、 CO_3^{2-} 、 OH^- 和 NH_4^+ 等基团的分子弯曲振动而产生的倍频和谐频^[24,25]。采用光谱倒数对数法和连续统去除法获得土壤光谱特征波段主要有:429 nm、470 nm、490 nm、600 nm、815 nm、900 nm、1 415 nm、1 915 nm、2 205 nm、2 300 nm、2 455 nm。在波长400~600 nm 范围内,光谱形状较陡,斜率最大;429 nm、490 nm 是土壤氧化铁微弱的吸收峰,470 nm则是土壤氧化锰微弱的吸收峰。在600~815 nm 范围内,光谱斜率降低;其中波长600 nm 是土壤有机质典型的反射峰,有机质含量越高,反射率越低,815 nm 则是有机质的次反射峰。在近红外波段,反射光谱的斜率较小,接近水平。900 nm附近的吸收峰是土壤中三价铁所致,但在土

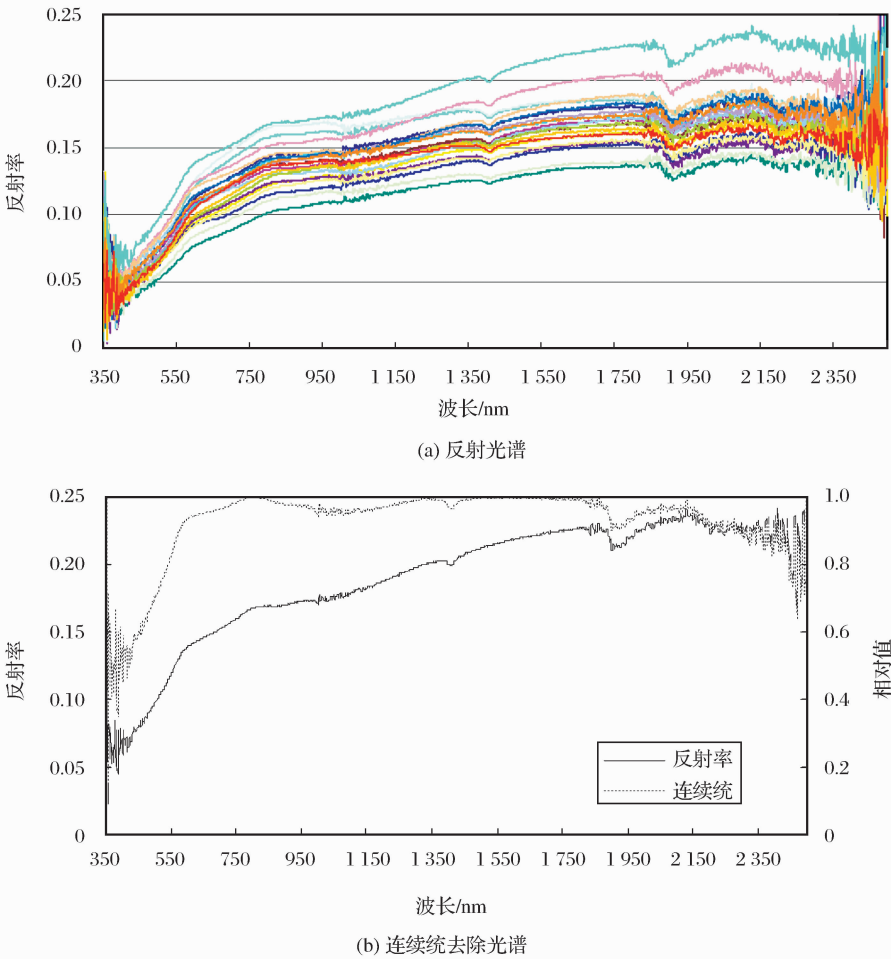


图 2 土壤样品光谱曲线
Fig. 2 Spectrum curves of soil samples

壤反射光谱中表现不明显,说明本研究区土壤中游离氧化铁含量较低。1 000 nm 附近的吸收峰是土壤中 铁的 氢 氧 化 合 物 特 征 谱 带,1 415 nm、1 915 nm、2 205 nm 附近的吸收峰是土壤硅酸盐矿物中水分子羟基(—OH)伸缩振动和 Al—OH 弯曲振动的合频谱带。2 455 nm 附近的吸收峰则是土壤碳酸盐中 CO_3^{2-} 基团振动产生的谱带^[26,27]。

