

露天煤矿排土场地表的光谱特征和土壤参数分析

孙红, 李民赞*, 赵勇, 李修华, 梁静娴, 陈玲

中国农业大学, 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 以辽宁海州煤矿露天排土场为研究对象, 分析了地表土壤光谱特征以及反射光谱与地表土壤参数的相关性。土壤反射光谱分析结果表明: 不同排土年限光谱反射率随排土年限的增长而降低; 不同土质中灰土和混合土的水分吸收谷表征不明显, 红壤土、黄土和红砂土光谱反射率以红壤土为最高, 以下依次为黄土和红砂土。土壤反射光谱与土壤参数相关性分析结果表明: 有机质含量与反射光谱相关性最高处的相关系数为-0.76, 其他参数与反射光谱相关系数较低。建立土壤有机质含量预测模型(建模 $R_c^2=0.7374$, 模型检验 $R_v^2=0.6824$)满足检测要求。分析了1910和1943 nm处光谱反射率与土壤含水量之间的关系, 结果表明由于排土场土壤的多样性和复杂性, 土壤全样本光谱反射率与土壤含水量之间呈非线性相关, 分别依年代、土质分组后, 土壤光谱反射率与土壤含水量均呈线性相关。

关键词 光谱分析; 土壤含水量; 土壤有机质; 排土场检测

中图分类号: O657.3, S15 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)12-3365-04

引言

辽宁阜新海州露天煤矿始建于1950年, 1953~2003年间累计为国家生产煤炭 5.2×10^8 t。矿区在采煤的同时, 排出发弃岩土, 形成了 1.3×10^4 hm²的排土场。煤矿排土场不仅占用大量土地, 还对土壤、地下水和空气造成污染, 给周边居民的生产、生活和健康构成严重的威胁^[1-3]。因此, 调研排土场土壤特性对恢复排土场生态系统具有重大意义。

近年来, 针对阜新煤矿生态恢复, 刘青柏^[4]、许丽^[5]、王志宏^[6]、陈英义^[7]、HAN^[8]等学者进行了一系列的调研, 其成果为植被恢复提供了一定的指导依据。上述研究数据的获取主要通过实地调查、采样, 实验室测定相关参数, 费时费力, 不能满足高效管理的需求。目前, 近红外光谱技术在土壤参数检测和预测方面取得了长足的发展。利用光谱技术分析矿区排土场土壤特征并为生态恢复提供理论依据和数据支持是可行的。本文即以辽宁省阜新海州露天排土场土壤为研究对象, 研究露天煤矿排土场地表的光谱特征并进行土壤参数分析, 旨在为海州排土场土地复垦及生态恢复提供依据, 也为其他矿区废弃地土壤评价提供新的技术参考。

1 材料和方法

海州矿位于辽宁省阜新市的南部, 地理坐标为东经121°26', 北纬42°02'。属于温带半干旱大陆性季风气候区, 地带性土壤是在各种岩石风化物残积母质上以黄土、红土母质发育的淋溶褐土、褐土性土。目前, 海州排土场东排土场最高标高达290 m, 以近年新覆土为主, 西排土场最高标高200 m, 历史较长主要以排土为主。排土场总体土壤基质除地带性土壤外, 还夹杂大量粉沙岩、砾岩和煤页岩等岩石成分^[4-8]。为实现排土场的植被恢复和土壤改良, 自2002年以来, 进行了大量的种植和新增农田复垦土的工作。

试验于2008年6月13~15日进行。综合考虑不同的排土年限、人工恢复年限及排土地貌将海州排土场划分为10个区域, 1~4区排土年限为8~15年, 恢复年度为2004年, 质地较细, 以黄土和红壤土为主; 5~8区排土年限为15~25年, 恢复年度为2002年, 质地较粗, 以灰土和黄土为主; 9~10区排土年限为25~35年, 恢复年度为2006年, 质地粗糙, 以黄土和灰土为主。依照各区域地貌特征和土壤特征, 分别选取3~7个点共采集50个土壤样本, 带回实验室进行红外光谱扫描, 并分别进行土壤水分含量、pH值、速效钾(K⁺)、电导率(EC)及有机质含量(SOM)的测定。

