

引用格式: Zhang Xiaoguang, Jiang Zixuan, Kong Fanchang. Hyperspectral Characteristics of Coastal Saline Soil with Visible/near Infrared Spectroscopy[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(4): 816-821. [张晓光, 姜子璇, 孔繁昌. 滨海盐渍土可见近红外高光谱特征[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(4): 816-821.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.4.0816

滨海盐渍土可见近红外高光谱特征

张晓光^{1,2}, 姜子璇¹, 孔繁昌¹

(1. 青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109;

2. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 土壤光谱是遥感监测的物理基础, 盐渍化土壤光谱特征研究对于盐渍化土地的监测有着重要的意义。以黄河三角洲地区的滨海盐渍土为研究对象, 通过野外土壤样品采集和高光谱测量, 研究在去除水分以及剔除土壤质地影响后, 不同盐渍化程度的滨海盐渍土在 350~1 100 nm 区间的高光谱反射和吸收特征, 并且试图构建光谱预测模型。结果表明: 平滑后的光谱曲线能更准确有效地描述光谱的反射特征及吸收峰。不同盐化程度的土壤光谱曲线形态一致, 但反射率大小差异较大。连续统去除后, 490 nm 处轻度盐化土吸收最小, 在 760~920 nm 区间重度盐化土的吸收更强烈。原始光谱不能预测土壤盐渍化信息, 但是二阶微分变换能够提高波段敏感性, 建立的光谱预测模型能够基本满足预测要求。

关键词: 滨海盐渍土; 高光谱特征; 可见光短波红外

中图分类号: TP79; O433.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)04-0816-06

1 引言

我国现存盐渍土总面积约 1 亿 hm^2 , 盐渍土的类型繁多, 盐分组成受到诸多复杂因素(包括气候、地形及地貌、水文、成土母质、生物等)的影响^[1]。近年来, 在滨海地区更是受到土地过度开发利用、农业不合理灌溉以及海水影响等因素的干扰, 致使滨海土壤盐渍化及次生盐渍化危害日益凸显, 因而对于盐渍化信息的监测显得尤为重要。

传统的盐渍土监测主要通过野外采样, 然后带回实验室进行理化分析, 这种方法在大尺度区域监测时时效性差^[2-3]。随着高光谱遥感技术的日趋成熟为盐碱土监测提供了新的思路^[4-7], 高光谱遥感获取地表反射或辐射能量具有动态性强、客观综合等优势逐步成为新的研究热点并具有广泛的前景。对地物光谱特征分析是卫星遥感解译和近地传感器探测的理论基础, 为航空航天遥感技术监测地表

动态提供理论依据^[4]。

一般认为, 在可见光和近红外区间盐渍土与非盐渍化土地相比有着较强的光谱反射, 且土壤盐渍化程度越高, 光谱反射率越大^[4-5]。而近期的研究成果则表现出不完全一致的结论。例如新疆渭干河一库车河三角洲的盐渍土, 在 1 400~2 500 nm 区间, 除了非盐渍化土壤之外, 其他盐渍化程度的土壤光谱反射率随盐分的增加而增大^[8], 而在 350~1 400 nm 之间, 则没有明显规律性变化。在北疆低盐度($<1.66\text{g/kg}$)土壤中, 土壤的光谱反射率(1 350~1 850 nm)也有类似结论^[9]。就整个光谱区间而言, 土壤反射率与盐分含量之间无明显规律^[10]。黄河上中游地区宁夏龟裂碱土在高 pH 的情况下, 不同程度盐渍化土壤的光谱曲线也没有规律^[11], 而土壤碱化程度越强, 土壤光谱反射率越高^[12]。刘焕军等^[13]研究发现, 东北苏打盐渍土区, 富含盐分的碱斑

收稿日期: 2018-06-24; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601211), 土壤与农业国家重点实验室开放基金项目(Y20160007), 山东省重点研发计划项目(2017CXGC0303), 青岛农业大学高层次人才科研基金项目(1114344), 国家级大学生科技创新基金项目(201710435074)。

作者简介: 张晓光(1983—), 男, 山东济南人, 博士, 讲师, 主要从事土壤资源调查与遥感信息提取等方面研究。E-mail: zhangxg_66@163.com。

