

松辽平原黑土有机质含量的遥感反演研究

程彬¹, 姜琦刚², 陈凤臻³, 张红红⁴, 崔翰文²

(1. 长春师范学院 城市与环境科学学院, 长春 130032; 2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 3. 赤峰学院 资源与环境管理系, 内蒙古 赤峰 024000; 4. 吉林省地质调查院, 长春 130061)

摘 要:通过分析遥感影像中裸露黑土的反射光谱值与土壤有机质含量之间的关系, 尝试能否利用航天遥感影像进行研究区的农田土壤有机质含量的定量反演。研究将土壤有机质含量和 ASTER 遥感影像光谱值进行逐步回归分析, 得出二者的指数关系式, 并将研究区土壤有机质含量分为 5 个等级, 表明利用遥感影像估测土壤有机质含量是可行的。

关键词:土壤有机质含量; ASTER 遥感影像; 光谱值; 估测

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2011)01-0264-04

Study of Surface Soil Organic Matter Using Remotely Sensed Imagery in Northeast China

CHENG Bin¹, JIANG Qi-gang², CHEN Feng-zhen³, ZHANG Hong-hong⁴, CUI Han-wen²

(1. College of Urban and Environmental Sciences Changchun Normal University, Changchun 130032, China; 2. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 3. Department of Resource and Environmental Management, Chifeng University, Chifeng, Inner Mongolia 024000, China; 4. Geological Survey of Jilin Province, Changchun 130061, China)

Abstract: We analyzed the reflected spectrum of bare black soil in remote sensing image and soil organic matter content, and hoped quantificational inversion of bare soil organic matter using remote sensing. The statistical relationship between SOM concentration and spectral value in ASTER image was fit to an exponent equatio. Five levels of surface SOM concentration were classified using this approach. The study was feasible to predict surface SOM concentration quantificationally using Remote Sensing.

Key words: soil organic matter content; ASTER; spectral value; evaluation

土壤有机质 (Soil Organic Matter, SOM) 是植物和微生物生命活动所必需的养分和能量的源泉, 土壤有机质含量的多少是衡量土壤肥力的一个重要指标^[1]。目前, 传统研究对农田土壤信息的监测基本上仍沿用实验室分析的方法, 这种方法耗资、费时, 而且农田土壤栅格式采样的空间尺度偏大, 采样点偏于稀疏, 难于建立较为精细的土壤参数空间分布图。精准农业是近年来国际上农业科学研究的热点领域, 也是现代信息技术和传统农业紧密结合的产物。随着精准农业的发展迫切要求遥感技术能够为其提供快速、准确的地表信息。因此发展支持“精准农作”土壤参数快速测量技术是当今科技创新的一个热点^[2]。土壤反射光谱特性是土壤的基本特征之一。它与土壤的物理性质有着密切的关系。国内外学者大量的研

究表明, 土壤有机质在可见光和近红外波段有其独特的光谱反射特性, 土壤光谱反射率与 SOM 含量呈负相关关系^[3-5], 所以可以通过土壤光谱反射特性与 SOM 含量之间的相应关系, 利用测定土壤的光谱反射率来获取 SOM 含量。然而, 以前大量的研究都是在实验室条件下进行, 去除了很多土壤信息, 如土壤水分含量的不同和纹理差异等对光谱的影响。而在自然条件下, 土壤有机质含量、质地、含水量、氧化铁含量、矿物成分及母质等因素对土壤光谱的影响是很难截然分开, 国内试图在自然条件下利用航天遥感数据获取光谱值进行土壤有机质含量的准确估测研究不多见。Krishnan 等^[6]认为土壤中的有机质含量是决定其在土壤反射光谱中所起的作用, 当有机质含量 > 2% 时, 其在描述土壤反射特性中起主要作用; 当有

机质含量在 2% 以下时,有机质在遮蔽其他土壤组成物质的光谱特性能力有所减弱。黑土的成土母质是黏土、亚黏土,机械组成比较粘细、均匀一致,并以粗粉砂(0.05~0.01 mm)为主,黑土的有机质含量较高(2%~6.5%)^[7]。以上特征表明黑土适合于通过土壤光谱反射特性进行有机质含量的估测。

