

崇明东滩盐沼土壤重金属含量的高光谱估算模型

刘 华 ,张利权 *

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 ,城市生态化过程与生态恢复上海市重点实验室 ,上海 200062)

摘要 高光谱遥感技术现已被广泛应用于地表矿物成份的识别以及它的含量、植物化学成份的估测 ,土壤调查等方面的研究。利用地物光谱仪测定了长江口崇明东滩盐沼土壤的光谱信息 ,根据 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱仪的波段设置 ,提取各波段平均波长的光谱反射率 ,并结合实验室实测的土壤重金属含量 ,应用偏最小二乘法 (PLS) ,预测盐沼土壤重金属含量。结果表明 ,盐沼土壤重金属 Zn、Cr、Cu 预测值与实测值相关系数分别达到 0.822 **、0.761 ** 和 0.775 ** ,均为极显著相关 ,其实测值与预测值的平均相对误差为 4%、3% 和 4%。研究结果可以为高光谱遥感技术反演盐沼土壤重金属含量 ,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 崇明东滩 ,盐沼土壤 ,光谱特征 ,土壤重金属含量 ,偏最小二乘法

文章编号 :1000-0933 (2007)08-3427-08 中图分类号 :Q149 ,S154.1 ,X833 文献标识码 :A

A predictive model for the hyperspectral character of saltmarsh soil to its heavy metal content at Chongming Dongtan

LIU Hua ,ZHANG Li-Quan *

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research ,Shanghai Key Laboratory of Urbanization & Ecological Restoration ,East China Normal University ,Shanghai 200062 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3427 ~ 3434.

Abstract :Hyperspectral remote sensing is becoming a new tool for ecological research at large scales ,and has been used to identify and quantify the mineral components of land surfaces and soils ,and to estimate biochemical contents in plants ,among other uses. In this study ,the spectral characteristics of the salt marsh soils at Chongming Dongtan Nature Reserve in Shanghai were measured by a ground FieldSpec™ Pro JR spectroradiometer. The average spectral reflectance rates of all the band sets were extracted according to the band sets of Hyperion in EO-1 satellite. The partial least squares regression (PLS) was then used to predict the heavy metal contents in soils (with focus on Zn ,Cr and Cu). The predicted values were compared with the measured values of these metals ,obtained through laboratory analysis. The results showed that the correlation coefficients between the predicted and the measured values were 0.822 ,0.761 and 0.775 ,and the average relative error for the Zn ,Cr and Cu contents were 4%、3% and 4% ,respectively. The results from this study indicated that the content of heavy metals in saltmarsh soils can potentially be quantitatively deduced from the reflectance rate. This would provide a basis for the use of hyper-spectral images for the evaluation and interpretation of heavy metal contamination in soils on a larger scale.

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB720505 和 2002CB412406)

收稿日期 2006-10-09 ;修订日期 2007-08-07

作者简介 刘华 (1976 ~) ,男 ,山东省新泰市人 ,硕士生 ,主要从事景观生态学研究. E-mail :lhua1976@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

Foundation item The project was financially supported by National Key Fundamental Research and Development Programs (No. 2004CB720505 and 2002CB412406)

Received date 2006-10-09 ;**Accepted date** 2007-08-07

Biography LIU Hua ,Master candidate ,mainly engaged in landscape ecology. E-mail :lhua1976@163.com

Key Words : Chongming Dongtan ; Saltmarsh soil ; Spectral characteristics ; Heavy metal content ; PLS

长江口滨海盐沼是海陆交界的过渡带类型之一,物质与能量的快速集聚、迁移与转化,使潮滩湿地成为重金属的重要宿集地之一^[1,2]。土壤重金属含量是评价生态环境的重要指标之一,常规评价盐沼土壤重金属污染程度是通过野外采样和实验室测量土壤重金属含量实现的^[3,4],难以满足对土壤重金属含量大尺度和快速地定量监测与评价。探索利用盐沼土壤反射光谱定量反演重金属含量,并进而通过高光谱遥感技术大尺度监测重金属含量是解决这一问题的关键技术之一。