在500、670、1 418、1 915和2 210 nm附近有5个明显的吸收谷,且其反射率和吸收强度均显著强于其他类型土壤。吉林长岭县的盐碱土随着盐分的增加,光谱反射率减小,到达某一临界值后,随着盐分的增加,光谱反射率会增大^[14]。滨海盐渍土区,在野外水分影响下,土壤反射率随盐分的增加而降低^[15]。黄河三角洲也呈现同样的结论^[16]。众多的研究表明,不同区域盐渍土的光谱特征并不统一,这与盐分类型、土壤理化性质有重要的关系。

虽然滨海盐渍土的光谱特征前人做过一定的研究,但是其数据不是单一环境下测量得到,多基于野外实测数据,所得到的光谱特征是受水分影响下的特征。因为测量环境不尽相同,这与其他盐渍土区基于室内测量光谱数据得到的结论不能完全比较,因而尚需要对滨海盐渍土的真实光谱特征进一步研究。以黄河三角洲地区的滨海盐渍土为研究对象,剔除水分影响,通过室内测量对盐渍土的高光谱特征进行了分析,并尝试了建模,为进一步探索盐渍土高光谱定量反演提供理论支持。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

土壤样品采自山东省垦利县。垦利县被黄河贯穿,东部靠近海洋,属于典型的黄河三角洲地区。该区位于温带大陆性季风气候区,四季分明。地下水位较低,又因为海水的侧渗影响,土壤中含盐量高,尤其是 Cl^- 和 Na^+ 较多^[17],属于典型滨海盐渍化土壤类型区。

2.2 样品采集和处理

共采集了表层(0~20 cm)土样40份,样点主要覆盖了盐渍化荒草地、林地和棉花地等多种土地利用类型。采集时用手持GPS对采样点进行定位与记录。围绕采样点周围采集3~6个样点的土壤加以混合,从中取1~2 kg作为一个土样。

对采集的土样进行风干,挑出石块、瓦砾、作物和植被根系等杂质,用木棒碾碎后过2 mm筛后待用。土壤盐分用电导率法测量,pH用电位法测量。具体方法见文献^[18]。

2.3 光谱测量

光谱采集采用Avantes光谱仪,该光谱仪光谱范围为350~1100 nm。测量时选择天气晴朗的条件,并且先进行白板校正。然后将被测的土样分别装于培养皿中,用刀片或者塑料直尺刮去超出部分

土壤,保证培养皿表面平整光滑,然后放置草坪。将探头垂直对准土壤,距离约15 cm,打开仪器测量土壤光谱反射率,并进行记录。共采集了40个土样的光谱反射率,每个土壤样采集10次取平均值。

2.4 光谱处理及建模

光谱采集完毕后,为了抑制噪声,对原始光谱进行了9点加权移动平均法平滑处理^[10]。为了更好地体现光谱信息,增强光谱数据和盐分之间的相关性,本文对光谱数据又分别进行了对数、倒数、倒数对数、倒数后一阶微分、一阶微分及二阶微分等变换,具体的光谱变换方法可参见文献^[8,11]。将各类完成光谱变换的光谱数据,分别作为自变量,土壤盐分作为因变量,构建最小二乘回归方程。

3 光谱特征分析

3.1 土壤光谱整体反射特征

以k154号样品为例(如图1所示),测量的土壤原始光谱反射率曲线存在“毛刺”现象,说明受水分、空气的影响能量波动较大,有很多噪声。尤其是在350~399 nm、1 061~1 100 nm和850~950 nm区间光谱波动最大,不易对光谱特征进行描述,因而需要对光谱进行平滑处理。经过平滑后的反射率曲线(红色曲线)与平滑前的相比,总体趋势没有改变,但去除了原有的噪声,曲线变得平整光滑,能更准确有效地描述光谱的反射特征及吸收峰。

从图1可看出,光谱曲线在400~600 nm的反射率相对较小,随着波长的增加逐渐升高。600~850 nm区间上升较为平缓。在760 nm附近出现第一个微弱吸收峰;在900和950 nm附近出现吸收深度与吸收宽度较大的水汽吸收峰^[4];1 000 nm以上吸收更加强烈。

