

采煤矿区表层土壤有机质含量遥感反演

曾远文, 陈 浮, 王雨辰, 张绍良

(中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 利用 Landsat ETM⁺ 影像反演煤炭开采区表层土壤有机质含量的空间格局, 对采样点各波段光谱反射率进行数学变换, 并将所得结果与有机质含量进行相关性分析。挑选出敏感波段, 建立了表层土壤有机质含量的光谱预测模型。结果表明, 研究区表层土壤有机质含量与第 5 波段和第 7 波段反射率呈极显著的负相关关系 (R 分别为 -0.585 和 -0.543 , $p < 0.001$); 对反射率进行数学变换可以改善其与有机质之间的相关性; 用第 1 波段反射率对数的倒数和第 5 波段反射率的倒数建立二元回归方程 ($R^2 = 0.616 2$, $p < 0.001$) 对研究区土壤有机质有很好的预测能力 ($R^2 = 0.616 2$, $RMSE = 0.89$); 有机质含量在 $10 \sim 15$ g/kg 范围的图斑面积最大, 占研究区总面积的 50.44% ; 表层土壤有机质随开采沉陷坡度的增加呈减少的趋势; 煤炭开采沉陷对表层土壤有机质含量的扰动属于失碳效应。

关键词: 遥感; 土壤有机质; 反演; 煤矿区; 开采沉陷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0169-04

中图分类号: S153.6⁺21, TP79

Predicting Surface Soil Organic Matter Contents with Remote Sensing Images in Mining Areas

ZENG Yuan-wen, CHEN Fu, WANG Yu-chen, ZHANG Shao-liang

(China University of Mining and Technology, Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China.)

Abstract: Remotely sensed multispectral Landsat ETM⁺ images were used to analyze the spatial pattern of surface soil organic matter across the coal mining area. Through the correlation analysis between organic matter contents and ETM⁺ reflectance variations, wave bands sensitive to organic matter were selected, which were used to establish a prediction model of surface soil organic matter. It was shown that the surface soil organic matter contents in study area strongly negatively correlated with the reflectance values of ETM⁺ 5 and ETM⁺ 7 ($R = -0.585$ and -0.543 , $p < 0.001$). The regression model were developed with the reciprocal of the log-transformed reflectance of ETM⁺ 3 and the reciprocal of the reflectance of ETM⁺ 5 ($R^2 = 0.616 2$, $p < 0.001$), which predicted the spatial pattern of surface soil organic matter with acceptable accuracy ($R^2 = 0.616 2$, $RMSE = 0.89$). The area of $10 \sim 15$ g/kg organic matter contents accounted for 50.44% of the total area of study site. Surface soil organic matter decreased with the increasing subsidence slope of mining, and the disturbing effect imposed by the mining activities is a carbon losing effect.

Keywords: remote sensing; soil organic matter; retrieve; mining area; mining subsidence

土壤有机质(SOM)是土壤的重要组成部分,也是土壤肥力的核心指标之一^[1]。尽管土壤有机质只占土壤总质量的很小一部分,但其在土壤肥力、环境保护、植物生长和农业生产等方面有着积极的作用和意义^[2-3]。了解表层土壤有机碳含量,特别是它的空间分布格局可以为精准农业的发展和减少耕作成本提供重要的理论依据^[4]。目前常用的采样方法(如网格采样法和区域采样法)虽然可以得到高精度的表层

土壤有机质含量空间分布图,但这些方法固有的周期较长、要求的人力物力多且易受地理位置限制的缺点,降低了所得结果的指导意义^[5]。

遥感技术是一门新兴的综合性探测技术,可实现短时间内对同一地区进行重复观测、并获得大面积的同步数据,且遥感影像记录的信息可反映土壤的多种特征^[6-8],为土壤有机质的监测提供了新的平台。已有研究表明土壤光谱反射率与 SOM 含量呈显著负

收稿日期:2012-08-12

修回日期:2012-09-17

资助项目:江苏高校优势学科建设工程项目“(SA1102)”;国家自然科学基金项目“煤炭开采的碳效应研究”(51074154/E042203)