高光谱遥感技术(Hyperspectral Remote Sensing)是当前遥感领域的前沿技术,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份反演和地物识别。高光谱遥感技术现已被广泛应用于地表矿物成份的识别以及它们的含量、植物化学成份的估测,土壤调查等方面的研究。已有研究验证了利用土壤的反射光谱可以估算土壤有机质^[5,6]、土壤水分、总氮总磷和铁钙镁等土壤矿物质的含量^[7]。Kooistra 等研究发现,利用植物冠层反射光谱和河滩土壤反射光谱可以较好地预测土壤重金属 Zn、Cd 的污染水平,指出利用土壤可见和近红外反射光谱建立的 PLS 模型是定量分析河滩土壤成分及重金属含量的有效途径^[8,9]。另外 Thomas 等利用土壤反射光谱预测了 Aznalcollar 矿区土壤 As、Hg、Pb 以及 Fe 元素的含量^[10],吴昀昭也用农业用地土壤反射光谱预测了土壤 Hg 元素的含量^[11]。然而目前利用潮滩盐沼土壤反射光谱反演重金属含量方面的研究还为数不多。利用地物光谱仪测得的反射光谱,对盐沼土壤重金属含量进行反演,对进一步研究应用高光谱遥感技术定量监测盐沼土壤的重金属含量具有重要的理论和实践意义。

本项研究的目的是利用地物光谱仪测定盐沼土壤的光谱信息,结合实验室实测的土壤重金属含量,探索利用高光谱遥感技术反演盐沼土壤重金属含量的可行性,为高光谱遥感技术反演盐沼土壤重金属含量,进而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。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

崇明东滩位于上海市崇明岛的最东端,31°25′~31°38′N,121°42′~122°05′E 之间。目前-5m 以上的滩涂面积约 7.33 × 10⁴ km²,是长江口地区最大的、保持原始自然状况的一块滩涂湿地,已于 2001 年被列入“拉姆萨国际湿地保护公约”的国际重要湿地名录。崇明东滩是长江径流中泥沙在该岛的主要沉降区域之一,属于淤涨型潮滩,目前每年以约 140 m 的速度向外扩展。

崇明东滩盐沼湿地最宽处为 13 km,自陆向海依次可分为高、中、低潮滩。滩涂湿地自然植被分布及演替的一般趋势可归纳为:中潮滩下缘和低潮滩的盐渍藻类带(光滩),高程低于 2 m,潮水淹没时间长,无高等植物分布;中潮滩的上半部分和高潮滩为海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)或藨草(*S. triqueter*)带,高程位于 2~2.9m,高潮滩上半部分为芦苇(*Phragmites australis*)带,高程一般在 2.8m 以上。此外还散生着一些白茅(*Imperata cylindrica*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、糙叶苔草(*Carex scabrifolia*)和灯芯草(*Juncus setchuensis*)等斑块状群落^[12]。自 1995 年人工引种互花米草(*Spartina alterniflora*)以来,互花米草逐渐在东滩定居和扩散,主要出现在芦苇带,其分布下限可达到海三棱藨草带。

1.2 样点设置与样品采集

2005 年 4 月下旬,在崇明东滩盐沼湿地内设置两条样带(图 1),其中样带 A 包括 10 个取样点,分布于光

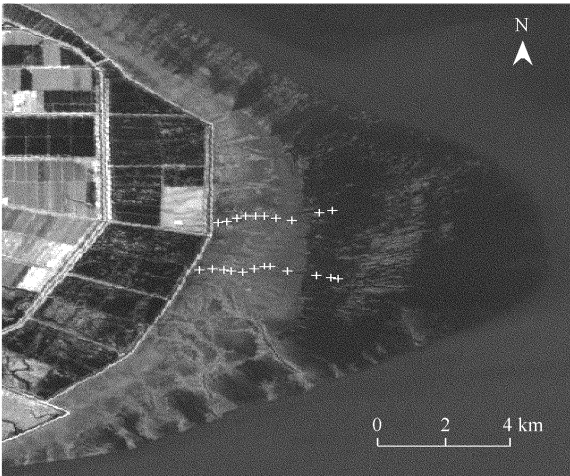


图 1 崇明东滩地理位置和研究样带

Fig. 1 The location of Chongming Dongtan and the two sampling transects

滩和芦苇群落区域。样线 B 包括 12 个取样点 ,分布于光滩、海三棱藨草群落、糙叶苔草群落和芦苇群落区域 ,各样点位置及其植被特征如表 1 所示。每取样点上用直径 3 cm 长 40 cm 的聚乙烯塑料管 ,按照梅花状取柱状土样 5 个 ,取样深度为 30 cm^[3] ,装入同一密封袋中带回实验室测定。