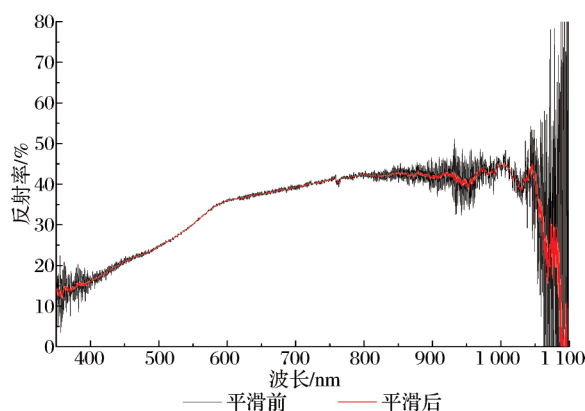


图1 平滑前后土壤光谱反射率

Fig.1 Soil spectral reflectance before and after smoothing

3.2 不同盐化程度的土壤光谱特征

根据已有的该地区土壤电导率与全盐含量的换算关系^[17],将土壤样品的电导率换算为土壤盐分含量。按照中国盐渍土等级划分^[19],将所有土样的盐分含量进行归类,划分为非盐化(0~1 g/kg)、轻度盐化(1~2 g/kg)、中度盐化(2~4 g/kg)、重度盐化(4~6 g/kg)、盐土(≥ 6 g/kg)五大类,不同盐化程度区间内的光谱曲线求平均值,如图2所示。

从图2中光谱形态来看,不同盐化程度的土壤光谱反射率曲线的趋势保持一致,且基本平行,但反射率大小差异较大。从整体的反射率来看,轻度盐化的土壤光谱反射率最高,紧挨其次是中度盐化土壤,盐土、非盐化土次之,重度盐化土的反射率最低。其中轻度盐化与中度盐化土的反射率曲线较为相近,在400~450 nm范围内两者的反射率曲线重合。在760 nm处出现微弱吸收峰,轻度盐化与重度盐化的吸收程度明显高于中度盐化、盐土与非盐化土。1 040 nm处盐土的反射率最高,随后所有光谱反射率均下降趋势。

Rao等^[4,20]研究认为盐分越高,反射率越大,这在盐分相差较大的情况下反映比较明显。而黄帅等^[8]研究新疆地区的盐渍土时认为光谱反射率和盐分之间在曲线形态上没有明显的规律,本文研究结果与之一致。Liu等^[7]研究江苏滨海盐渍化土壤时发现盐分越低,光谱反射率越高,而本文则没有表现出相应的规律,主要原因在于本文的光谱测量没有受到水分的影响导致。

将不同盐渍化程度的土壤光谱反射率曲线在ENVI中进行连续统去除^[10],各土壤光谱反射率归一化到0~1之间,突出了原有吸收峰的特征(图3),而原本不明显的吸收峰也被显示出来,有利于对不同盐化的土壤反射率进行有效准确的特征描述以及比较。

从图3可看出,有多处明显的吸收峰。其中400和490 nm的两处吸收峰在连续统去除之前并不明显,通过连续统去除后,其宽度是6处吸收峰中最宽的,其深度也明显加深。在490 nm处,轻度盐化土壤的吸收最小,其他不同盐化程度的土壤吸收相近。760 nm处的吸收峰窄而尖。在760~920 nm区间重度盐化土的土壤反射率曲线的形态异于其他4类土壤反射率曲线,该曲线在其他曲线下方且呈明显吸收加强趋势,只在900 nm处有波动,而其他曲线在该范围内大致重合且呈上下波动的状态。