收稿日期: 2009-01-09, 修订日期: 2009-05-14

基金项目: 科技部国际合作重点项目(2007DFA91050)和“863”计划项目(2006AA10A301)资助

作者简介: 孙红, 女, 1980年生, 中国农业大学博士研究生 e-mail: honger102@163.com

* 通讯联系人 e-mail: limz@cau.edu.cn

近红外光谱测量采用德国布鲁克光学仪器公司生产的 MATRIX-I 型傅里叶变换近红外光谱分析仪,其光谱测量范围为 $12\,798\sim 3\,599\text{ cm}^{-1}$ ($781\sim 2\,779\text{ nm}$);分辨率为 4 cm^{-1} ;波数精度 0.1 cm^{-1} ;扫描次数为 32 次。取少量土样置于旋转样品池中,设置相关参数后即可获得样本光谱曲线。

2 结果和讨论

2.1 不同排土年限土壤光谱特性

依 8~15 年、15~25 年、25~35 年 3 个时间段划分排土年限,对各时间段内各土壤样本的反射光谱取平均,得图 1 所示不同排土年限光谱曲线。由图可知,不同排土年限土壤光谱整体趋势相似, $900\sim 1\,370\text{ nm}$, $1\,420\sim 1\,850\text{ nm}$, $1\,910\sim 2\,160\text{ nm}$ 各段范围内土壤光谱反射率随波长的增长而增大, $2\,290\sim 2\,500\text{ nm}$ 范围内反射率随波长的增加而降低。由于水分吸收的作用,不同排土年限光谱曲线均在 $1\,420$, $1\,910$, $2\,210\text{ nm}$ 处呈反射谷。

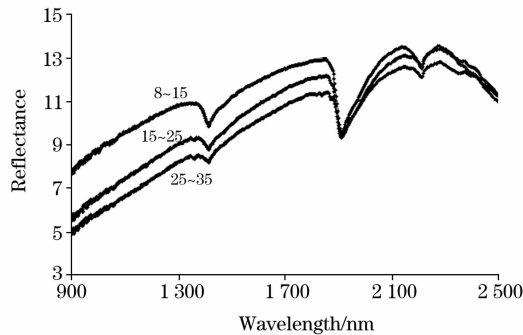


Fig. 1 Spectral reflectance of different stages' dump

但不同排土年限的光谱反射率明显不同,在 $900\sim 2\,500\text{ nm}$ 波段内,光谱反射率随排土年限的增长而降低,即 $R_{8-15} > R_{15-25} > R_{25-35}$ 。通常认为排土年限越长土壤风化及改良越好,光谱反射率越高。但测量结果与通常的认知有所不同,造成这种现象的主要原因是与排土场复杂的排土情况和人工恢复进展有关。影响土壤样本反射光谱的主要因素有土壤水分含量、土壤质地、土壤温度及土壤颜色。由于排土地表干旱,经测定不同排土年限平均土壤含水率范围为 $1.7\%\sim 3.9\%$,含水率极低可以忽略其影响;在室内获取各土样反射光谱,故也可以忽略不同温度所引起的光谱曲线移动,只需重点考虑土壤质地及颜色的影响。25~35 年排土地表主要是矿石多年风化形成,经筛除石块后仍颗粒粗糙,另外土样颜色呈灰色居多,故其反射率较低;15~25 年排土区,经过多年人工种植恢复,加速了土壤的改良,土质较粗且土壤颜色呈黄、红及灰色多样化,光谱反射率总体得到提高;8~15 年区为近年覆土区,主要为黄土和红土土质较细,光谱反射率明显高于 25~35 年和 15~25 年的反射率。