表 1 各取样点位置及其植被特征
Table 1 The location and the character of vegetation of the sampling points

取样点 Number	经度 Longitude	纬度 Latitude	植被 Vegetation	植被高度 (cm) Height of vegetation
A1	31°31'7.9"	121°58'50.8"	光滩 Mudflat	0
A2	31°31'5.5"	121°58'40.2"	光滩 Mudflat	0
A3	31°30'58.0"	121°58'19.5"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	75
A4	31°30'0.6"	121°58'7.3"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	80
A5	31°31'2.6"	121°57'58.3"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	90
A6	31°31'2.7"	121°57'52.1"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	70
A7	31°31'1.9"	121°57'44.6"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	65
A8	31°30'59.8"	121°57'38.0"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	70
A9	31°30'57.1"	121°57'29.7"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	75
A10	31°30'56.2"	121°57'23.9"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	80
B1	31°30'1.0"	121°58'48.8"	光滩 Mudflat	0
B2	31°29'59.9"	121°58'55.0"	光滩 Mudflat	0
B3	31°30'2.8"	121°58'38.6"	海三棱藨草 <i>Scirpus mariqueter</i>	5
B4	31°30'6.9"	121°58'16.3"	海三棱藨草 <i>Scirpus mariqueter</i>	5
B5	31°30'11.6"	121°58'3.5"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	25
B6	31°30'11.8"	121°57'58.5"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	55
B7	31°30'9.0"	121°57'51.1"	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	50
B8	31°30'6.7"	121°57'42.5"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	30
B9	31°30'7.8"	121°57'33.7"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	28
B10	31°30'8.1"	121°57'27.9"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	25
B11	31°30'9.0"	121°57'19.2"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	28
B12	31°30'8.9"	121°57'9.3"	糙叶苔草 <i>Carex scabrifolia</i>	20

1.3 土壤样品预处理及光谱测定

采集到的土壤样品在实验室 60 ℃ 烘干 ,利用研钵研磨混匀 ,并过 120 目筛 ,去除土壤中的植物根系 ,然后再 60 ℃ 烘干 24h ,以去除水蒸气的影响。

使用美国 ASD 公司的 FieldSpec™ Pro JR 便携式地物光谱仪 ,其波段覆盖为 350 ~ 2500 nm。光谱采样间隔在 350 ~ 1000 nm 内为 1.4 nm ,在 1000 ~ 2500 nm 内为 2 nm。漫反射参考板采用中国科学院安徽精密光学机械研究所生产的白板 ,白板反射率为 98%。在暗室内 ,将经过预处理去除水蒸气影响后的土壤样品 ,平铺在纯棉的黑布上面 ,轻轻震动黑布使得土壤表面呈自然状态 ,用 USHIO 公司生产的 A128930 型钨灯作光源 ,采用 15° 的光源照射角度、15 cm 的探头距离和 30cm 的光源照射距离^[4] ,转动黑布方向 ,从垂直于黑布四条边的方向采集土壤反射光谱。每个样品每个方向测定 5 个数据 ,共 20 个数据 ,然后利用地物光谱仪自身携带的 ViewSpec Pro 4.02 光谱处理软件作平均 ,得到每个土壤样品的光谱反射曲线。

1.4 重金属含量测定

取测量光谱后的土样 ,用硝酸-高氯酸-氢氟酸消解法消解 ,然后用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES)测定土壤样品中重金属 Zn、Cr 和 Cu 的含量。

1.5 数据分析方法

应用 ViewSpec™ Pro 4.02 软件把采集的土壤反射光谱曲线转化为光谱反射率 ,根据美国 EO-1 卫星

Hyperion 传感器的 242 个波段设置 模拟 400 ~ 2350 nm 波长范围内的 214 个波段 并提取各波段平均波长的光谱反射率。

1983 年由 Wold 和 Albano 等人首次提出偏最小二乘回归 (partial least squares regression ,PLS)^[15]。目前 PLS 方法作为一种有效的光谱分析方法 ,在分析化学中已得到了广泛的应用^[16]。该方法提供一种多对多线性回归建模的方法 ,当两组变量的个数很多 ,且都存在多重相关性 ,而观测数据的数量又较少时 ,与传统的多元线性回归分析方法相比 ,PLS 方法解决了多元线性回归所面临的多重共线性问题 ,可以概括提取光谱信息 ,从而可较准确定量预测重金属元素的含量。