作者简介:曾远文(1989—),男(汉族),四川省内江市人,硕士研究生,主要研究领域为遥感与生态监测。E-mail:zeng_yuan_wen@126.com。

相关, SOM 含量可以从土壤反射光谱中得到一定程度的反映^[9-10], 基于 SOM 与土壤光谱反射率存在的定量关系, 遥感影像可以被用于有机质含量的空间反演^[11]。但是由于土壤光谱特性在很大程度上依赖于成土母质^[12-14]; 在较大的地理区域内, 由于成土母质等的差异, 土壤有机质与光谱反射率之间的相关性较小^[15], 因此, 已有 SOM 遥感反演研究区域均较小, 加上植被覆盖会对反演结果造成很大影响, 所以大多数学者的研究结果都大相径庭。本研究在前人研究的基础上, 以 Landsat 7 ETM 影像为数据源, 对影像进行几何校正、辐射校正、大气校正等预处理, 对采样点光谱反射率及其数学变换形式与有机质进行相关性分析, 利用敏感波段或其变换形式建立研究区土壤表层有机质反演模型, 实现整个研究区域的土壤表层有机质空间格局反演, 以期对采煤塌陷区农业生产管理和土壤可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于徐州市九里区境内夹河煤矿、庞庄煤矿、庞庄煤矿张小楼井的煤矿区, 总面积为 59.74 km², 区域内地势较为平坦, 年平均气温为 14.2 °C, 年平均降水量为 834.7 mm。土壤类型为黄潮土, 土层较深厚。3 个矿区经过长达几十年的开采, 从 20 世纪 80 年代起已经出现多个塌陷区, 沉陷范围随着时间推移不断扩大, 并已形成多个较大型的沉陷水面, 与区内纵横的沟渠形成了边界复杂的水系结构, 目前部分已作为鱼塘。伴随矿区的持续开采作业, 塌陷区域仍将在未来几十年内进一步扩大。

1.2 土样采集

2010 年 10 月底, 通过手持式全球定位系统, 在研究区共采集沉陷区表层土(0—20 cm)土样 33 个, 在 30 m×30 m 范围内采取 5 点取样法, 即每个样品由采样中心及其四周 5 个点的土样混合而成, 将样本带回实验室, 经风干、研磨、过筛后, 采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质含量, 土壤样品有机质描述统计量详见表 1。变异系数为 27.37%, 说明研究区土壤有机质含量属中等程度的空间变异性。

表 1 土壤有机质含量描述统计

最大值/ (g·kg ⁻¹)	最小值/ (g·kg ⁻¹)	均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异系 数/%	偏度
19.50	7.87	11.91	3.26	27.37	1.19

1.3 影像数据处理

选取的遥感影像为 2010 年 10 月 21 日 ETM⁺

影像, 空间分辨率 30 m, 与地面采样时间一致, 图幅号为 121/36。对获得的影像进行几何校正、辐射校正、大气校正等预处理, 得到地表真实反射率, 用研究区矢量边界对影像进行裁剪, 为了去除微地形、影像处理与扫描过程中的噪声, 利用 3×3 模板的低通滤波处理影像。研究区 10 月底完成秋收, 地面基本上是裸露的土地, 且影像获取时, 研究区上空的云层含量为零, 因此, 遥感影像可直接反映土壤表层的反射光谱特性。

1.4 模型建立与检验

对遥感影像各波段反射率进行倒数、对数、对数的倒数变换, 采用 SPSS 统计软件对各样点土壤有机质含量与对应的地表反射率及其数学变换形式进行相关性分析, 然后利用分析的结果进行回归分析, 建立土壤有机质含量遥感反演模型。从模型的稳定性、预报能力、精度等多方面对建立的模型进行检验。模型的稳定性用决定系数 R^2 检验, R^2 越大, 模型越稳定; 模型的预报能力用样本的总均方根差 (RMSE) 来检验, RMSE 越小, 模型精度越高、预测能力越强。

2 结果与分析

2.1 研究区表层土壤有机质遥感反演模型

用样本有机质含量和相对应的反射率值进行相关性分析。结果表明, 表层土壤有机质含量与第 5 波段和第 7 波段的反射率值呈极显著的相关性 (R 分别为 -0.585 和 -0.543, $p < 0.001$), 与其他波段反射率值的相关性并不显著 (表 2)。本研究对反射率做了倒数、对数、对数的倒数 3 种变换, 结果显示这 3 中变换均能提高相关性, 其中有机质与第 5 波段和第 7 波段反射率倒数的相关性提高为 0.680 和 0.599, 其他变换效果没这么明显。