2.2 不同土质光谱曲线特性

土壤质地主要是土壤的粒度。土壤粒度在总体上影响反射光的强度。针对排土场内多样的土壤质地特征,对红壤

土、黄土、红砂土、灰土和混合土(煤灰白浆混合)五种典型的土壤质地特征土样进行了分析,不同土质的光谱曲线如图 2 所示。5 条光谱反射曲线均在 $1\,420$, $1\,910$, $2\,210\text{ nm}$ 附近呈反射谷,但是灰土和混合土为多年煤土、煤和白浆土多年风化形成,在 $1\,420\text{ nm}$ 附近的水分反射谷表征不明显;在 $1\,910$ 和 $2\,210\text{ nm}$ 附近的反射谷也不突出。红壤土、黄土和红砂土光谱曲线趋势基本一致,但光谱反射率呈降低趋势,即总体反射率 $R_{\text{红壤土}} > R_{\text{黄土}} > R_{\text{红砂土}}$,这主要受土壤粒度的影响,土壤质地细致的红壤土光谱反射率明显高于土质粗糙的红砂土反射率值。

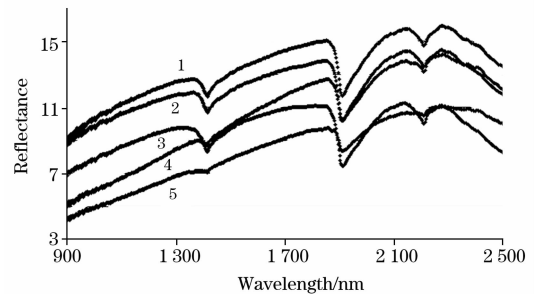


Fig. 2 Spectral reflectance of different textures

1: Red earth; 2: Yellow earth; 3: Red sand;
4: Lime soil; 5: Mixture soil

综上所述,针对矿区排土场复杂的土壤条件,利用反射光谱结合实地调研分析、检测土壤年限和土壤质地分布是可行的。

2.3 反射光谱与土壤参数相关性分析

进一步分析土壤反射光谱与土壤参数的相关性如图 3 所示。土壤 pH 值与光谱波长呈正相关,但相关性随波长的增加而降低;土壤电导率(EC)与光谱基本没有相关性;速效钾(K^+)和有机质(SOM)含量与光谱呈负相关,且随波长的增大相关系数绝对值减小,其中有机质含量与光谱相关值较高,最大值达 -0.76 ;土样含水量与光谱呈负相关且相关系数在 $1\,943\text{ nm}$ 处达最大值。整个排土场 pH 值介于 $5.5\sim 7.6$ 之间,在 8~15 年新覆土区土壤基本呈中性适宜植被生长,长时间风化区土壤偏酸性但超出 6.5 的点极少,通过施加有机肥或自然植被腐蚀调节基本不影响植被的恢复和生长。

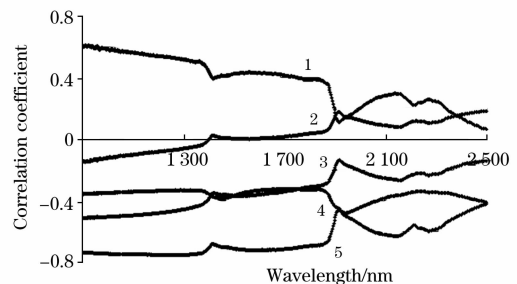


Fig. 3 Correlation between soil parameters and spectral reflectance

1: pH; 2: EC; 3: K^+ ; 4: Moisture content; 5: SOM

2.3.1 土壤水分

土壤水分对土壤物质转化和植被生长起着重要的作用。一般而言土壤水分与土壤光谱反射率呈较高的线性相关。但分析了 1 910 和 1 943 nm 处光谱反射率与土壤含水量之间的关系, 结果表明两者之间呈指数相关, 相关系数分别为 0.49 和 0.53, 分析原因主要由于排土土壤的多样性和复杂性所导致, 所有土样的水分吸收特征不能被视为来自同一个总体。进一步分别依年代、土质进行了相关分析, 结果如下: (1) 各划分条件下, 土壤光谱反射率与土壤含水量均呈线性相关; (2) 依年代划分: 25~35 年相关系数 ($r_{25-35} = 0.73$) 高于 8~15 年 ($r_{8-15} = 0.67$) 和 15~25 年相关系数 ($r_{15-25} = 0.34$); (3) 依土质划分为黄土、红土和灰土: 红土的相关系数 ($r_{红土} = 0.74$) 高于黄土 ($r_{黄土} = 0.50$) 和灰土 ($r_{灰土} = 0.18$); (4) 划分不同年代不同土质进行相关分析可见, 年代和土质对基于光谱的水分检测具有较大影响, 利用光谱分析技术或遥感技术监测煤矿排土场土壤水分时, 必须根据排土年限和土质分别进行建模或分析。