3.3 土壤光谱变量与重金属含量的相关分析

为了探讨土壤重金属含量与土壤光谱之间的关联,将土壤 Cr、Cu 和 Ni 3 种元素含量分别与原始光谱反射率、光谱倒数对数值、光谱一阶微分值以及连续统去除值进行相关分析,各元素的相关系数曲线如图 3。从图上可以看出,由于重金属元素土壤含量低,3 种重金属元素与土壤光谱的相关性总体较

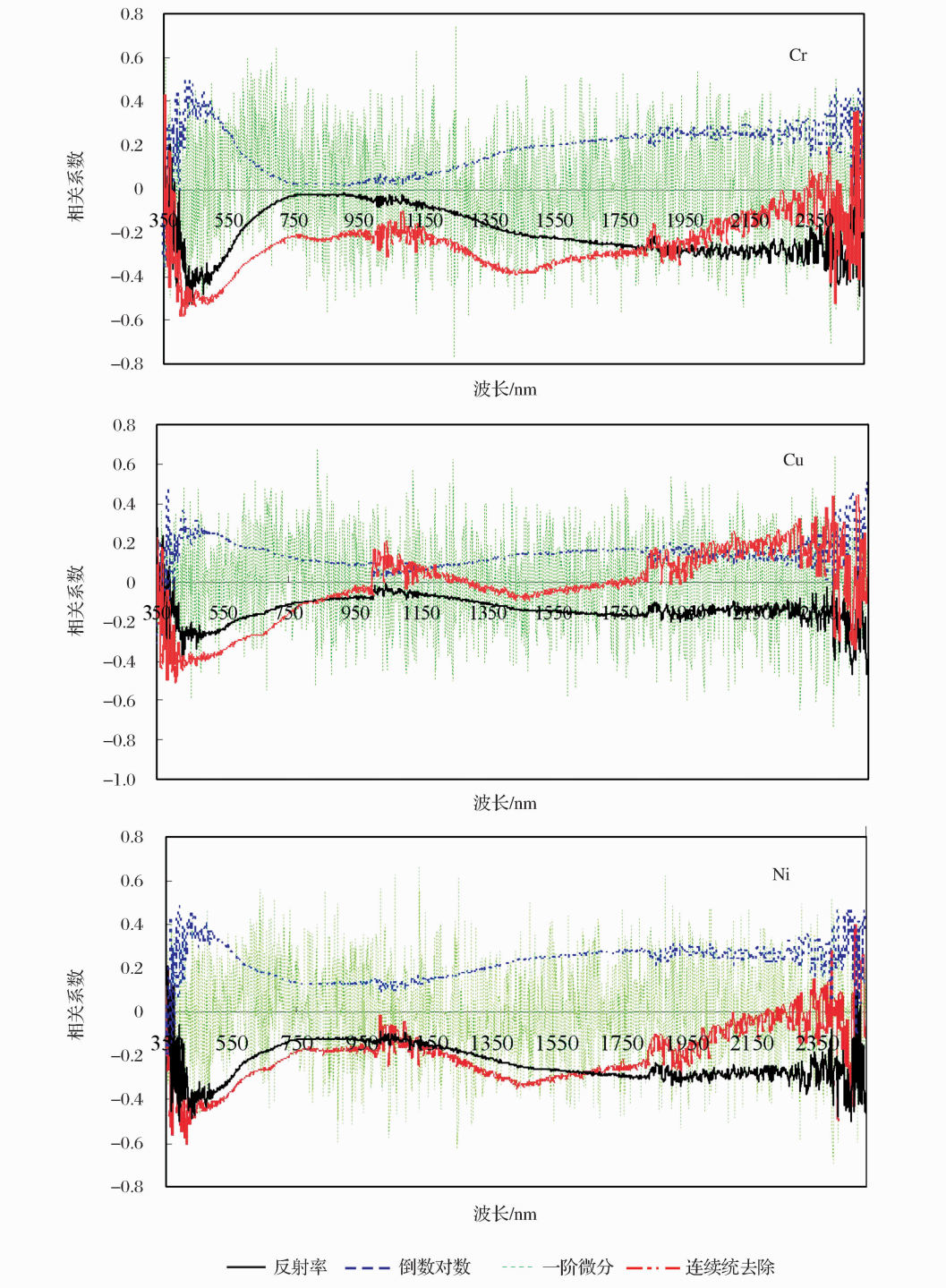


图 3 土壤重金属含量与土壤光谱的相关系数曲线

Fig. 3 Correlation coefficient curves between soil heavy metals content and spectral reflectance

低,但都表现出与土壤光谱相似的相关性,分别在波长 429 nm、470 nm、490 nm、2 398 nm 和 2 455 nm 附近均有较高的相关系数,相关性大部分都达到 0.05 的显著性水平,少数能达到 0.01 的极显著性水平,对于 0.10、0.05 和 0.01 显著水平,其对应相关系数的临界值分别为 0.3598、0.4227 和 0.5368,土壤重金属含量与光谱变量特征值的相关性见表 3。土壤重金属与土壤光谱之间的关联,反映了土壤氧

化铁锰对土壤重金属的吸附、以及与碳酸盐的赋存关系。另外,重金属元素 Cr 和 Ni 在 1 430 nm 波段附近与连续统去除光谱有一定的相关,相关系数分别为-0.397 和-0.349,达到或接近 0.10 的显著性水平(相关系数的临界值为 0.3598),该波长位置主要是粘土矿物中 Al—OH 基团的次吸收峰,土壤光谱经连续统去除法处理后有利于突出其吸收特征,同时增强了与 Cr、Ni 浓度的相关性。