表 2 研究区有机质与各波段反射率的相关系数及检验

变量	波段					
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₇
R	-0.271	-0.213	-0.166	-0.127	-0.585**	-0.543**
p	0.127	0.233	0.355	0.481	0.001	0.000

注: **表示在 $p < 0.01$ 水平极显著。下同。

在进行回归分析之前必须要考虑变量之间的相关性, 相关性太高会对最终的结果带来误差, 各波段反射率之间的相关性分析结果详见表 3, 虽然 5 波段和 7 波段与有机质相关性显著, 但是这两个波段反射率本身也存在很大的相关性, 数据重叠多, 所以选取 5 波段反射率的倒数作为回归变量。有研究表明, 有机质在可见光波段有其独特的特性, 1 波段与有机质

相关性虽没有达到显著水平,但是 p 值 0.127 较小,且经过对数的倒数变换之后其与有机质的相关性为 0.324, $p=0.066$ 接近显著水平。

表 3 研究区 ETM⁺ 影像各波段反射率的相关系数

项目	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
B ₂	0.673**				
B ₃	0.665**	0.781**			
B ₄	0.100	0.079	0.089		
B ₅	0.333	0.207	0.290	0.516**	
B ₇	0.514**	0.446**	0.551**	0.154	0.839**

因此,选择第 5 波段反射率的倒数和第 1 波段反射率倒数的对数作为回归变量进行二元回归,回归方程为:

$$y=101.349-2578.869x_1^{-1}+6.185x_2^{-2}+17\ 523.931x_1^{-2} \quad (1)$$

式中: y ——表层土壤有机质含量(g/kg); x_1 ——第 5 波段的反射率; x_2 ——第 1 波段反射率的倒数。回归方程的 $R^2=0.6162$, $p<0.001$ 。回归方程的系数检验结果详见表 4。方程的截距项、一次项和二次项的系数,通过检验均达到了统计学意义上的显著性水平($p<0.05$)。

表 4 回归方程系数的检验

系数	系数值	标准误差	t 检验	概率
b_0	101.349	46.500	2.180	0.038
b_1	-2 578.869	1 176.248	-2.192	0.037
b_2	6.185	3.222	1.919	0.045
b_3	17 523.931	7 323.461	2.393	0.023

2.2 有机质反演模型精度验证

通过 9 个未参与建模的验证点有机质含量的实测值与预测值的相关系数 R 及其均方根误差 RMSE (公式 2)来评价模型的预测精度。 R 值越大, RMSE 越小,则精度越高,反之精度越低。

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(x_i-y_i)^2} \quad (2)$$

式中:RMSE——实测有机质含量与预测值的均方根误差; n ——参加检验的样本点的个数; x_i, y_i ——表示采样点 i 处有机质含量的实测值和预测值。

有机质含量实测值和预测值的线性相关函数为: $y=0.909x+1.055$, 相关系数 R 为 0.909, 接近于 1, $R^2=0.931$ 且均方根误差 RMSE 为 0.89, 比较小, 表明预测结果能较好地再现样区表层土壤有机质的空间分布状况。

2.3 研究区表层土壤有机质含量空间格局

将所得的回归方程带入反射率图像中,并将得到的有机质含量图分为 5 个等级(附图 5),其中,有机质含量在 10~15 g/kg 范围的斑块,所占面积最大为 30.13 km²,占研究区总面积的 50.44%,其次是 7~10 g/kg 面积为 10.33 km²,占研究区总面积的 17.29%,有机质含量在 20~30g/kg 的部分最少只有 2.57 km²,占研究区总面积的 4.30%,其余部分是水域和建设用地共为 9.33 km²。此外,表层土壤有机质含量在样区内总体上呈现出随开采沉陷坡度增加而减少的规律。

