

煤矿区土壤有机碳含量的遥感反演与分布特征

孙问娟, 李新举

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 高光谱数据与多光谱影像结合能实现区域高精度、大面积的土壤有机碳含量反演。以山东省鲍店矿区表层 0—20 cm 土壤有机碳含量为研究对象, 采用波段平均法把高光谱的窄波段拟合成 GF-1 WFV 影像的宽波段, 建立土壤有机碳含量的高光谱模型, 进而通过比值订正法, 将最优高光谱模型校正到多光谱模型并通过决策树分类获取土壤有机碳含量空间分布状况, 结合土地利用现状分析土壤有机碳含量分布特征。结果表明: (1) 通过波段拟合和比值订正获得的多光谱模型, 检验决定系数为 0.76, 可以稳定实现矿区土壤有机碳含量的反演。(2) 研究区土壤有机碳含量范围为 0.71 ~ 38.15 g/kg, 均值为 14.12 g/kg, 总体上处于中等水平; 区域内土壤有机碳含量以 11.60 ~ 17.40 g/kg 为主, 其次是 5.80 ~ 11.60 g/kg, 分别占据 48%, 29%。(3) 采矿区和部分道路、居民点的有机碳含量偏高, 耕地处于中等水平, 林地和草地含量较低; 塌陷地形成的水域周围有机碳含量明显偏低。

关键词: 高光谱; 多光谱; 土壤有机碳含量; 土地利用类型

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0328-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.049

Remote Sensing Inversion and Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Content in Coal Mining Area

SUN Wenjuan, LI Xinju

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: The combination of hyperspectral data and multi spectral image enables high-precision and large-area inversion of soil organic carbon content to be achieved. Taking the organic carbon content in 0—20 cm soil layer of Bao Dian mining area in Shandong Province as the study object, this study first applied the band averaging method to synthesize the hyperspectral narrow band into the wide band of GF-1 WFV, based on which the hyperspectral model of soil organic carbon content were established. Then the optimal hyperspectral model was corrected to the multispectral model through the ratio correction method, and the spatial distribution map of soil organic carbon content was obtained through decision tree classification. Finally, the distribution characteristics of soil organic carbon content were analyzed combined with the land use status map. The results showed: (1) The determination coefficient of the multi spectral model obtained by band fitting and ratio correction was 0.76, indicating that the soil organic carbon content could be retrieved steadily via the model. (2) The soil organic carbon content in the study area varied from 0.71 to 38.15 g/kg, with a mean value of 14.12 g/kg, which was at a medium level in general. The soil organic carbon content was mainly 11.60 ~ 17.40 g/kg, followed by 5.80 ~ 11.60 g/kg, occupying 48% and 29% respectively in the study area. (3) The soil organic carbon content of mining area, some roads and settlements was high. The soil organic carbon content of cultivated land was at medium level, and the content in woodland and grassland was relatively low. The content of organic carbon around the subsidence area was obviously lower than that in other land use types.

Keywords: hyperspectral; multispectral; soil organic carbon content; land-use type

煤炭资源的开发与利用带动了经济发展的同时,也带来了严重的地表塌陷问题,直接导致土壤质量的下降^[1-2]。当前主要的应对措施就是土地复垦及区域综合

整治,在此过程中,土地质量的快速监测及评估具有重要意义。土壤有机碳作为土壤质量的核心,以微小的比重对土壤质量及功能的调节起着关键作用^[3]。

传统的土壤养分监测,在野外定点采样后把样品带到实验室进行农化分析,不仅耗时、费力,而且成本高、实时性差,测点少,代表性差^[4]。借助遥感手段反演土壤有机碳含量,具有实时、高效、低成本的特点,能有效弥补传统方法的不足。高光谱波段窄而多、光谱线精细,能高效监测土壤中的隐藏信息。特定的多光谱影像,具有覆盖面积广、时空分辨率高等优点,与高光谱数据结合,能有效提高土地动态监测的精度、广度和深度^[5]。