2.3.2 土壤有机质

排土场土壤样本有机质含量的最小、最大值变化范围是 0.34%~52.87%, 均值 15.15%, 标准差为 12.14%, 可见由于排土场土壤情况复杂, 对土壤有机质的预测也存在难度。由图 3 所示, 其中土样反射光谱与有机质之间相关呈负相关, 且相关系数较高, 相关性最高处的相关系数为 -0.76, 在 1 300~2 300 nm 范围内相关曲线变化较多。对此波段内选取相关性较高的点和曲线变化拐点作为特征点进行分析。利用主成分分析, 去除贡献较少的波段信息后得到 1 350, 1 602, 1 862, 2 160 和 2 227 nm 5 个波长。利用 35 个土样进行多元回归建模有

$$y = 52.17 + 20.13x_{1350} - 41.98x_{1602} + 17.06x_{1862} - 20.44x_{2160} + 22.46x_{2227} \quad (1)$$

其中 y 为预测有机质含量值, x_i 为响应 i nm 波长的原始光谱反射率。预测模型 $R_c^2 = 0.7374$, 利用 15 个样本进行模型检验其 $R_v^2 = 0.6824$, 可满足煤矿排土场土壤调查的需求, 结果如图 4 所示。

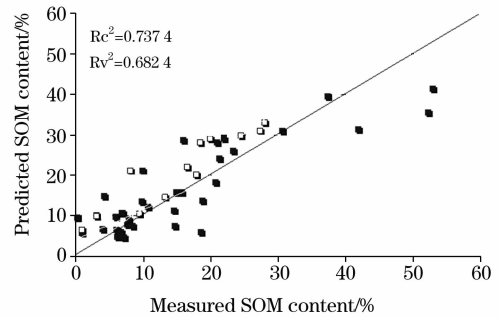


Fig. 4 Validation of SOM content model

3 结 论

本文以辽宁省阜新海州露天排土场土壤为研究对象, 采集土壤光谱数据和土壤特征参数数据, 分析了不同排土年限土壤光谱差异以及不同排土土质光谱特性, 并在分析土壤反射光谱与土壤参数相关性的基础上, 探讨了不同土壤条件下光谱反射率与水分含量的相关关系, 建立了土壤有机质含量的检测模型, 主要结论如下。

(1) 不同排土年限反射光谱曲线整体趋势相似, 但反射率不同, 在 800~2 500 nm 波段内, 光谱反射率随排土年限的增长而降低, 即 $R_{8-15} > R_{15-25} > R_{25-35}$, 主要与排土场复杂的排土情况和人工恢复进展有关。红壤土、黄土和红砂土光谱曲线趋势基本一致, 光谱反射率呈降低趋势, 即 $R_{红壤土} > R_{黄土} > R_{红砂土}$, 主要受土壤粒度的影响, 土壤质地细致的红壤土光谱反射率明显高于土质粗糙的红砂土反射率值。

(2) 依年代、土质进行光谱反射率与土壤含水量的相关分析, 结果表明: 土壤全样光谱反射率与含水量呈指数相关, 受年代和土质的影响, 相关系数偏低。但按年代和土质划分后, 得到了较高的相关系数。依年代划分, 相关系数 $r_{25-35} > r_{8-15} > r_{15-25}$; 依土质划分, $r_{红土} > r_{黄土} > r_{灰土}$ 。

(3) 有机质含量与反射光谱相关系数较高, 相关性最高处的相关系数为 -0.76。经主成分分析选取 1 350, 1 602, 1 862, 2 160 和 2 227 nm 等 5 个波长进行多元回归建模, 基于反射光谱的土壤有机质含量预测模型 $R_c^2 = 0.7374$, 模型检验 $R_v^2 = 0.6824$, 可满足煤矿排土场土壤调查的需求。