为了检验表层土壤有机质含量随开采沉陷坡度变化的空间变异性,将所测的 33 个样点数据的沉陷坡度按 4.00%~5.00%, 5.00%~7.00%, 7.00%~10.00%和 10.00%~11.00%划分为 4 组作箱图,分别设为组 1、组 2、组 3 和组 4(图 1),各组所含变量数分别为 8, 10, 10 和 5。箱的上下 2 个边界分别代表每个区组的 75%分点和 25%分点,横穿箱的黑线为每个区组的中值,2 端浮动的端线为每一区组的边界,从图 1 可知,随着开采沉陷坡度的增加,表层土壤有机碳有明显减少的趋势,且组 1 中有机质含量明显高于其他 3 组。

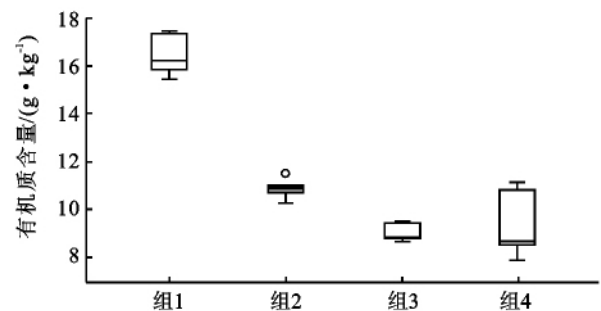


图 1 不同开采沉陷坡度分组间有机质含量变化趋势

注:○表示各组离群值。

为了检验各组有机质数据之间差异的显著性,对各组数据进行单因素方差分析(表 5)。从表 5 可知,组 1、组 2、组 3 有机质含量两两之间差异性显著,组 1、组 2 与组 4 之间也存在显著的差异性,但是组 3、组 4 之间差异性不明显。开采沉陷坡度在一定程度上可以反映采煤活动的强度,采煤活动强度大的地区其沉陷坡度也比其他地方大,说明煤炭开采沉陷对土壤有机质的扰动属于失碳(碳源)效应,且随着开采强度的增强这种效应呈现出增强的趋势,但是当强度达到一定程度时这种效应对有机质的影响会受到抑制。

表 5 沉陷坡度对土壤有机质影响的单因素方差分析

组别 (I)	组别 (J)	均值差 (I-J)	标准误	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
1	2	5.494*	0.736	0.000	3.989	6.999
	3	7.003*	0.736	0.000	5.498	8.508
	4	7.399*	0.884	0.000	5.591	9.207
2	1	-5.494*	0.736	0.000	-6.999	-3.989
	3	1.509*	0.694	0.038	0.091	2.928
	4	1.905*	0.849	0.033	0.168	3.642
3	1	-7.003*	0.736	0.000	-8.508	-5.498
	2	-1.509*	0.694	0.038	-2.928	-0.091
	4	0.396	0.849	0.645	-1.341	2.133
4	1	-7.399*	0.884	0.000	-9.207	-5.591
	2	-1.905*	0.849	0.033	-3.642	-0.168
	3	-0.396	0.849	0.645	-2.133	1.341

注：* 表示在 0.05 水平差异显著。

3 结论

(1) 研究区有机质含量,空间变异性较显著,且影像获取时研究区地面作物已经收割完成,地面呈现出裸土状态,云量为零,因而该区域适于区域土壤有机质含量遥感反演。

(2) 对反射率进行数学变换后可以改善其与有机质含量的相关性,其中与倒数变换最为明显,以第 5 波段反射率的倒数和第 1 波段反射率对数的倒数建立的二元回归模型,对研究区土壤表层有机质含量具有较好的预测能力。

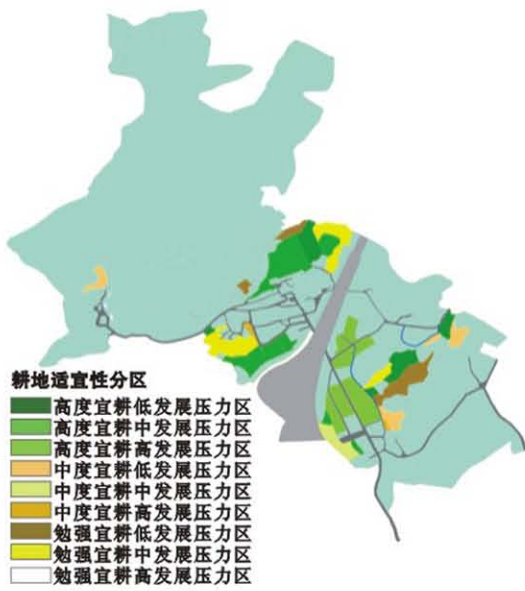
(3) 表层土壤有机质含量随着开采沉陷坡度的增大呈减少的趋势,采煤活动对土壤有机质的扰动属于失碳效应,但当采煤强度达到一定的程度时,这种效应将会减弱。