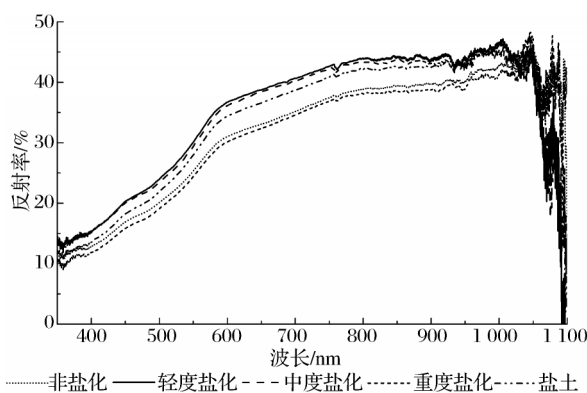


图2 不同盐化程度土壤光谱反射率曲线

Fig.2 Spectral reflectance curves with different soil salinity

940~1000 nm附近重度盐化土的吸收峰深度较其他的明显加深,吸收曲线位于其他曲线的下方,差距较大。

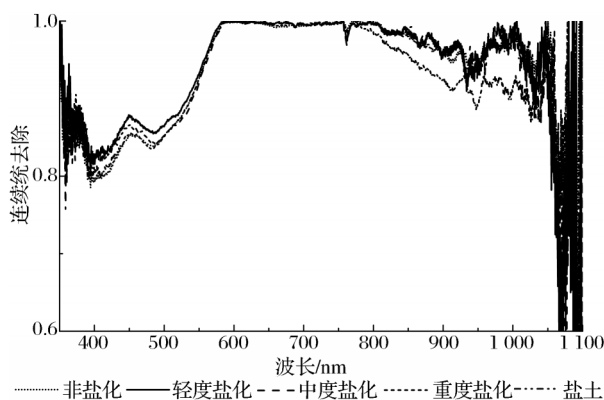


图3 不同盐化程度土壤连续统去除曲线

Fig.3 Continuum removal curves with different soil salinity

彭杰等^[10]利用连续统去除法研究土壤盐分光谱时发现在820~1 350 nm内吸收峰的宽度较宽。Liu等^[7]在对江苏滨海盐渍土进行盐分含量预测时,对光谱曲线去除包络线后在350~1 100 nm内的有3处吸收(489、668和902 nm),与本文相一致的也有两处。

4 土壤盐分光谱预测模型分析

理论上不同盐渍化程度的土壤光谱存在差异,本文将测得的土壤原始光谱数据进行平滑后以采样间隔为10 nm进行重采样,将重采样后的光谱反射率数据对含盐量在SPSS中进行相关性分析,发现含盐量与各波段间的不存在显著的线性相关。因为原始光谱数据本身与土壤盐渍化指标之间并不具备相关性(图4),所以利用原始光谱反射率不

能够建立土壤盐渍化预测模型。强制建立的基于光谱数据的盐渍化线性回归模型不能通过检验。

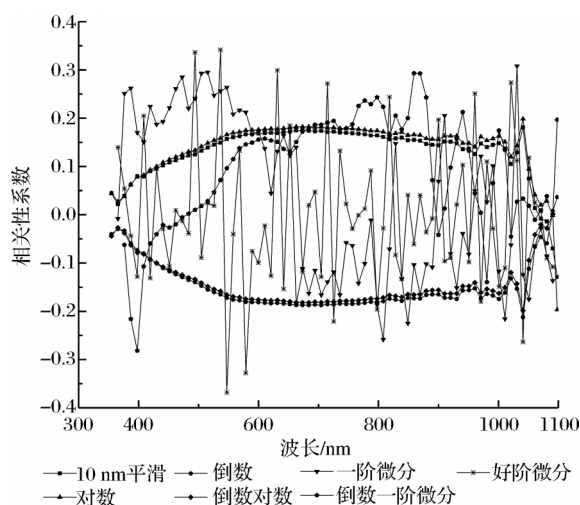


图4 土壤盐分与变换光谱相关性

Fig.4 Correlations between soil salinity and transformed spectra

原始光谱平滑重采样后与盐分相关分析结果显示,相关系数位于0~0.18之间,系数值较小。为了提高光谱数据的敏感性和可用性,很多学者运用了光谱变换方法,如对数变换、倒数变换、微分变换等,也取得了一定的效果^[8,21-23]。本文也对光谱数据进一步分别进行了对数、倒数、倒数对数、倒数后一阶微分、一阶微分、二阶微分等变换,并将变换后的光谱数据和盐分作相关分析,结果如图4所示。

对数变换后光谱与盐分相关系数比平滑重采样后的相关系数普遍有所提高,但是系数值基本还是小于0.18。而光谱取倒数后,相关系数值正好与重采样后系数大小相等正负相反,倒数对数后的相关系数与倒数变换后的系数大小相等正负相反,且倒数对数变换后相关系数绝对值略大于倒数变换绝对值。所有的相关系数也均不呈现显著性。因此,倒数变换、对数变换基本上不能较大程度提高光谱与盐分的相关性。