利用土壤反射光谱 ,通过 SAS 软件中 PLS 过程建模预测土壤重金属元素含量。在 PLS 建模过程中 ,以目前最常用的 PRESS (prediction residual sum of squares)作为依据 ,由于 PRESS 越小 ,由此提取出成分建立的模型预测能力就越强。先通过舍一交叉验证方法确定 PRESS 的极小值 ,并由此得出抽取成分的个数 ,进而建立重金属预测模型^[15 ,17]。

2 结果与分析

2.1 崇明东滩盐沼土壤的反射光谱曲线特征

与典型植被的光谱曲线相比 ,采集回实验室干燥后的崇明东滩盐沼土壤样品的土壤反射光谱曲线比较平滑 (图 2)。在 350 ~ 2500 nm 波长范围内 ,随着波长的增加 ,盐沼土壤的光谱反射率逐渐增高 ,在 1900 nm 和 2200 nm 波长附近有两个比较明显的吸收波谷。由于光谱反射信号在 400 nm 之前和 2350 nm 波段之后受干扰的影响较大 ,所以在本研究中只选择 400 ~ 2350 nm 波段范围的光谱数据。

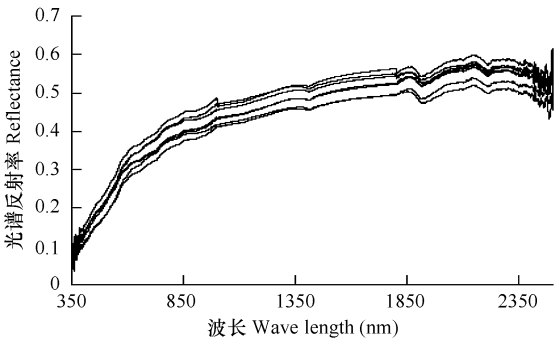


图 2 采集回实验室土壤样品的光谱反射率

Fig. 2 Reflectance of the soil samples measured in laboratory

2.2 崇明东滩土壤重金属含量的空间分布特征

图 3 显示了崇明东滩湿地土壤重金属含量从光滩到大堤的空间分布特征。沿样带 A ,从低潮滩到高潮滩大堤 ,土壤 Zn 含量最小的为 82.368 mg/kg ,最大的为 147.405 mg/kg ,变化较大 ,而 Cr 和 Cu 含量分别在 (66.094 ~ 82.600 mg/kg)和 (25.759 ~ 41.400 mg/kg)之间变动 ,变化较小。沿样带 B ,从低潮滩到高潮滩大堤 ,土壤重金属含量变化分别为 Zn (86.788 ~ 146.783 ~ 126.300 mg/kg) ,Cr (66.162 ~ 78.632 ~ 64.4000 mg/kg) ,Cu (26.9031 ~ 40.6162 ~ 27.000 mg/kg) ,均具有先增加后降低的分布特征。

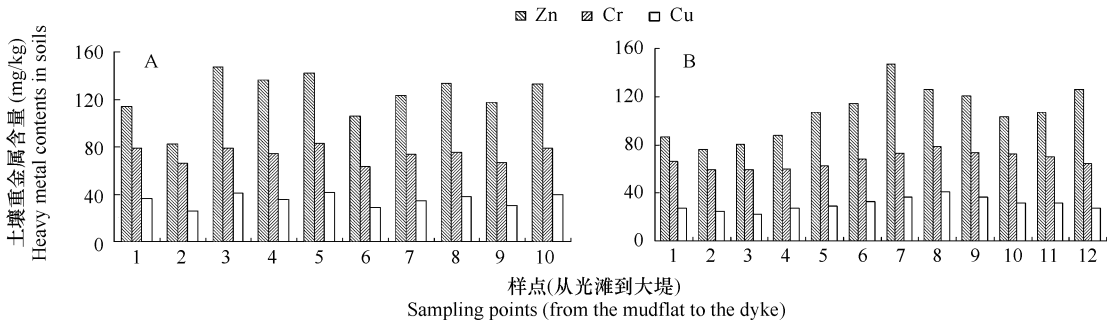


图 3 沿样带 A 和 B 的土壤重金属含量分布

Fig. 3 The distribution of heavy metal contents in soils along the sampling lines A and B