本文通过在大范围黑土区内采集少量土壤样品进行 SOM 含量测定,并研究在 Aster 遥感影像中典型黑土的光谱反射特征,建立黑土有机质含量多元线性回归模型,实现对大范围的黑土有机质含量的快速估测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于松辽平原,这个区域地处中高纬度,属寒温带大陆性季风气候。这个地区的干燥度≤1,气候条件比较湿润。年降水量 520~620 mm。全区域各地年平均气温为-2.0~1.0℃^[6,8],东北黑土区的地形大部分多为波形起伏的漫岗地。但是坡度不大,一般在 1°~5°。选择这个区域是因为这里黑土分布广泛,且土壤有机质含量高。土壤纹理和有机质含量在整个黑土带中具有代表性。ASTER 遥感影像获取时间是 2006 年 5 月。在东北地区 5 月初土地已经解冻而且降雨很少,但是还没有开始耕种。所以土地处于裸露干燥的状况,地表残落一些作物残茬,这些因素确保从遥感影像中获取的是裸土光谱信息。

1.2 土壤样品获取

在取样前依据第二次土壤普查绘制的 1:10 万黑土分布图,制定采样路线。土壤样品采集时间是 2006 年 5 月,沿公路但距离公路至少 100 m 处,选择典型地块取样。每个地块按 W 形非系统布点法,取 0—15 cm 深度处耕层土壤,采集 4 份土,混合后取 0.5 kg 左右的土样装入特制的布袋中,同时用 GPS 记录取样点经纬度。并记录取样点周围的环境情况。将取回的土壤样品在阴凉处风干 2~3 d。土壤有机质含量采用重铬酸钾法分析。沿公路间隔 5 km 取耕层土壤样品 87 个,其中 4 个样品不能使用(超出研究范围)。69 个土壤样品用于建立土壤有机质含量和遥感影像光谱值的关系。14 个样品用于检验模型。

表 1 土壤样品有机质含量的描述统计量

样品数	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差
83	1.11	9.860	4.0150	1.72448

1.3 ASTER 遥感影像数据预处理

研究中使用 ASTER 遥感影像可见光近红外波

段(VNIR)的 3 个波段和短波红外(SWIR)的 6 个波段,ASTER 传感器波段见表 2。

表 2 ASTER 传感器波段列表

子系统	波段号	频谱范围/μm	分辨率/m
VNIR	1	0.52~0.60	15
	2	0.63~0.69	
	3N	0.76~0.86	
	3B	0.76~0.86	
SWIR	4	1.60~1.70	30
	5	2.145~2.185	
	6	2.185~2.225	
	7	2.235~2.285	
	8	2.295~2.365	
	9	2.360~2.430	

1.3.1 辐射校正 文中使用的影像为多幅 ASTER 遥感影像,月份集中在 4—5 月。由于相邻景数据采集条件不同(星上传感器增益、径辐射、日地距离、太阳高度角、云上太阳辐照度等),造成相邻景背景图像色调差异和重叠区光谱差异,直接影响相邻景拼接效果;最终影响土地定量遥感监测效果。为了改善这种情况,本研究对遥感影像先进行太阳高度角校正、辐射校正、日地距离校正后,再按照常用的相对辐射校正方法校正,两者方法的结合使用,充分利用方法各自的优点,将引起不同时相影像的光谱差异减小,在一定程度上很好地提高了校正精度。

1.3.2 视反射率计算 卫星传感器所记录的数据是图像亮度(DN),并不是辐射亮度值 L(反射的太阳辐射能量),因此要将各 ASTER 波段的图像亮度值(DN)转换为辐射亮度值 L:

$$L = gain (DN - 1) \tag{1}$$

式中:gain——传感器增益。

然后再将辐射亮度值转换成视反射率。

$$\rho = \pi L d^2 / E \sin(\theta) \tag{2}$$

式中:ρ——地物反射率;L——辐射亮度值;D——日地天文单位距离;E——太阳辐照度;θ——太阳高度角。

1.4 光谱数据处理

除直接对反射率进行分析外,还对反射率进行各种数学变换,从中寻找对有机质含量敏感的光谱指标。大部分土壤光谱室内研究都依据 Krishnan^[7]等提出的方法,取土壤光谱值倒数的对数[lg(1/R)]进行研究。同时研究表明,光谱的低阶微分处理对噪声影响的敏感性较低,可以用于去除部分背景和噪声的影响^[3,7],增强光谱数据和土壤有机质含量之间的关系。所以对从影像中提取的土壤光谱值数据进行数学变换处理,计算其一阶微分、二阶微分值。计算公式如下:

$$R'(\lambda_i)=[R(\lambda_{i+1})-R(\lambda_{i-1})]/(\lambda_{i+1}-\lambda_{i-1}) \quad (3)$$

$$R''(\lambda_i)=[R'(\lambda_{i+1})-R'(\lambda_{i-1})]/(\lambda_{i+1}-\lambda_{i-1}) \quad (4)$$