表 3 土壤重金属含量与光谱特征值的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between soil heavy metals content and spectral characteristic values

重金属元素	特征波段/nm	反射率	倒数对数	一阶微分	连续统去除
Cr	429	-0.5238 *	0.4976 *	0.4227 *	-0.5137 *
	470	-0.4849 *	0.4539 *	-0.5061 *	-0.5263 *
	490	-0.4406 *	0.4081	0.4839 *	-0.5021 *
	1 430	-0.2051	0.1793	0.1216	-0.3974
	2 398	-0.4455 *	0.4125	-0.7109 * *	-0.4319 *
	2 455	-0.4235 *	0.4226 *	0.4123	-0.4167
Cu	429	-0.3790	0.3593	0.4863 *	-0.4307 *
	470	-0.3361	0.3191	-0.4286 *	-0.4199
	2 398	-0.3952	0.3915	-0.7301 * *	0.4378 *
	2 452	-0.4662 *	0.4606 *	0.2776	-0.3253
Ni	429	-0.4858 *	0.4674 *	0.4124	-0.4560 *
	470	-0.4381 *	0.4111	-0.4295 *	-0.4603 *
	490	-0.3923	0.3639	-0.2323	-0.4449 *
	1 430	-0.2522	0.2367	-0.3220	-0.3493
	2 398	-0.4310 *	0.4005	-0.6994 * *	-0.3354
	2 455	-0.4987 *	0.4830 *	0.2173	-0.3753

注: *、* * 分别表示显著相关($p<0.05$)和极显著相关($p<0.01$)