参 考 文 献

- [1] Hanel L. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(2): 167.
- [2] Holec M, Frouz J, Pokorny R. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(3): 158.
- [3] Djinic J M, Popovic A R. Fuel, 2007, 86(1-2): 218.
- [4] LIU Qing-bai, LIU Ming-guo, LIU Xing-shuang, et al(刘青柏, 刘明国, 刘兴双, 等). Journal of Shenyang Agricultural University(沈阳农业大学学报), 2003, 34(6): 434.
- [5] XU Li, FAN Jin-shuan, ZHOU Xin-cheng, et al(许 丽, 樊金栓, 周心澄, 等). Journal of Arid Land Resources and Environment(干旱区资源与环境), 2005, 19(6): 152.
- [6] WANG Zhi-hong, LI Ai-guo, FAN Liang-qian(王志宏, 李爱国, 范良千). Journal of Safety and Environment(安全与环境学报), 2006, 6(4): 70.
- [7] CHEN Ying-yi, LI Dao-liang(陈英义, 李道亮). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(10): 63.

[8] HAN Yunxia, LI Minzan, LI Daoliang. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50: 1243.

Characteristics of Soil Spectral Reflectance and Estimation of Soil Parameters in Fuxin Opencast Coal Mine

SUN Hong, LI Min-zan*, ZHAO Yong, LI Xiu-hua, LIANG Jing-xian, CHEN Ling

Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract The surface soil samples of Fuxin opencast coal overburden dumps were collected in the field and the spectral reflectance and characteristic parameters of the soil samples, such as moisture content, pH, electrical conductivity (EC), available potassium (K^+) content, and soil organic matter content (SOM), were measured. The Analysis results indicated that the curves of the soil spectral reflectance decreased with increasing the laid years. The possible reasons were the influences of soil texture and color. Although the valleys of the spectral reflectance appeared at 1 420, 1 910 and 2 210 nm, they were not conspicuous on the lime soil and mixture soil reflectance curves at 1 420 and 2 210 nm. With discussing the spectral reflectance of different types of soil texture, it's easy to find that the reflectance of fine grained soil was higher than the rough grained soil. Correlations between soil spectral reflectance and soil parameters were analyzed. The results showed that there was a positive relation between reflectance and pH, and correlation coefficient decreased with the wavelength increasing. There was no relationship between spectral reflectance and EC, and negative relations were observed between spectral reflectance and soil parameters, K^+ and SOM, respectively. A high correlation coefficient was found between spectral reflectance and SOM, and the highest correlation coefficient reached -0.76 . The exponential correlation was found between soil spectral reflectance and soil moisture content to analyze all samples. According to different years and textures, more detail was described about the correlation between spectral reflectance of characteristic wavelength (1 910 and 1 943 nm) and soil moisture content. Meanwhile, the linear correlations were found under different conditions and higher correlation coefficients were obtained. In order to estimate SOM, five wavelengths (1 350, 1 602, 1 862, 2 160 and 2 227 nm) were selected based on principal component analysis to build a multiple linear regression model. The multiple correlation coefficient of calibration model (R_C^2) was 0.737 4, and the multiple correlation coefficient of validation (R_V^2) was 0.682 4. It indicated that the model was able to meet the needs of monitoring SOM in Fuxin opencast coal mine.

Keywords Spectral analysis; Soil moisture content; Soil organic matter; Opencast coal overburden dumps

* Corresponding author

(Received Jan. 9, 2009; accepted May 14, 2009)

学术活动简讯

February 2009

1-4 Advanced Solid-State Photonics 2009 OSA Optics & Photonics Congress (ASSP),

Grand Hyatt Denver, Denver, CO;

Contact: Optical Society of America, 2010 Massachusetts Ave., NW, Washington, DC 20036-1023; Tel. (202) 416-1907, or (800) 723-4632, Fax: (202) 416-6140;

E-mail: custserv@osa.org

Web site: <http://www.osa.org/assp>

2-7 Young Optical Scientists Conference (YOSC),

Moscow, Russia;

Contact: Vahan Senekerimyan,

E-mail: vahan@caltech.edu

Web site: <http://www.yosconf.org/>

(下转 3374 页)