式中： λ_i ——波长等于 i_{nm} 的波段； $R(\lambda_i)$ ——在波段 λ_i 处的光谱反射率； $R'(\lambda_i)$ ——光谱反射率在波段 λ_i 处的一阶微分； $R''(\lambda_i)$ ——光谱反射率在波段 λ_i 处的二阶微分。

本研究中也尝试将以上两种变换方法用于从遥感影像中获取的土壤反射光谱值。对反射率进行的数学变换包括：反射率的对数 $\ln R$ 、反射率倒数的对数形式 $\lg(1/R)$ 、反射率的一阶微分 R' 、反射率的二阶微分 R'' 和反射率倒数的对数再求一阶微分 $[\lg(1/R)]'$ 。

1.5 模型建立与检验

利用 69 个样品，采用相关分析、多元逐步回归分析方法对土壤有机质含量和遥感影像光谱值及其数学变化形式进行分析，建立土壤有机质含量相应模型。使用 14 个样品对模型进行检验。

2 结果与分析

2.1 建立回归模型

在图 1 中，可以得出黑土的有机质含量与土壤光谱值之间是负相关关系，9 个波段的相关性都在 -0.5 以上，最高的达到 -0.7 。由此表明，黑土的有机质含量与 ASTER 遥感影像中黑土反射光谱值是

负相关且相关性很好。对单波段进行分析中得到，黑土的有机质含量与光谱值及其各种数学变换之间的关系中使用指数关系表示最理想。在建立二者关系之前，对黑土的有机质含量进行对数变换 $\ln(\text{SOM})$ 。变换后，有机质含量对数形式与土壤光谱值相关性各个波段都有增强(图 1)。尤其在可见光波段相关性增强明显，在 $0.556\text{ }\mu\text{m}$ 处，相关系数从 -0.607 增加到 -0.678 。所以本研究中使用黑土有机质含量的对数形式与土壤反射光谱值建立相应关系，可以增强模型的精度和稳定性。

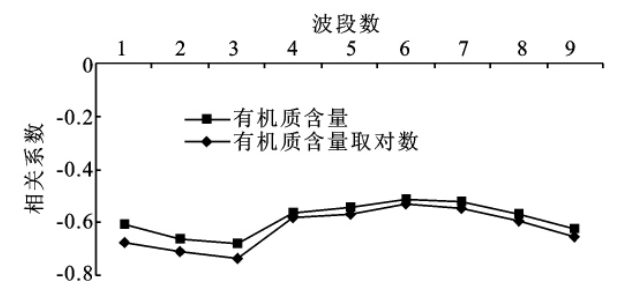


图 1 有机质含量及其对数变换与光谱值的相关系数

以黑土有机质含量对数变化作为因变量，分别以黑土的光谱反射率及其数学变换作为自变量，进行多元逐步回归分析。分析过程中，使用 F 显著水平值作为逐步回归方法的准则，选入和剔除自变量的概率参数分别设置为 0.05 和 0.10 。