(4) 表层土壤有机质含量反演结果,可以用于该矿区的土壤退化监测、耕地质量评价、土壤有机碳库估算等,并可为研究区域土壤资源保护、土地可持续利用提供数据支持。

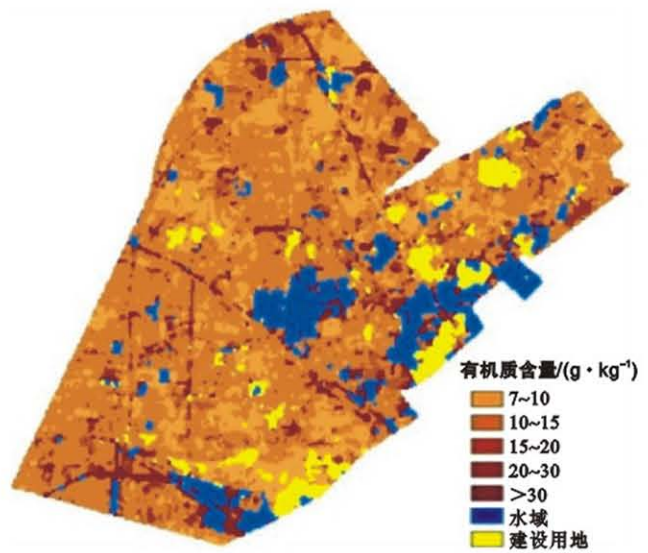
(5) 本模型是建立在裸土的基础之上的,对植被覆盖地表并不适用,这就限制了其在大范围区域的运用,所以后续工作应着重研究如何去除植被的影响。又由于 ETM⁺ 遥感影像空间分辨率为 30 m,光谱分辨率较低,这必将会使研究结果受到影响,今后的研究应尝试运用高空间分辨率和高光谱分辨率影像并结合实地测量的光谱数据来反演表层土壤有机质含量。

[参 考 文 献]

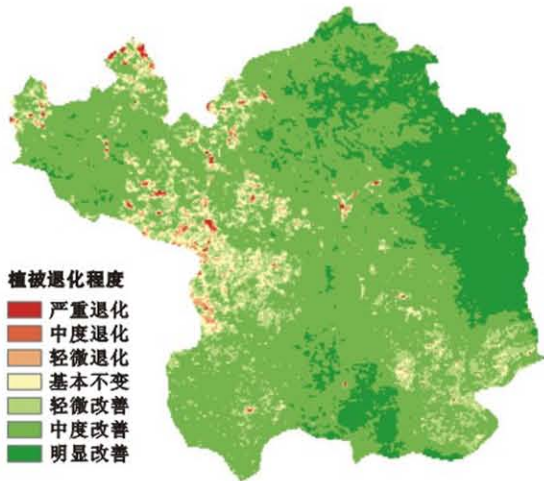
- [1] Zhang Chaosheng, David M G. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods [J]. *Geoderma*, 2004, 119(3/4): 261-275.
- [2] Singer M J, Munns D N. *Soils: An Introduction* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [3] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [4] 张玉铭, 毛任钊, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤养分的空间变异性研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2049-2054.
- [5] 李欣宇, 宇万太, 李秀珍. 基于 TM 影像的表层土壤有机碳空间格局 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 333-338.
- [6] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 任建强, 陈仲新, 唐华俊. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感估产: 以山东省济宁市为例 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2371-2375.
- [8] 吴亚坤, 杨劲松, 李晓明. 基于光谱指数与 EM38 的土壤盐分空间变异性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1023-1027.
- [9] Bendor E, Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(2): 364-372.
- [10] Mccarty G W, Reeves J B, Reeves V B, et al. Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 640-646.
- [11] 刘焕军, 赵春江, 王纪华, 等. 黑土典型区土壤有机质遥感反演 [J]. *农业工程学报*, 2011, 8(27): 211-215.
- [12] 王人潮, 苏海萍, 王深法. 浙江省主要土壤光谱反射特性及其模糊分类在土壤分类中的应用研究 [J]. *浙江农业大学学报*, 1986, 12(4): 464-471.
- [13] 周清, 周斌, 张杨珠, 等. 成土母质对水稻土高光谱特性及其有机质含量光谱参数模型影响的初步研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 905-911.
- [14] Sudduth K A, Hummel J W. Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer [J]. *Transaction of the ASAE*, 1993, 36(6): 1571-1582.
- [15] Fernandez R N, Schulze D G, Coffin D L, et al. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 1023-1026.