20世纪70年代以来,随着统计学方法的普及,生命带法、土壤类型法、有机碳模型法等开始大量应用于有机碳的研究^[6-10]。近年来,遥感方法在土壤有机碳的研究中越来越常见。Barthomoleus等^[11]研究发现,来源于不同母质的土壤中的有机碳与近红外长波波段都有很好的相关性;申艳等^[12]通过833~2703 nm近红外波段的原始光谱吸光度建立了较高精度的土壤有机碳含量预测模型;侯艳军等^[13]研究发现,光谱反射率经过微分及倒数的对数等数学变换能显著提高模型预测精度。周稀等^[14]通过提取landsat8 OLI数据影像上的DN值建立了土壤有机碳含量反演模型,并利用空间插值法实现了土壤有机碳空间分布格局可视化,但是精度较低。王琼等^[15]的研究进一步表明,多光谱数据反演土壤有机碳含量的精度不够高。总体而言,高光谱估测土壤有机碳含量精度较高,但多为单纯研究估测模型,而多光谱估测土壤有机碳含量精度较低,但易实现区域化反演。本研究以此为切入点,利用野外实测高光谱,通过波段平均法把高光谱的窄波段拟合到GF-1号多光谱影像宽波段,建立土壤有机碳含量的高光谱模型,然后依据反射率的比值订正法把高光谱模型校正为多光谱模型,进行研究区表层土壤有机碳含量反演,并进一步将土壤有机碳含量反演结果与土地利用类型结合,对土壤有机碳分布状况进行分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鲍店矿区位于邹城市西北部,属于邹城西部矿区的重要组成部分,地理坐标为北纬35°23′13″—35°28′08″,东经116°48′07″—116°52′26″,面积约为35.76 km²。矿区气候是四季分明的温带大陆季风性气候,作物种类丰富,地形以平原为主,土壤类型主要是潮土和砂姜黑土。自1986年投产以来,长期的采煤活动造成了严重的地面塌陷问题,塌陷形成的水域面积占矿区的1/8。

1.2 土样采集与分析

根据研究区的耕作机制,为避免其他地物遮挡地面,影响采样,在2016年10月初,按照室内设计路线,在

避开水域的基础上尽量均匀采样,共采集样点107个,每个样点均通过Geo7x进行定位,采样深度为表层0—20 cm,每份土样是在16 m×16 m的范围内按照对角线取样法由5份土样混合组成,约1 kg,装入自封袋。

土样带回实验室后,挑出植物根系、石子砖块、小动物等侵入物,经风干、敲打、研磨后,过100目筛后进行土壤有机碳含量测定,采用重铬酸钾氧化法。

1.3 多光谱遥感影像的获取与处理

1.3.1 高分一号WFV1数据影像 本研究采用的高分一号WFV1数据影像来源于中国资源卫星应用中心,采集于2016年10月14日(与土壤样品采集时间一致),空间分辨率为16 m,包含蓝(450~520 nm)、绿(520~590 nm)、红(630~690 nm)、近红(770~890 nm)4个波段。

多光谱影像做为土壤有机碳含量的反演底图,需要包含尽可能多的土壤信息。因此,除了常见的辐射校正、几何校正及裁剪等预处理外,本研究对影像还进行了水域及植被信息的去除。

1.3.2 归一化差异水体指数去除水域 McFeeters^[16]研究表明,归一化差异水体指数(NDWI)能有效提取出遥感影像上的水体。计算公式为: $NDWI = \frac{p(\text{Green}) - p(\text{NIR})}{p(\text{Green}) + p(\text{NIR})}$, $NDWI > 0$ 时影像显示为水域。首先通过ENVI的波段运算获取影像NDWI,然后利用 $NDWI > 0$ 制作掩膜,即得到去除水域后的遥感影像。

1.3.3 混合像元分解法去除植被信息 本研究采用线性混合像元分解方法,即假设组成遥感影像的像元信息都是由土壤和植被混合而成的,根据像元二分模型,得到像元中的土壤信息^[17]。

计算公式为: $R_b = \frac{(R_b - f_v R_{vb})}{(1 - f_v)}$ 。式中: R_b 为像元中波段 b 中的土壤反射率; R_{vb} 为像元中波段 b 中的植被反射率; R_b 为像元中波段 b 总的发射率; f_v 为像元中植被信息所占的比例,通过归一化植被指数(NDVI)确定,计算公式为: $f_v = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})}$, ($NDVI = \frac{p(\text{NIR}) - p(\text{Red})}{p(\text{NIR}) + p(\text{Red})}$)。式中: $p(\text{NIR})$ 、 $p(\text{Red})$ 分别表示近红外波段和红光波段; $NDVI_{\min}$ 、 $NDVI_{\max}$ 分别为遥感影像上归一化植被指数的最小值和最大值。