2.3 土壤光谱反射率与 Hyperion 高光谱波段建模效果比较

分别利用采样间隔为 1 nm 土壤光谱反射率和 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱各波段平均波长光谱反射率建模预测土壤重金属含量 ,比较所得的 3 种重金属预测值和实验测定值的相关系数发现 ,前者 Zn、Cr、Cu3 种重

金属的相关系数分别为 0.899 **、0.911 ** 和 0.929 ** ;后者 3 种重金属的相关系数分别为 0.822 **、0.761 ** 和 0.775 ** 如图 4。

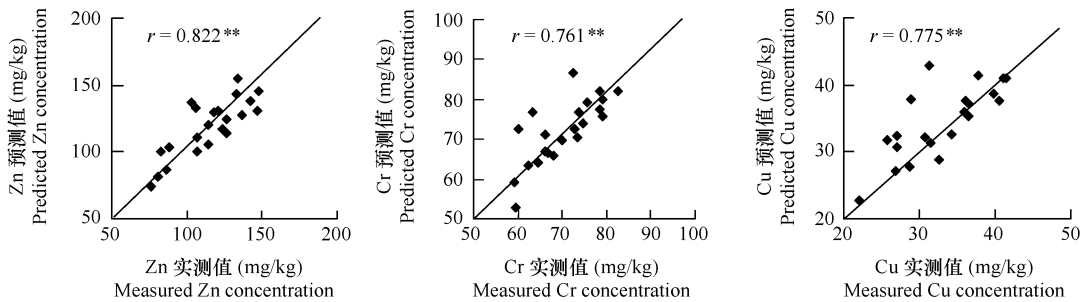


图 4 土壤重金属 Zn、Cr、Cu 实测值与预测值图示

Fig. 4 Plots of measured metal concentrations against the predicted values for all the soil samples

2.4 PLS 模型精度分析

利用 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱各波段平均波长反射率所建模型对土壤重金属含量进行预测 ,所得到的重金属预测值与实验室实测值进行比较 ,以验证模型的精度 ,结果如表 2。从 3 种重金属预测值与实验室测定值的相对误差结果可以看出 ,重金属 Zn 的相对误差最大为 32% ,而重金属 Cr 和 Cu 的最大相对误差分别

表 2 土壤重金属含量实测值与预测值相对误差分析

Table 2 The analysis of the relative error of the heavy metal contents between the measured and the predicted

样方号 Sample number	Zn 实测值 Measured Zn concentration (mg/kg)	Zn 预测值 Predicted Zn concentration (mg/kg)	相对误差 Relative Error (%)	Cr 实测值 Measured Cr concentration (mg/kg)	Cr 预测值 Predicted Cr concentration (mg/kg)	相对误差 Relative error (%)	Cu 实测值 Measured Cu concentration (mg/kg)	Cu 预测值 Predicted Cu concentration (mg/kg)	相对误差 Relative error (%)
1	114.1000	119.9790	-5	78.6000	77.5152	1	36.4000	37.2586	-2
2	82.3682	99.9050	-21	66.0942	71.1392	-8	25.7588	31.8366	-24
3	147.4052	145.9440	1	79.0419	79.8032	-1	41.1178	40.9869	0
4	136.4089	127.8950	6	74.5317	74.0798	1	35.8709	35.8821	0
5	142.1000	138.4030	3	82.6000	81.8696	1	41.4000	41.0245	1
6	105.7731	133.0110	-26	63.3240	76.8742	-21	28.9652	37.7515	-30
7	123.4531	116.9380	5	73.4531	70.5902	4	34.3313	32.6885	5
8	133.4466	154.6570	-16	75.5698	79.0955	-5	37.7849	41.3614	-9
9	117.6177	129.2600	-10	66.8396	66.6255	0	30.7263	32.2332	-5
10	132.9000	143.0920	-8	79.0000	75.8542	4	39.8000	38.5860	3
11	86.7876	86.6050	0	66.1618	66.8997	-1	26.9031	27.0880	-1
12	75.9000	74.1880	2	59.6000	52.8102	11	25.0000	19.5520	22
13	80.3714	81.6970	-2	59.3051	59.3105	0	21.9649	22.6736	-3
14	87.7702	103.4740	-18	60.0480	72.3717	-21	27.0216	32.4503	-20
15	106.6441	100.6960	6	62.2506	63.2701	-2	28.7310	27.6783	4
16	114.0088	105.8830	7	67.9456	65.7347	3	32.5739	28.8430	11
17	146.7826	131.2400	11	72.9416	72.5434	-1	36.5707	35.3933	3
18	125.9504	114.4690	9	78.6315	82.0387	-4	40.6162	37.6913	7
19	120.7000	131.2280	-9	73.8000	76.8062	-4	36.2000	37.5684	-4
20	103.4105	136.8430	-32	72.3973	86.7565	-20	31.3123	42.8299	-37
21	107.1286	111.1000	-4	69.8882	69.6483	0	31.5495	31.3012	1
22	126.3000	124.3170	2	64.4000	64.2092	0	27.0000	30.6735	-14
平均相 对误差	Average relative error		-4			-3			-4