3.4 土壤重金属回归模型分析

根据土壤重金属与土壤光谱的相关分析,找出重金属元素相关性较好的光谱特征波段。利用逐步回归法,各重金属含量与特征波段的光谱变量进行回归分析。首先,将 22 个样本分成两组,一组用于建立回归模型,一组用于模型检验。按各重金属浓度的大小排序,从第 2 个样本开始每 3 个抽取一个样本用于模型的检验,因此模型构建的样本数为 16,模型检验样本数为 6,经逐步回归分析所建的模型见表 4。根据回归系数和 F 统计量最高、均方根误差最小的原则,选择土壤重金属高光谱遥感的最佳回归模型。结果表明,3 种重金属高光谱遥感模型均以一阶微分光谱变量最佳,主要是光谱经一阶微分处理后消除背景噪声的影响,有利于增强土壤重金属光谱信息。从所建的模型来看,光谱的倒数对数法和连续统去除法可以更好地区别相似光

谱以及突出光谱的吸收特征,但不能提高模型构建的精度。将检验样本带入所得的最佳回归模型进行预测,绘制出 3 种重金属含量实测值与预测值的散点图(见图 4)。从图上可知,重金属 Cr 元素的模型预测精度最高,其次是 Cu 元素,元素 Ni 模型的预测精度稍差。

4 结 语

(1) 本文通过对研究区土壤化学成分含量采样分析表明,土壤有机质含量较低,土壤重金属元素含量均低于国家土壤环境质量一级标准,该区并未受周边化工厂废弃物的污染。土壤各成分在空间上呈随机分布,属中等程度的变异。土壤中 Al、Mg、Fe、Mn 与 3 种土壤重金属表现出显著的相关性,说明研究区 3 种土壤重金属与土壤粘土矿物、铁锰氧化物具有共生聚集或赋存关系。

表 4 土壤重金属逐步回归光谱模型参数

Table 4 Spectral model parameters of stepwise regression for soil heavy metals

重金属	光谱变量	模型	回归系数 R	F 统计量	均方根误差	系数检验
Cr	反射率	$Y = 80.616 - 9\,149.321X_1 + 6\,327.590X_3$	0.742	7.981	17.223	极显著
	倒数对数	$Y = -18.655 + 90.375X_5$	0.465	3.870	11.547	不显著
	一阶微分	$Y = 55.709 - 2\,022.127X_5 + 544.617X_6$	0.799	11.452	9.696	极显著
	连续统去除	$Y = 112.283 - 101.171X_2$	0.590	7.482	12.302	显著
Cu	反射率	$Y = 34.162 - 93.932X_6$	0.653	10.425	3.538	极显著
	倒数对数	$Y = -7.108 + 32.809X_6$	0.650	10.232	3.560	极显著
	一阶微分	$Y = 19.804 - 375.437X_5 + 1\,607.015X_1$	0.815	12.892	2.422	极显著
	连续统去除	$Y = 8.295 + 30.414X_5 - 17.086X_6$	0.797	11.328	3.124	极显著
Ni	反射率	$Y = 31.813 - 102.801X_6$	0.668	11.287	3.786	极显著
	倒数对数	$Y = -8.498 + 31.798X_5$	0.654	10.489	4.360	极显著
	一阶微分	$Y = 17.508 - 626.278X_5$	0.808	26.408	3.376	极显著
	连续统去除	$Y = 32.546 - 26.922X_2$	0.587	7.342	3.815	显著

注: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 分别代表波长 429 nm、470 nm、490 nm、1 430 nm、2 398 nm、2 455 nm 处光谱变量