1.4 光谱采集与处理

考虑到多光谱影像的采集环境,本研究在野外采集土样的同时,测量高光谱数据。光谱测量采用美国ASD Field Spec4地物光谱仪,光谱范围为350~2500 nm。光谱数据采集选择无风晴朗的天气10:00—14:00,选择表面平坦且无植被的原状土壤,探头垂直向下,距离地

面约为 80 cm,每个样点共采集 10 条光谱曲线。

将测得的土壤光谱曲线用自带的 ViewSpec Pro 进行简单的处理,每份土样取 10 条曲线的均值波谱作为样本实测曲线,并去除噪声较大的起始波段(350~499 nm)和尾部波段(2 451~2 500 nm)以及受环境水汽影响较大的 1 300~1 450,1 800~1 950 nm 波段^[18]。然后利用软件 R 对光谱数据进行 Savitzky-Golay 平滑去噪。

1.5 平均波长法拟合多光谱

采用平均波长法把高光谱的窄波段拟合成多光谱数据的宽波段,即选用与 GF-1 号各个波段相对应波长范围的高光谱数据的平均反射率作为相应波段拟合后的反射率^[19]。

计算公式为: $b_{m\sim n} = \frac{\sum_{i=m}^n B_i}{n-m+1}$ 。式中: $b_{m\sim n}$ 为多光谱数据中波长为 $m\sim n$ 的波段的反射率; B_i 为高光谱在波长 i 的反射率。

1.6 光谱参量的构建

以拟合得到的 4 个波段为基础,通过不同的波段组合及数学变换方法,包括倒数($\frac{1}{B_i}$),对数($\lg B_i$),倒数的对数($\lg \frac{1}{B_i}$),比值($\frac{B_i}{B_j}$),差值($B_i - B_j$),以及前减后加($\frac{B_i - B_{(i-1)}}{B_i + B_{(i+1)}}$),前加后减($\frac{B_i + B_{(i-1)}}{B_i - B_{(i+1)}}$)等。式中: B_i, B_j 分别表示波段 i 和 j 的反射率, i, j 取值 1,2,3,4,且 $i \neq j$,共获得 40 个参量,并通过相关性分析确定模型参量。

1.7 多元线性回归分析

土壤有机碳含量模型通过多元线性逐步回归分析方法构建,选择相关性大于 0.40,0.45,0.50 的 3 组参量分别参与模型构建,并通过模型决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 确定反演模型。

1.8 决策树分类

决策树分类是基于遥感图像数据及其他空间数据,通过专家经验总结、简单的数学统计和归纳方法等,获得分类规则进行遥感分类的方法^[20],是一种逐级分层分类方法。本研究把土壤有机碳含量模型作为决策树分类规则,利用 ENVI 的决策树分类方法将有机碳含量分级,分级标准根据全国第二次土壤普查中土壤有机质的分级标准确定。土壤有机碳含量共划分为 6 个级别,I 级为 >23.20 g/kg,II 级为 $17.40\sim23.20$ g/kg,III 级为 $11.60\sim17.40$ g/kg,IV 级为 $5.80\sim11.60$ g/kg,V 级为 $3.48\sim5.80$ g/kg,VI 级为 $0.58\sim3.48$ g/kg。

1.9 矿区土地利用现状分类

借助 eCognition 利用面向对象分类方法把研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、居民点、采矿区、道路和水域等 7 类,并通过 ArcGIS 的叠加分析功能,讨论

研究区土壤有机碳含量与土地利用类型的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的样本特征

去除一个异常值 49.94 g/kg,共 106 个样本参与建模。由表 1 可知,土壤有机碳含量样本均值小于 13.00 g/kg,土壤有机碳含量偏低;标准差和变异系数较大,样本有一定的离散性。训练集和验证集中的均值及标准差与样本总集相近,表明训练集与验证集样本分布较为均匀,划分结果具有代表性,构建的模型有较好的稳定性。

表 1 土样样本有机碳含量统计特征

样本集	样本数	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)				变异 系数/%
		最小值	最大值	平均值	标准差	
样本总集	106	1.85	30.76	12.89	5.59	43.41
训练集	76	1.98	29.83	12.95	5.27	40.72
验证集	30	1.85	29.70	12.71	5.68	43.90