一阶微分变换后的光谱与盐分相关系数在数值上有较大的提高,尤其是350~600 nm区间明显高于前3种变换,相关系数达到了0.3。倒数+一阶微分变换后光谱与盐分的相关系数在350~760 nm区间没有提高,但是在800~900 nm光谱区间有所提高。尽管相关系数有所提高,但是并没有呈现显著性。所以说,一阶微分变换、倒数+一阶微分变换也不能较大程度提高光谱与盐分的相关性。

而二阶微分变换后的光谱与盐分的相关系数

进一步提高,且在494、536、547和579 nm处达到了显著水平($P < 0.05$)。将有显著相关的光谱波段作为变量构建回归方程,方程通过检验($\text{sig} = 0.026$)。

$$\text{盐分} = 7.71 \cdot R_{494} + 22.47 \cdot R_{536} - 12.105 \cdot R_{547} - 11.42 \cdot R_{579} - 2.78 \quad (1)$$

虽然构建的方程均方根误差较大($\text{RMSE} = 5.53$),但是拟合精度($R^2 = 0.265$)尚可,且 sig 值小于0.05,所以说方程能够基本满足盐分的预测。

5 结 语

本文通过分析黄河三角洲地区滨海盐渍土的高光谱数据,研究了不同盐化程度的土壤反射光谱和吸收特征,并尝试了预测模型的建立。经过平滑后的反射率曲线(红色曲线)与平滑前的相比,总体趋势没有改变,但去除了原有的噪声,曲线变得平整光滑,说明光谱平滑是极有必要的。光谱曲线在400~600 nm区间的反射率相对较小,随着波长的增加逐渐升高。600~850 nm区间上升较为平缓。在760 nm附近出现第一个微弱吸收峰;在900 nm、950 nm附近出现吸收深度与吸收宽度较大的水汽吸收峰;1000 nm以上吸收更加强烈。

不同盐化程度的土壤光谱反射率曲线的形态保持一致,且基本平行。从整体的反射率来看,轻度盐化的土壤光谱反射率最高,紧挨其次是中度盐化土壤,盐土、非盐化土次之,重度盐化土的反射率最低。在490 nm处,轻度盐化土壤的吸收最小,其他不同盐化程度的土壤吸收相近。在760~920 nm区间重度盐化土的土壤反射率曲线在其他曲线下且呈明显吸收加强趋势。这些均是建立光谱模型预测土壤盐分的基础。

为了寻找最好的敏感波段,本文对光谱数据分别进一步进行了对数、倒数、倒数对数、倒数后一阶微分、一阶微分、二阶微分等变换,并将变换后的光谱数据和盐分作相关分析,发现二阶微分变换后能有效提高光谱与盐分的相关性。将有显著相关的光谱波段作为变量,构建的回归方程能够通过检验($R^2 = 0.265$)。

前人曾利用350~2 500 nm光谱波段构建过氯化物为主的滨海盐渍土预测模型,得到了较好的预测效果^[24-25]。但是其多数并未去除土壤水分的影响,也没有单一利用350~1 100 nm区间建立模型。所以利用可见光短波近红外区间波段(350~1100 nm)构建光谱预测模型,在光谱区间选择上具

有积极意义。结合前人的研究结果,认为后期的工作可以考虑扩大光谱区间,开发和验证红外光谱模型^[26-27]以提高滨海盐渍土预测精度上的潜力。

参考文献(References):