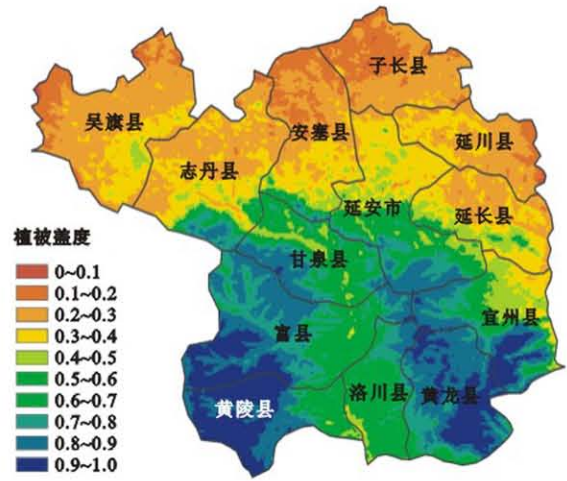
附图4 义乌市岩南村耕地适宜性评价



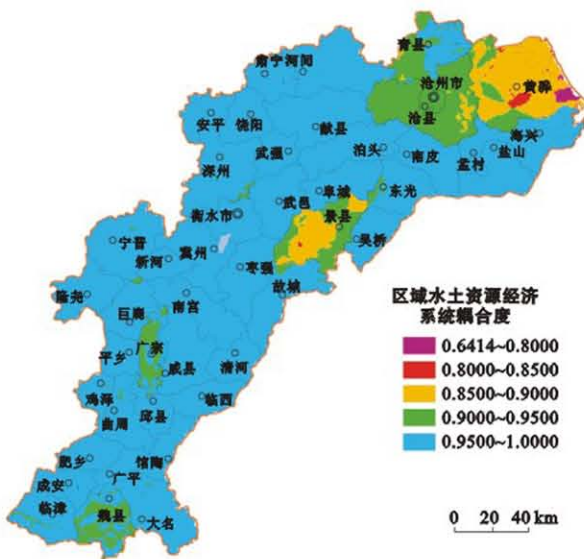
附图5 徐州市九里区采煤矿区表层土壤有机质含量分布



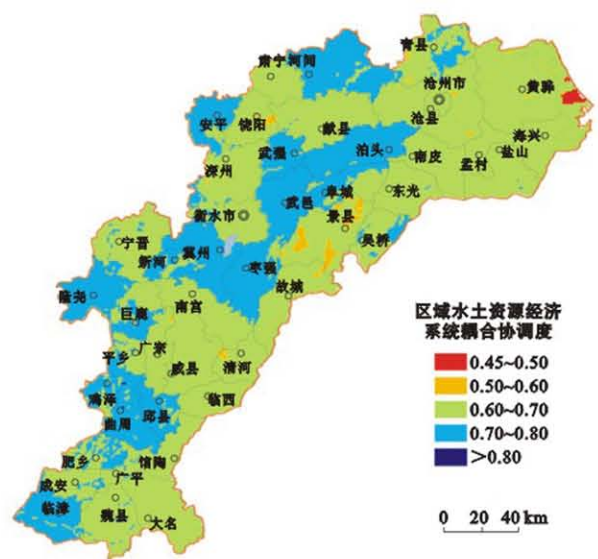
附图6 延安市1999—2008年植被退化空间分布



附图7 延安市植被盖度空间分布



附图8 黑龙江地区水土资源经济系统耦合度分布



附图9 黑龙江地区水土资源经济系统耦合协调度分布