2.2 土壤有机碳含量高光谱模型的构建

通过相关性分析, $B_1/B_2, B_1 - B_2, B_1 - B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$ 等 4 个组合变量与土壤有机碳含量的相关性最高,大于 0.50;此外,变量 $B_1/B_3, B_1 - B_4, B_2 - B_3, 1/B_3, \lg(B_3)$ 与土壤有机碳含量相关性也较高,大于 0.45。以上结果表明,波段组合、差值变换以及倒数和对数变换可以有效提高变量与土壤有机碳含量的相关性。由表 2 可知,18 个相关性大于 0.40 的参量、9 个相关性大于 0.45 的参量、4 个相关性大于 0.50 的参量分别作为模型 1、模型 2、模型 3 的自变量,进行多元逐步回归分析建模。

表 2 土壤有机碳含量与建模参量的相关性分析

相关性系数 绝对值	模型 1 参量 (>0.40)	模型 2 参量 (>0.45)	模型 3 参量 (>0.50)
0.42	B_3		
0.41	B_4		
0.54	B_1/B_2	B_1/B_2	B_1/B_2
0.46	B_1/B_3	B_1/B_3	
0.40	B_2/B_3		
0.51	$B_1 - B_2$	$B_1 - B_2$	$B_1 - B_2$
0.51	$B_1 - B_3$	$B_1 - B_3$	$B_1 - B_3$
0.46	$B_1 - B_4$	$B_1 - B_4$	
0.50	$B_2 - B_3$	$B_2 - B_3$	
0.42	$B_2 - B_4$		
0.44	$1/B_2$		
0.46	$1/B_3$	$1/B_3$	
0.41	$1/B_4$		
0.42	$\lg(B_2)$		
0.47	$\lg(B_3)$	$\lg(B_3)$	
0.45	$\lg(B_4)$		
0.52	$(B_2 - B_1)/$ $(B_2 + B_3)$	$(B_2 - B_1)/$ $(B_2 + B_3)$	$(B_2 - B_1)/$ $(B_2 + B_3)$
0.45	$(B_3 - B_2)/$ $(B_3 + B_4)$		

由表 3 可知,参量最多的模型 1 最终由 4 个自变

量构成,精度最好,预测模型验证系数为 0.778, RMSE 为 3.05 g/kg,显著性小于 0.001,能够实现土壤有机碳含量的稳定预测;参量相关性最高的模型 3 的建模结果中 4 个参量全部参与模型构建,精度在 3

个模型中最低(表 3),表明相关性的高度限制会导致部分敏感信息缺失,造成模型精度降低;精度相对较高的模型 1 和模型 2 的自变量都是由波段比值及波段倒数构成,表明其敏感性较强。

表 3 土壤有机碳含量反演模型及参数

模型	自变量	表达式	显著性	训练集		验证集	
				R ²	RMSE	R ²	RMSE
1	$B_1/B_2, B_1/B_3, B_2/B_3, 1/B_4$	$Y_{soc} = -179.573 + 298.195 \times B_1/B_2 - 292.541 \times B_1/B_3 + 175.940 \times B_2/B_3 + 0.407/B_4$	0.000	0.784	3.18	0.778	3.05
2	$B_1/B_2, B_1/B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3), 1/B_3$	$Y_{soc} = -243.194 + 349.916 \times B_1/B_2 - 101.507 \times B_1/B_3 + 460.712 \times (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3) + 0.295/B_3$	0.001	0.781	3.20	0.766	3.17
3	$B_1/B_2, B_1 - B_2, B_1 - B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	$Y_{soc} = -280.891 + 299.838 \times B_1/B_2 + 1515.541 \times (B_1 - B_2) - 626.752 \times (B_1 - B_3) + 674.793 \times (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	0.000	0.751	3.36	0.727	4.13

2.3 土壤高光谱模型校正到土壤多光谱模型

考虑到高光谱和多光谱数据采集方式与环境的差异,根据样点的地理坐标从 GF-1 影像上提取各点对应的 4 个波段反射率,取所有点每个波段的平均值和与高光谱拟合后的对应波段的平均值进行对比分析。由图 1 可知,GF-1 影像的各波段反射率明显高于高光谱拟合的反射率,但是二者在形状和趋势上较为一致,相关性可达 0.989,表明二者线性关系极好,因此通过比值订正法将高光谱模型应用到多光谱切实可行。