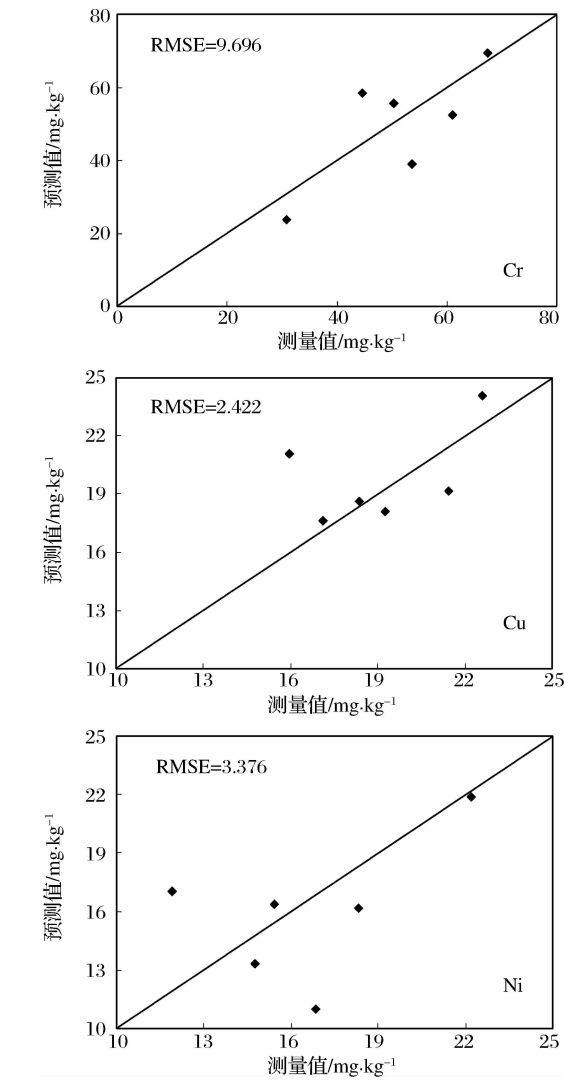


图 4 土壤重金属含量实测值与预测值的散点图

Fig. 4 Scatterplot of soil heavy metals content between measured and predicted data

(2) 利用光谱倒数对数法和连续统去除法,可以有效地获得土壤光谱的特征波段,这些波段很好地反映了土壤粘土矿物、铁锰氧化物以及碳酸盐典型的光谱特征。通过 3 种土壤重金属元素与土壤光谱变量之间的相关分析发现,重金属元素与波长 429 nm、470 nm、490 nm、1 430 nm、2 398 nm、2 455 nm 处的光谱变量存在显著的相关性。利用逐步回归法,分别建立土壤重金属元素与 4 种光谱变量之间进行回归分析,确立了土壤重金属高光谱遥感的最佳回归模型。结果表明,土壤光谱经一阶微分处理后更有利于提高模型精度。

(3) 由于土壤重金属含量低,反映在土壤光谱信息很微弱,通过直接分析重金属元素的特征光谱来估算其含量比较困难。借助重金属元素与土壤有机质、粘土矿物、铁锰氧化物、碳酸盐矿物之间的吸附或赋存关系,这是高光谱遥感土壤重金属含量机理所在。该研究可为土壤重金属含量的快速监测和大尺度的土壤重金属污染评价提供技术支撑,为进一步应用空间或航空遥感进行高光谱遥感定量监测土壤重金属污染提供技术和理论支持。由于本研究采样点个数和采样频次的限制,本文所建立的重金属高光谱遥感定量模型精度也需要进一步验证。

参考文献:

[1] Nanjing Agricultural College. Soil and Agriculture Chemistry Analysis[M]. Beijing: Agriculture Press, 1980. [南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.]

[2] Institute of Soil Science, CAS. Analytical Methods of Trace Elements in Soil and Plant[M]. Beijing: Science Press, 1979.