为 21% 和 37%。3 种重金属的平均相对误差为 4%、3% 和 4%。利用采样间隔为 1nm 的土壤光谱反射率所建模型得到的重金属预测值与实验室测定值进行相对误差分析,3 种重金属 Zn、Cr、Cu 的平均相对误差分别为 3%、1%、2%。

3 讨论

3.1 崇明东滩重金属空间分布特征分析

上海地区潮滩沉积物中,滩涂重金属的分布与沉积动力作用密切相关,在水动力条件较弱的淤涨岸段和高潮滩部位,伴随着细颗粒泥沙的大量沉积,Zn、Cr 和 Cu 等重金属元素明显趋于富集,比中、低潮滩要高,而中、低潮滩各元素的含量比较接近,没有明显的差异^[13],但是上述研究结论只是在高、中和低潮滩分别取了 3 个样点进行分析得出的结果。本项研究中沿样线 B,土壤重金属含量从光滩到大堤先是增加(图 3),与上述结论相符合,而大堤附近样点的重金属含量又有所降低。杨萌等提出的在崇明东滩沿岸筑堤后沉积物变粗,泥质含量低,重金属元素随潮流扩散,不易在沉积物中累积^[4],与本研究结果相同。而样线 A 与样线 B 比较,前者没有后者的特征,这是因为样线 A 各样点所处的位置在一条人工修建的用于试验路堤旁边,是路堤改变了水动力条件的原因。因此崇明东滩土壤重金属含量的空间分布特征是从低潮滩到高潮滩逐步增加,但是当增加到最大值后,由于受大堤的影响,重金属的含量又有所下降。在水动力条件被改变的情况下,如样线 A,重金属含量的分布则不具有上述的空间特征。水动力条件的改变对重金属元素在沉积物中沉降规律的影响有待进一步的研究。

3.2 利用高光谱遥感技术反演土壤重金属含量可行性分析

高光谱遥感作为一种新技术,可以提供土壤表面状况及其性质的空间信息,同时也具有评价土壤性质差异的潜力^[8]。各种类型的土壤包含着不同比例的液态水、矿物质和有机质成分,所有这些组成成分均对土壤光谱特征有贡献。已有一些学者应用反射光谱法定量预测具有反射特征的土壤水分、有机质等含量^[6,19]。Thomas 利用 ASD 地物光谱仪测量土壤重金属 Pb 元素在不同浓度下的土壤反射光谱发现,Pb 元素浓度越高,土壤的反射光谱越低,并利用反射光谱成功预测了矿区土壤中重金属 Hg、Pb、Sb、As、Fe₂O₃ 的含量^[10]。李巨宝等利用 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^[20]。以上研究说明,利用土壤反射光谱可以定量监测土壤中的重金属含量。