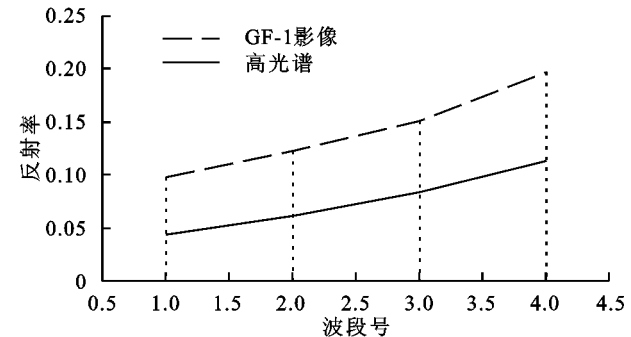


图 1 高光谱拟合波段反射率与多光谱影像反射率的对比

计算实测点与遥感影像上相对应点的各个波段反射率的比值的均值,将其作为订正系数把高光谱模型转换为多光谱模型, $B_1、B_2、B_3、B_4$ 波段订正系数分别为 0.430,0.483,0.549,0.569。选择最优模型一订正为多光谱模型,表达为:

$$Y_{soc} = -179.573 + 298.195 \times \frac{B_1 \times 0.430}{B_2 \times 0.483} - 292.541 \times \frac{B_1 \times 0.430}{B_3 \times 0.549} + 175.940 \times \frac{B_2 \times 0.483}{B_3 \times 0.549} + 0.407 \times \frac{1}{B_4 \times 0.569}$$

将该模型应用于遥感影像,提取验证样本的反演值联合实测值绘制散点图。由图 2 可知,验证模型决定系数为 0.761, RMSE 为 2.95 g/kg,与高光谱模型精度近似。因此,高光谱模型可通过系数订正转换为

多光谱模型,实现可视的、区域的有机碳含量反演。

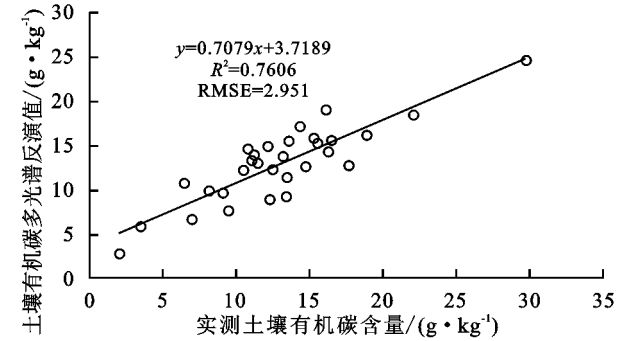


图 2 多光谱模型反演值与土壤有机碳含量实测值的对比

2.4 土壤有机碳含量反演结果

通过 ENVI 的决策树分类及 ArcGIS 的空间制图功能得到的土壤有机碳含量的分级分布(图 3)。研究区土壤有机碳含量范围为 0.71~38.15 g/kg,平均值为 14.12 g/kg;区域内土壤有机碳含量以 11.60~17.40 g/kg (III 级)为主,其次是 5.80~11.60 g/kg(IV 级),两者在分布区域上也最为广泛。此外,区域内大于 23.20 g/kg 的 I 级土壤几乎没有,II、V、VI 级分布较少;相比其他区域,水域(白色)周围土壤有机碳含量明显偏低,大多为 IV 级和 VI 级。

2.5 土壤有机碳含量与土地利用类型对比分析

由图 4 可知,煤矿区内土地利用类型仍以耕地为主,其分布也最为广泛;林地、草地较少,主要分布在西北部,其中草地多临水域分布,林地多临草地和居民点分布;采矿区主要集中在中部地区,与大片居民点相接,区域内有主干道路通过,交通位置优越;水域面积较大,约为 4.92 km²,占整个区域的近 1/8。

进一步通过 ArcGIS 的叠加分析功能,将土地利用现状图与土壤有机碳含量分级图交叉叠加,面积统计结果见表 4。矿区内的土地面积为 30.749 km²,其中耕地为 18.732 km²,占整个区域的 60.92%;草地、林地、居民点面积相当,均占 10%左右;采矿区与道路面积较少,均低于 1%。研究区内耕地土壤有机碳