- [1] Liu G M, Yang J S, He L D, *et al.* Salt Dynamics in Soil Profiles during Long-term Evaporation under Different Groundwater Conditions [J]. *Plant Biosystems*, 2013, 147 (4):1211-1218.
- [2] Allbed A, Kumar L, Aldakheel Y Y. Assessing Soil Salinity Using Soil Salinity and Vegetation Indices derived from IKONOS High-spatial Resolution Imageries: Applications in a Date Palm Dominated Region[J]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 1-8.
- [3] Nawar S, Buddenbaum H, Hill J, *et al.* Modeling and Mapping of Soil Salinity with Reflectance Spectroscopy and Landsat Data Using Two Quantitative Methods (PLSR and MARS). *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10813-10834.
- [4] Rao B R M, Sankar T R, Dwivedi R S, *et al.* Spectral Behavior of Salt-affected Soils [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2125-2136.
- [5] Farifteh J, Meer F, Meijde M, *et al.* Spectral Characteristics of Salt-affected Soils: A Laboratory Experiment[J]. *Geoderma*, 2008, 145: 196-206.
- [6] Shi X Z, Aspandiar M, Oldmeadow D. Using Hyperspectral Data and PLSR Modelling to Assess acid Sulphate Soil in Sub-surface [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (5): 904-916.
- [7] Liu Y, Pan X Z, Wang C K, *et al.* Predicting Soil Salinity with Vis-NIR Spectra After Removing the Effects of Soil Moisture Using External Parameter Orthogonalization [J]. *PLoS One*, 2015, 10(10):1-10.
- [8] Huang Shuai, Ding Jianli, Li Xiang, *et al.* Hyperspectral Characteristics Analysis and Modeling of Soil Salinization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47 (5): 1042-1048. [黄帅,丁建丽,李相,等.土壤盐渍化高光谱特征分析与建模[J].土壤通报,2016,47(5):1042-1048.]
- [9] Li Jing, Wang Keru, Li Shaokun, *et al.* Cotton Soil Salinity Monitoring based on a Spectrum-Salt Index [J]. *Cotton Science*, 2014, 26(6):555-562.[李静,王克如,李少昆,等.利用光谱-盐分指数监测棉田土壤盐分[J].棉花学报,2014,26(6):555-562.]
- [10] Peng Jie, Chi Chunming, Xiang Hongying, *et al.* Inversion of Soil Salt Content based on Continuum-Removal Method [J]. *Aata Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 460-469.[彭杰,迟春明,向红英,等.基于连续统去除法的土壤盐分含量反演研究[J].土壤学报,2014,51(3):460-469.]
- [11] Guan Hong, Jia Keli, Zhang Zhinan, *et al.* Research on Remote Sensing Monitoring Model of Soil Salinization based on Spectrum Characteristic Analysis [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(2): 100-104.[关红,贾科利,张至楠,等.盐渍化土壤光谱特征分析与建模[J].国土资源遥感,2015,27(2):100-104.]
- [12] Zhang Junhua, Ma Tiancheng, Jia Keli. Factors Affecting Spectral Characteristics of Typical Takyr Solonetz[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 158-165.[张俊华,马天成,贾科利.典型龟裂碱土土壤光谱特征影响因素研究[J].农业工程学报,2014,30(23):158-165.]
- [13] Liu Huanjun, Zhang Bai, Wang Zongming, *et al.* Soil Saline-alkalization Evaluation basing on Spectral Reflectance Characteristics [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 138-142.[刘焕军,张柏,王宗明,等.基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价[J].红外与毫米波学报,2008,27(2):138-142.]
- [14] Han Yang, Qin Weichao, Wang Yeqiao. Study on the Polarized Reflectance Hyperspectral Characteristics and Models of Typical Saline Soil in the West of Jilin Province, China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6):1640-1644. [韩阳,秦伟超,王野乔.吉林省西部典型盐渍化土壤偏振反射高光谱特征与模型研究[J].光谱学与光谱分析,2014,34(6):1640-1644.]
- [15] Liu Ya, Pan Xianzhang, Wang Miao, *et al.* Predicting Soil Salinity based on Spectral Symmetry under Wet Soil Condition [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(10):2771-2776.[刘娅,潘贤章,王淼,等.土壤湿润条件下基于光谱对称度的盐渍土盐分含量预测[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2771-2776.]
- [16] An Deyu, Zhao Gengxing, Chang Chunyan, *et al.* Estimation of Coastal Saline Soil Salinity in the Yellow River Delta based on Field Hyperspectra [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):843-850.[安德玉,赵庚星,常春艳,等.基于野外高光谱的黄河三角洲滨海盐渍土盐分含量估测研究[J].土壤通报,2015,46(4):843-850.]
- [17] Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Analysis on Salinity Characteristics and Profile Types of Saline Soils in Yellow River Delta [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(11):106-112.[姚荣江,杨劲松.黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(11):106-112.]
- [18] Lu Rukun. *Methods of Soil and Agro-Chemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.[鲁如坤.土壤农化分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.]
- [19] Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei, *et al.* Saline Soil of China [M]. Beijing: Science Press, 1993:130-216.[王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993:130-216.]
- [20] Zhang Fei, Tashpoat Tiyp, Ding Jianli, *et al.* The Study on the Reflectance Spectral Characteristic of Salt-Affected Soil in Typical Oasis of the Middle Reaches of Tarim River [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 921-932.[张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.塔里木河中游典型绿洲盐渍化土壤的反射光谱特征[J].地理科学进展,2012,31(7):921-932.]