- [中国科学院南京土壤研究所. 土壤和植物中微量元素分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [3] Lu Rukun. Soil and Agriculture Chemistry Analysis Methods [M]. Beijing: China Agriculture Science & Technology Press, 1999. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.]
- [4] Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [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.]
- [5] Sha Jinming, Chen Pengcheng, Chen Songlin. Characteristics Analysis of Soil Spectrum Response Resulted from Organic Material[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(2): 21-24. [沙晋明, 陈鹏程, 陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 21-24.]
- [6] Xie Bocheng, Xue Xuzhang, Wang Jihua, *et al.* Spectral Characteristics of Brown-humid Soil and Estimation of Soil Organic Matter Content by Soil Reflectivity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(4): 391-395. [谢伯承, 薛绪掌, 王纪华, 等. 褐潮土的光谱特性及用土壤反射率估算有机质含量的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 391-395.]
- [7] He Junliang, Jiang Jianjun, Zhou Shenglu, *et al.* The Hyperspectral Characteristics and Retrieval of Soil Organic Matter Content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(3): 638-643. [贺军亮, 蒋建军, 周生路, 等. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 638-643.]
- [8] Liu Weidong, Frédéric Baret, Zhang Bing, *et al.* Extraction of Soil Moisture Information by Hyperspectral Remote Sensing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 700-706 [刘伟东, Frederic Baret, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 700-706.]
- [9] Yu Feijian, Min Shungeng, Ju Xiaotang, *et al.* Determination the Content of Nitrogen and Organic Substance in Dry Soil by Using Near Infrared Diffusion Reflectance Spectroscopy[J]. Analytical Laboratory, 2002, 21(3): 49-51. [于飞健, 闵顺耕, 巨晓棠, 等. 近红外光谱法分析土壤中的有机质和氮素[J]. 分析实验室, 2002, 21(3): 49-51.]
- [10] Xu Yongming, Lin Qizhong, Huang Xiuhua, *et al.* Experimental Study on Total Nitrogen Concentration in Soil by VNIR Reflectance Spectrum [J]. Geography and Geo-information Science, 2005, 21(1): 19-22. [徐永明, 蔺启忠, 黄秀华, 等. 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 19-22.]
- [11] Peng Yukui, Zhang Jianxin, He Xusheng, *et al.* Analysis of Soil Moisture, Organic Matter and Total Nitrogen Content in Loess in China with Near Infrared Spectroscopy [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 553-559. [彭玉魁, 张建新, 何绪生, 等. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 553-559.]
- [12] Zhao Suolao, Peng Yukui. Analysis of Soil Moisture, Organic Matter and Total Nitrogen Content in Loess in China with Near Infrared Spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30(8): 978-980. [赵锁劳, 彭玉魁. 我国黄土区土壤水分、有机质和总氮的近红外光谱分析[J]. 化学分析, 2002, 30(8): 978-980.]
- [13] Kooistra L, Leuven R S E W, Wehrens R, *et al.* A Comparison of Methods to Relate Grass Reflectance to Soil Metal Contamination [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(24): 4995-5010.
- [14] Kooistra L, Wehrens R, Leuven R S E W, *et al.* Possibilities of Visible-Near-Infrared Spectroscopy for the Assessment of Soil Contamination in River Flood Plains [J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 446: 97-105.
- [15] Thomas K, Stefan S. Estimate of Heavy Metal Contamination in Soils after a Mining Accident Using Reflectance Spectroscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(12): 2742-2747.
- [16] Wu Y Z, Chen J, Ji J F, *et al.* Feasibility of Reflectance Spectroscopy for the Assessment of Soil Mercury Contamination [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(3): 873-878.
- [17] Li Jubao, Tian Qingjiu, Wu Yunzhao. The Study of Spectral Responses of Agricultural Soil for Fe, Zn and Se in the Area of Fuyang Riversides [J]. Remote Sensing Information, 2005(3): 10-13. [李巨宝, 田庆久, 吴昀昭. 汾阳河两岸农田土壤 Fe、Zn、Se 元素光谱响应研究[J]. 遥感信息, 2005, 3: 10-13.]
- [18] Wang Lu, Lin Qizhong, Jia Dong, *et al.* Study on the Prediction of Soil Heavy Metal Elements Content Based on Reflectance Spectral [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(6): 906-913. [王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 906-913.]
- [19] Xie Xianli, Sun Bo, Hao Hongtao. Relationship between Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy and Heavy Metal of Soil Concentration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 982-993. [解宪丽, 孙波, 郝红涛. 土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 982-993.]
- [20] Jiang Jianjun, Xu Jun, He Junliang, *et al.* Method for Retrieving Soil Cadmium Content Based on Organic Matter Diagnostic Index [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(1): 177-182. [蒋建军, 徐军, 贺军亮, 等. 基于有机质诊断指数的土壤镉含量反演方法研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 177-182.]
- [21] Clark R N, Roush T L. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Application [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B7): 6329-6340.
- [22] Bureau of Environmental Protection of P. R. China. GB/T15618-1995, Environmental Quality Standard for Soils [S]. GB/T15618-1995: 1-5. [国家环境保护局, 土壤环境质量标准[S]. 中华人民共和国国家标准, GB/T15618-1995: 1-5.]
- [23] Huang Zongli, Zhang Liangbi. Geoscience Glossary [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. [黄宗理, 张良弼. 地球科学大辞典[M]. 北京: 地质出版社, 2006.]
- [24] Wang Jinnian, Zheng Lanfen, Tong Qingxi. The Spectral Absorption Identification Model and Mineral Mapping by Imaging Spectrometer Data [J]. Remote Sensing of Environment,