含量处于中等水平,以 III 级为主,IV 级次之,还有少
许的 V,VI 级,I 级最少,不到 0.1%;林地、草地土壤
有机碳含量分别以 V,VI 级为主,处于较低水平;居
民点则主要处于 III,IV 级的中等水平;采矿区约
70%的面积处于 II 级,还有部分处于 I 级,有机碳含
量高于其他地类;道路以 IV 级为主,与居民点相似。



图 3 土壤有机碳含量分级空间分布

I、II 级土壤中采矿区均占据了大半,分别为 68%和

表 4 土地利用类型与土壤有机碳含量级别的交叉面积统计							单位:km ²
类别	I	II	III	IV	V	VI	汇总
耕地	0.016		13.048	4.289	0.875	0.504	18.732
	0.09% ^A	0	69.66% ^A	22.89% ^A	4.67% ^A	2.69% ^A	60.92%
	32.00% ^B		88.32% ^B	47.07% ^B	31.86% ^B	16.99% ^B	
林地		0.113		0.716	1.452	0.248	2.529
	0	4.47% ^A	0	31.71% ^A	57.41% ^A	9.81% ^A	8.22%
		10.25% ^B		7.86% ^B	52.88% ^B	8.36% ^B	
草地				1.009	0.419	2.113	3.541
	0	0	0	28.49% ^A	11.84% ^A	59.67% ^A	11.52%
				11.07% ^B	15.26% ^B	71.24% ^B	
居民点		0.201	1.726	2.172		0.101	4.200
	0	4.79% ^A	41.10% ^A	51.71% ^A	0	2.40% ^A	13.66%
		18.24% ^B	11.68% ^B	23.84% ^B		3.41% ^B	
采矿区	0.034	0.632		0.238			0.904
	3.76% ^A	69.91% ^A	0	26.33% ^A	0	0	2.94%
	68.00% ^B	57.35% ^B		2.61% ^B			
道路		0.156		0.687			0.843
	0	18.51% ^A	0	81.49% ^A	0	0	2.74%
		14.16% ^B		7.54% ^B			
汇总	0.050	1.102	14.774	9.111	2.746	2.966	30.749
	0.16%	3.58%	48.05%	29.63%	8.93%	9.65%	

注释:A 为土壤有机碳含量级别占土地利用类型的面积百分比;B 为土地利用类型占土壤有机碳含量级别的面积百分比。

57.35%。此外耕地占了 I 级土壤的 32%,II 级土壤中
还包含部分居民点和林地;III 级土壤分布面积最大,占
总面积的 48.05%,其中 88.32%为耕地,其余为居民点;IV
级土壤在分布面积上小于 III 级,分布范围却是最广,在
各个地类中均有分布,耕地和居民点较多,采矿区较少;
V,VI 级土壤分布面积和分布范围都相差不大,前者林
地分布较多,后者草地分布较多。