本研究通过在实验室内测定崇明东滩盐沼土壤的反射光谱,根据 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱仪的波段设置,提取 400~2350nm 波长范围内各波段平均波长的光谱反射率,模拟了 Hyperion 高光谱数据。在 PLS 建模过程中,以 PRESS (预测残差之和)为依据,利用舍一交叉验证方法验证模型的预测能力,确定 PRESS 的极小值,并由此得出 PRESS 极小值对应的变量个数,进而建模预测盐沼土壤 3 种重金属 Zn、Cr、Cu 的含量。通过获得 PRESS 极小值对应的变量个数建模,避免了不准确的变量个数对所建 PLS 模型精度的影响,提高了模型的预测能力。比较 PLS 模型的预测值与 3 种土壤重金属含量的实测值(图 4),发现二者吻合较好,均达到了极显著相关,而且具有较高的相关系数。另外通过验证 PLS 建模定量预测土壤重金属含量的精度(表 2),可以发现,22 个土壤样品中 3 种重金属含量的相对误差中,Zn 的相对误差超过 10% 的有 6 个,Cr 和 Cu 分别只有 4 个和 7 个,并且平均相对误差都小于 4%。与杨燕明等的研究结果相比较^[7],本研究具有较好的土壤重金属含量的预测能力和较高的 PLS 模型精度。这说明利用高光谱遥感定量反演土壤重金属含量是可行的。而且通过对光谱采样间隔为 1nm 的土壤反射率和 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱波段建模效果比较发现,不论是比较预测值与实测值的相关系数,还是相对误差,前者所建模型对土壤重金属含量的预测要好于后者,说明光谱分辨率越高,对土壤的定量反演能力就越好。

长江口盐沼湿地高程 2m 以上覆盖有盐沼植被,目前难以直接应用高光谱遥感技术评价其土壤重金属含量。同时,由于土壤水分以及其他一些有机质等物质的存在,现场测定的盐沼土壤光谱反射率与带回实验室干燥后的土壤会有所不同。因此,本研究的对象为带回实验室干燥后的盐沼土壤,是在实验室内模拟

Hyperion 高光谱数据反演盐沼土壤重金属含量可行性的初步研究。现场盐沼土壤水分、有机质含量等因素对利用高光谱遥感数据反演盐沼土壤重金属含量的影响还有待进一步研究,以期研究在海陆相互作用下盐沼土壤重金属含量的动态变化,并为应用高光谱遥感技术大尺度快速评价重金属污染和实现海岸带环境的动态监测提供科学依据。

4 结论

本研究对长江口盐沼土壤反射光谱进行了分析,在此基础上应用 PLS 方法,用土壤光谱反射率定量预测了土壤重金属含量,并验证了预测的精度,得出以下结论:

(1)崇明东滩自然保护区湿地土壤中 Zn、Cr、Cu 3 种重金属含量,从低潮滩光滩到高潮滩大堤具有先增加后降低的空间分布特征。

(2)运用高分辨率的地物光谱仪测定的盐沼土壤光谱信息,可以反演盐沼土壤的重金属含量,利用高光谱遥感技术定量反演盐沼土壤重金属含量是可行的。

(3)利用 EO-1 卫星 Hyperion 高光谱各波段平均波长反射率对 Zn、Cr 和 Cu 含量进行反演,均达到极显著水平。通过与采样间隔为 1nm 土壤光谱反射率反演结果的比较发现,光谱分辨率越高,对土壤的反演预测能力就越好。

盐沼土壤反射光谱与重金属含量之间的定量反演研究,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了技术和理论支持。

References :

[1] Wang Y H , Zhang J , Shen H T. Review of accumulation features study of heavy metal in sediment of tidal flat. *Advance in Earth Sciences* ,2002 , 17 (1) 69 — 77.

[2] Williams T P , Bubb J M , Lester J N. Metal accumulation within salt marsh environments :a review. *Marine pollution Bulletin* ,1994 ,28 (5) :277 — 290.

[3] Wang G P , Liu J Sh. Distribution of heavy metals in sediment from the EBFZ (ERBAIFANGZI) marsh. *Acta Pedologica Sinica* ,2002 ,39 (6) : 810 — 821.

[4] Yang M , Chen Zh Y , Wang Zh H. Distribution of heavy metal elements on the tidal flat of Chongming Island , Yangtze Estuary , Shanghai. *Shanghai Geology* ,2002 ,1 19 — 23.

[5] Sha J M , Chen P Ch , Chen S L. Characteristics analysis of soil spectrum response resulted form organic material. *Research of Soil and Water Conservation* ,2003 ,10 (2) 21 — 24.

[6] Xie B C , Xue X Z , Wang J H , *et al.* Spectral characteristics of brown-humid soil and estimation of soil organic matter content by soil reflectivity. *Chinese Journal of Soil Science* ,2004 ,35 (4) 391 — 395.

[7] He X S. Advance and prospect of near infrared reflectance spectroscopy applied in soil science. *Review of China Agricultural Science and Technology* ,2004 ,6 (4) 71 — 76.