- [21] Ji Wenjun, Shi Zhou, Zhou Qing, *et al.* VIS-NIR reflectance Spectroscopy of the Organic Matter in Several Types of soils[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 277-282.[纪文君,史舟,周清,等.几种不同类型土壤的VIS-NIR光谱特性及有机质响应波段[J].*红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 277-282.]
- [22] Wang Q, Li P H, Maina J N, *et al.* Study of How Salt Types Greatly Shape Soil Reflectance Spectra Versus Salt Concentrations [J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(9): 1503-1510.
- [23] Li Yan, Wang Ranghai, Guan Yanlong, *et al.* Prediction Analysis of Soil Total Nitrogen Content Based on Hyperspectral [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 173-179.[李焱,王让会,管延龙,等.基于高光谱反射特性的土壤全氮含量预测分析[J].*遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 173-179.]
- [24] Liu Yaqiu, Chen Hongyan, Wang Ruiyan, *et al.* Quantitative Analysis of Soil Salt and Its Main Ions based on Visible/Near Infrared Spectroscopy in Estuary Area of Yellow River [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016(10): 1925-1935.[刘亚秋,陈红艳,王瑞燕,等.基于可见/近红外光谱的黄河口区土壤盐分及其主要离子定量分析[J].*中国农业科学*, 2016(10): 1925-1935.]
- [25] Weng Y L, Gong P, Zhu Z L. A Spectral Index for Estimating Soil Salinity in the Yellow River Delta Region of China Using EO-1 Hyperion Data [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 378-388.
- [26] An Deyu, Xing Qianguo, Zhao Gengxing. Hyperspectral Remote Sensing of Soil Salinity for Coastal Saline Soil in the Yellow River Delta based on HICO Bands [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(6): 51-59.[安德玉,邢前国,赵庚星.基于HICO波段的滨海土壤盐分遥感反演研究[J].*海洋学报*, 2018, 40(6): 51-59.]
- [27] Wang Xiangfeng, Meng Jihua. Research Progress and Prospect on Soil Nutrients Monitoring with Remote Sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(6): 1033-1041.[王祥峰,蒙继华.土壤养分遥感监测研究现状及展望[J].*遥感技术与应用*, 2015, 30(6): 1033-1041.]

Hyperspectral Characteristics of Coastal Saline Soil with Visible/near Infrared Spectroscopy

Zhang Xiaoguang¹, Jiang Zixuan¹, Kong Fanchang¹

(1.College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil spectrum is the physical basis of monitoring with remote sensing, the research of saline soil spectral characteristics is of great significance for monitoring soil salinization. In this paper, coastal saline soil took from the Yellow River delta was selected as the research object. Through field sampled and indoor processing, Indoor spectra (350~1 100 nm) of coastal saline soil were measured. The characteristics of hyperspectral reflectance and absorption with different salinity were studied after eliminating the influence of moisture and soil texture, and then soil spectral prediction model was built. The results show that the reflection characteristics of spectra and the absorption peak could be decrypted more accurate and effective after smoothed spectral curves. The soil spectral curves with different salinity degree were similar and parallel in shape, while there were greatly differences among them. no obvious rule. After continuum removal was applied to soil curves, the absorption of light saline soil was minimal at 490 nm. Absorption of severe saline soil was more intense in 760~920 nm. The original spectrum couldn't predict soil salinization information, while the transformation of second-order differential could improve sensitivity of spectral data, and spectral prediction model could basically meet prediction requirements.

Key words: Coastal saline soil; Hyperspectral characteristics; Visible/short wave infrared spectroscopy