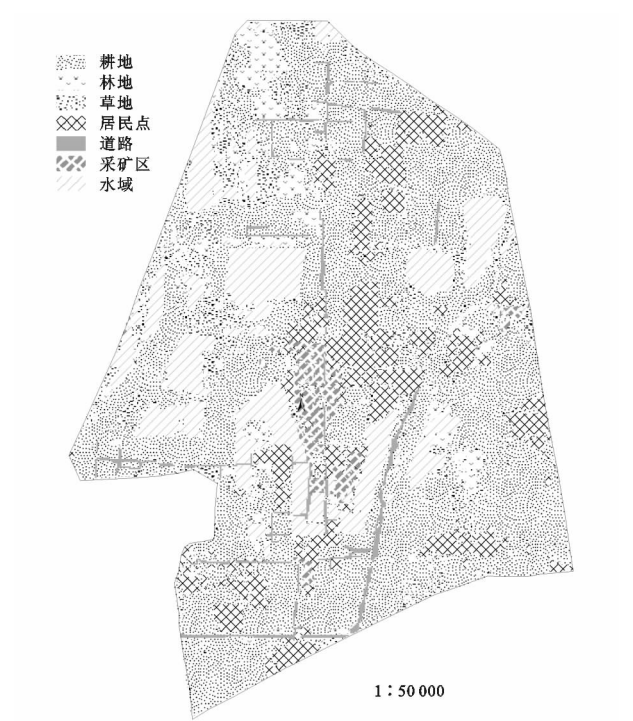


图 4 研究区土地利用现状

3 讨论

本研究通过波段拟合把高光谱的窄波段拟合到多光谱的宽波段,并对各波段进行数学变换,发现比值及倒数变换可以明显提高相关性,王琼等^[15]在研究棉田土壤有机质时也有同样的结论。通过多元线性回归分析建立土壤有机碳含量高光谱模型,发现4个波段都参与的模型精度最高,即土壤有机碳含量对蓝、绿、红、近红4个波段都比较敏感,这与郭燕等^[21]认为土壤有机质仅对蓝、绿2个波段敏感的研究结果有所不同。推测可能是区域土壤环境或类型差异的原因,郭登巍等^[22]就认为土壤母质与土地利用类型对土壤的可见光—近红外波段光谱有较大影响。

本研究区是煤矿区,由于长年煤炭的开采,造成了严重的地面塌陷,区域内的水域主要就是由于土地塌陷后积水形成。观察土壤有机碳含量分布,水域周围地区明显偏低,因此推测土地塌陷对其边缘地区除了破坏土壤结构外,也影响土壤有机碳的分布,具体影响机制,还需进一步研究探讨。Yang等^[23]研究也表明,采煤引起的地表沉降会干扰土壤有机碳的分布,导致土壤有机碳含量的降低和区域差异。

结合土地利用现状,部分居民点和道路有机碳含量较高。可能是煤炭的生产与运输过程中,煤粉散落的原因。耕地有机碳含量明显高于林地与草地,主要与植被覆盖类型和施肥有关,罗友进等^[24]的研究认为,植被类型其根系分布以及根系分泌物的性质会对土壤微生物和有机碳的空间分布产生影响;易亚男等^[25]认为,施肥作为农田的重要管理措施,可以直接影响土壤有机碳含量。此外,部分林地有机碳含量明显高于其他林地,甚至高于耕地,本研究认为该部分林地是矿场周围防护林地,受煤炭开采的影响。

4 结论

(1)高光谱与多光谱的结合,实现了土壤有机碳含量区域化与高精度的反演。通过波段拟合和比值订正获得的多光谱模型,检验决定系数为0.76,可以稳定实现矿区土壤有机碳含量反演。

(2)研究区表层0—20 cm的土壤有机碳含量为0.71~38.15 g/kg,变异性较大;III级分布占总面积的48.05%,即研究区内有机碳含量以11.60~17.40 g/kg为主;I级分布最少,主要在采矿区,仅占0.16%;平均土壤有机碳含量为14.12 g/kg,因此研究区有机碳含量总体上处于中等水平,高质量土壤极少,耕地中更是不到0.1%。

(3)土地利用方式不同,土壤有机碳含量存在一定差异。整体上土壤有机碳含量表现为采矿区>耕地>居民点>林地>草地。此外,本研究区受煤炭生产和运输的影响,采矿区有机碳含量最高,部分居民点和道路有机碳含量也偏高。

(4)煤矿开采引起的地面塌陷会扰乱土壤有机碳分布。采煤塌陷边缘土壤表层有机碳含量低于周边区域。

参考文献:

- [1] 莫爱,周耀治,杨建军,等.山地煤矿开采对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):86-89.
- [2] 雷少刚,卞正富.西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J].生态学报,2014,34(11):2837-2843.
- [3] 刘景双,杨继松,于君宝,等.三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J].水土保持学报,2003,17(3):5-8.
- [4] Chang C W, Laird D A. Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 82(4): 413-422.
- [5] 王静,何挺,李玉环.基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J].遥感学报,2005,9(4):438-445.
- [6] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [7] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget [J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 1995, 47(3): 310-319.
- [8] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,等.黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J].水土保持学报,2011,25(3): 160-163.
- [9] 黄雪夏,倪九派,高明,等.重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J].水土保持学报,2005,19(1):54-58.
- [10] 袁芳,赵小敏,乐丽红,等.江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J].生态环境学报,2008,17(1):268-272.
- [11] Bartholomeus H M, Schaepman M E, Kooistra L, et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification [J]. Geoderma, 2008, 145(1): 28-36.
- [12] 申艳,张晓华,梁爱珍,等.近红外光谱分析法测定东北黑土有机碳和全氮含量[J].应用生态学报,2010,21(1):109-114.
- [13] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J].农业工程学报,2014,30(16):113-120.
- [14] 周稀,潘洪旭,邓欧平,等.基于RS和GIS的西河流域土壤有机碳含量的空间反演[J].中国土壤与肥料,2016(4):32-38.
- [15] 王琼,陈兵,王方永,等.基于HJ卫星的棉田土壤有机质空间分布格局反演[J].农业工程学报,2016,32(1): 174-180.
- [16] Mc Feeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