[8] Kooistra L , Leuven R S E W , Wehrens R , *et al.* A comparison of methods to relate grass reflectance to soil metal contamination. *International Journal of Remote Sensing* ,2003 ,24 (24) #995 — 5010.

[9] 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 floodplains. *Analytica Chimica Acta* ,2001 ,446 97 — 105.

[10] Thomas K , Stefan S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science & Technology* ,2002 ,36 (12) 2742 — 2747.

[11] Wu Y Zh , Chen J , Ji J F , *et al.* Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination. *Environmental Science & Technology* ,2005 ,39 (3) 873 — 878.

[12] Gao Zh G , Zhang L Q. Measuring and analyzing of the multi-seasonal spectral characteristics for saltmarsh vegetation in Shanghai. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 ,26 (3) 793 — 800.

[13] Chen Zh L , Xu Sh Y , Liu L , *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai coastal zone. *Acta Geographica Sinica* ,2000 ,55 (6) 641 — 651.

[14] Zhou Q ,Zhou B ,Wang R Ch ,*et al.* Effect of geometric conditions on soil hyperspectral data scatter characteristic in laboratory test. Journal of South China Agricultural University ,2005 ,26 (1) :31 — 35.

[15] Gao H X. Applied multivariate methods for data analysis. Beijing :Beijing University Press ,2005 ,369 — 379.

[16] Zheng Y M ,Zhang J ,Chen X D ,*et al.* The PLS analysis with short wave near-infrared of whole wheat for protein. Spectroscopy and Spectral Analysis ,2004 ,24 (9) :1047 — 1049.

[17] Yang Y M ,Liu Z W ,Chen B Q ,*et al.* Retrieval of oceanic color constituents from case II water reflectance by partial least squares regression. Journal of Remote Sensing ,2005 ,9 (2) :123 — 130.

[18] Pu R L ,Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications. Beijing :Higher Education Press ,2000. 115 — 121.

[19] Li J L ,Jiang P ,Liu P J ,*et al.* The study on dynamic monitoring soil water contents using remote sensing optical method. Acta Ecologica Sinica ,2003 ,23 (8) :1498 — 1504.

[20] Li J B ,Tian Q J ,Wu Y Z. The study of spectral responses of agricultural soils for Fe ,Zn and Se in the area of Fuyang riversides. 2005 ,3 :10 — 13.

参考文献：

[1] 王永红,张经,沈焕庭. 潮滩沉积物重金属累积特征研究进展. 地球科学进展,2002,17(1):69~77.

[3] 王国平,刘景双. 二百万方沼泽湿地沉积物重金属分布特征研究. 土壤学报,2002,39(6):810~821.

[4] 杨萌,陈中原,王张华. 长江口崇明岛滩地重金属元素分布探讨. 上海地质,2002,1:19~23.

[5] 沙晋明,陈鹏程,陈松林. 土壤有机质光谱响应特性研究. 水土保持研究,2003,10(2):21~24.

[6] 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. 土壤通报,2004,35(4):391~395.

[7] 何绪生. 近红外反射光谱分析在土壤学的应用及前景. 中国农业科技导报,2004,6(4):71~76.

[12] 高占国,张利权. 上海盐沼植被的多季相地面光谱测量与分析. 生态学报,2006,26(3):793~800.

[13] 陈振楼,许世远,柳林,等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积. 地理学报,2000,55(6):641~651.

[14] 周清,周斌,王人潮,等. 室内几何测试条件对土壤高光谱数据离散性的影响. 华南农业大学学报,2005,26(1):31~35.

[15] 高慧璇. 应用多元统计分析. 北京:北京大学出版社,2005,369~379.

[16] 郑咏梅,张军,陈星旦,等. 短波近红外光谱的整粒小麦蛋白质 PLS 方法的定量分析. 光谱学与光谱分析,2004,24(9):1047~1049.

[17] 杨燕明,刘贞文,陈本清,等. 用偏最小二乘法反演二类水体的水色要素. 遥感学报,2005,9(2):123~130.

[18] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京:高等教育出版社,2000,115~121.

[19] 李建龙,蒋平,刘培君,等. 利用遥感光谱法进行农田土壤水分遥感动态监测. 生态学报,2003,23(8):1498~1504.

[20] 李巨宝,田庆久,吴均昭. 滏阳河两岸农田土壤 Fe、Zn、Se 元素光谱响应研究. 遥感信息,2005,3:10~13.