- 1996, 11(1): 20-31. [王晋年, 郑兰芬, 童庆禧. 成像光谱图像光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(1): 20-31.]
- [25] Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ai'nai. Spectral Identification Tree (SIT) for Mineral Extraction Based on Spectral Characteristic of Mineral[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 445-454. [甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 445-454].
- [26] Ji Gengshan, Xu Binbin. 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[J]. 土壤学报, 1987, 24(1): 67-76.]
- [27] Xu Binbin, Ji Gengshan, Zhu Yonghao. A Preliminary Research of Geographic Regionalization of China Land Background and Spectral Reflectance Characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 6(2): 142-151. [徐彬彬, 季耿善, 朱永豪. 中国陆地背景和土壤光谱反射特性的地理分区的初步研究[J]. 环境遥感, 1991, 6(2): 142-151.]
- [28] Xu Binbin. Study on Reflectance Spectra of Soil Section[J]. Soils, 2000, (6): 281-287. [徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究[J]. 土壤, 2000, 6: 281-287.]

Study on Heavy Metal Element Content in the Coastal Saline Soil by Hyperspectral Remote Sensing

GONG Shao-qi^{1,2}, WANG Xin², SHEN Run-ping¹, LIU Zhen-bo¹, LI Yun-mei²

(1. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Virtual Geographical Environment Laboratory of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: With its high spectral resolution, hyperspectral remote sensing has a great potential in obtaining quantitative information of soil components, such as organic matter, mineral substance. Taking Yangkou town Rudong county as a research area, the coherence between soil heavy metal elements Cr, Cu and Ni and soil clay mineral, iron-manganese oxide and carbonate is studied after soil reflectance spectrums are measured and soil components are analyzed by chemistry methods. Soil spectrums are processed by first derivative, inverse-log and continuum removed methods, then the characteristic spectral wavelengths of soil heavy metal elements are obtained. Given that the best quantitative remote sensing models for 3 heavy metal elements are deduced by stepwise regression after the correlation analysis of soil heavy metal elements content and spectral variables. The results show that 3 heavy metal elements have good correlations with spectral variables at wavelength 429 nm, 470 nm, 490 nm, 1 430 nm, 2 398 nm and 2 455 nm, the accuracy of the model for first derivative spectral variable is the highest among the models. The study aims that the content of heavy metal elements in the soils can potentially be quantitatively deduced by remote sensing, and would provide a basis for the evaluation and interpretation of heavy metal and environment pollution on a large scale by the hyperspectral remote sensing.

Key words: Coastal saline soil; Hyperspectral remote sensing; Heavy metal; Stepwise regression