- 26(4), 1296-1301.
- [5] 周磊, 刘景辉, 郝国成, 等. 沙质土壤改良剂对科尔沁地区风沙土物理性质及玉米产量的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 4-48.
- [6] 杨红善, 刘瑞凤, 张俊平, 等. PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 38-41.
- [7] 刘桂花, 杨正国, 谷英, 等. 抗旱保水剂对干旱荒漠区沙棘造林的影响[J]. 防护林科技, 2011(1): 31-32.
- [8] Bai W, Zhang H, Liu B, et al. Effects of super-absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(3): 253-260.
- [9] Islam M R, Hu Y, Mao S, et al. Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(11): 1998-2005.
- [10] Khodadadi D D. Effect of superabsorbent polymer on soil and plants on steep surfaces[J]. Water and Environment Journal, 2017, DOI:10.1111/wej.12309.
- [11] 田佳, 曹兵, 宋丽华, 等. 宁夏干旱风沙区 5 种灌木保水剂造林试验与饲用价值研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2014, 35(5): 24-27.
- [12] 陈印军, 方琳娜, 杨俊彦. 我国农田土壤污染状况及防治对策[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(4): 1-5.
- [13] 陆文聪, 刘聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1988-1994.
- [14] 许景钢, 孙涛, 李嵩. 我国微生物肥料的研究及其在农业生产中的应用[J]. 作物杂志, 2016(1): 1-6.
- [15] 孙琪然, 徐燕, 相立, 等. 生物炭和菌肥的混合使用对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8): 52-59.
- [16] 彭飞, 黄敦元, 余江帆, 等. 生物菌肥对于油茶的应用前景以及施用条件和方法初探[J]. 江西林业科技, 2013(1): 39-42.
- [17] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113.
- [18] 高肖彦, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙丘一草甸田间持水量的综合测定与影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1336-1344.
- [19] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1389-1392.
- [20] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 等. 2 种测定土壤微生物量氮方法的比较初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 124-129.
- [21] 沈萍, 陈向东. 微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [22] Dhodapkar R, Rao N N, Pande S P, et al. Adsorption of cationic dyes on Jalshakti(R), super absorbent polymer and photocatalytic regeneration of the adsorbent[J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(6): 540-548.
- [23] Han Y G, Yu X X, Li B, et al. Dynamic study on water diffusivity of soil with super-absorbent polymer application[J]. Environmental Earth Sciences. 2013, 69(1): 289-296.
- [24] 林海琳, 崔英德, 杜林, 等. 海藻酸钠复合吸水树脂的生物降解[J]. 化工进展, 2006, 25(6): 700-703.
- [25] Li X, He J Z, Liu Y R, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese Cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 711-719.
- [26] Paradelo R, Barral M T. Effect of moisture and disaggregation on the microbial activity of soil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 317-319.
- [27] Lee J. Effect of application methods of organic fertilizer on growth, soil chemical properties and microbial densities in organic bulb onion production[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(3): 299-305.
- [28] 杨涛, 徐慧, 李慧, 等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 50-53.
- (上接第 333 页)
- [17] 李萍. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [18] 何挺, 刘荣, 王静. 野外波谱测量的影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(5): 6-10, 31.
- [19] 孙俊. 基于环境一号卫星的那曲地区青藏铁路沿线区域土壤含水量反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [20] 邓书斌. 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 150-164.
- [21] 郭燕, 程永政, 王来刚, 等. 利用高光谱和 GF-1 模拟多光谱进行土壤有机质预测和制图研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 537-542.
- [22] 郭登巍, 张甘霖. 母质与土地利用类型对土壤光谱反演模型的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 173-179.
- [23] Yang D, Bian Z, Lei S. Impact on soil physical qualities by the subsidence of coal mining: A case study in Western China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016; 75(8): 1-14.
- [24] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 117-122.
- [25] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 144-148.