表 3 有机质含量多元线性逐步回归模型

回归方程	R^2	校正 R^2	RMSE
$\ln(\text{SOM})=4.301-9.318R_3-57.307R_9+37.318R_8$	0.780	0.769	0.284
$\ln(\text{SOM})=-2.174-9.058R_3-8.932\ln R_9+7.236\ln R_8$	0.786	0.775	0.279
$\ln(\text{SOM})=-6.178+3.194\lg(1/R_3)+20.539\lg(1/R_9)-16.633\lg(1/R_8)$	0.785	0.774	0.284
$\ln(\text{SOM})=-0.293+2.053\lg(1/R_2)'+1.736\lg(1/R_8)'+5.562\lg(1/R_5)'$	0.578	0.557	0.366
$\ln(\text{SOM})=1.914-7.084R_2'-6.464R_5'$	0.546	0.531	0.366
$\ln(\text{SOM})=2.513+5.141R_3''+3.251R_5''+0.168R_7''$	0.527	0.503	0.366
$\ln(\text{SOM})=-6.997-1.268\ln R_3-9.806\ln R_9+7.734\ln R_8+0.653R_3'$	0.847	0.837	0.220
$\ln(\text{SOM})=-0.89-10.844R_2'+3.423[\lg(1/R_8)]'+3.435R_8'-1.836R_4'-3.094[\lg(1/R_2)]'+4.983R_5'$	0.864	0.850	0.220

注： R_i 表示光谱反射率； $\ln R_i$ 表示光谱反射率的对数形式； $\lg(1/R_i)$ 表示光谱值倒数的对数； R_i' 表示光谱反射率的一阶微分形式； R_i'' 表示光谱反射率的二阶微分形式。

表 3 中列出基于光谱值及其数学变化形式建立的黑土有机质含量多元线性回归方程。由于各光谱数据及其数学变换形式与黑土有机质含量的对数形式都显著相关。所以依据决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 值来选择模型。可以看出，使用光谱值倒数的对数 $[\lg(1/R)]$ 建模，校正 R^2 为 0.774 ，RMSE 为 0.284 。表明这种变换形式同样适用与从遥感影像中获取土壤的光谱值进行估测有机质含量。同理，使用 R' 、 R'' 变换形式也可以用于估测。研究中，将光谱值对数形式 $\ln R$ 和光谱值的一阶导数 R' 一起用于估测

有机质含量时，效果明显提高，校正 R^2 为 0.837 ，RMSE 为 0.22 。

2.2 模型检验

从模型的稳定性和预报能力两个方面对模型进行检验。模型的稳定性用校正 R^2 的大小检验， R^2 越大，模型越稳定；模型的预报能力用总均方根误差 (RMSE) 检验，RMSE 越小，模型精度越高，估测能力越好。

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(\mu_i-\hat{\mu})^2} \quad (5)$$

式中: μ_i ——有机质含量传统方法测量值; $\hat{\mu}$ ——模型估测值; n ——建模样本数。

从表 3 可以看出,模型的校正 R^2 都在 0.5 以上,最高达到 0.85;模型的总均方根误差 RMSE 较低,小于 0.38,最低为 0.22。另外,土壤有机质含量的实测值和估测值之间线性关系(图 2), $\ln\text{SOM}$ 实测值 = $0.985\ln\text{SOM}$ 估测值, $R^2 = 0.91$ 。从图中可以看出, SOM 在 3%~5% 估测效果较好。

所以,在保证决定系数 R^2 足够大的情况下,根据模型检验结果选择波段少的模型作为最终有机质含量估测模型。通过比较,依据精度高,稳定性好,入选波段少,选择公式:

$$\ln(\text{SOM}) = -6.997 - 1.268\ln R_3 - 9.806\ln R_9 + 7.734\ln R_8 + 0.653R_3' \quad (6)$$

式中: $\ln(\text{SOM})$ ——土壤有机质含量的对数形式; $\ln R_3$ 、 $\ln R_8$ 、 $\ln R_9$ ——分别为光谱值 R_3 、 R_8 、 R_9 的对数形式; R_3' ——光谱值的 R_3 一阶导数。公式(6)用于土壤有机质含量估测。

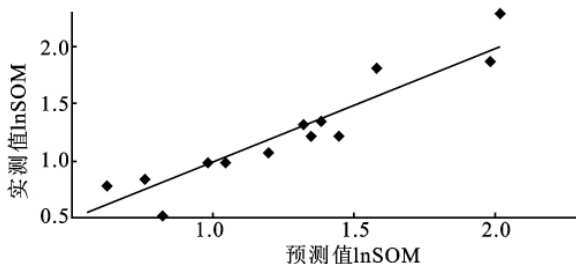


图 2 估测值和实测值散点图

2.3 表土有机质含量分类

将这个关系式应用于遥感影像中进行土壤有机质含量分类。其它研究者在分类前一般先将影像中存在的城镇等先掩膜掉,这样有助于提高土壤分类精度。在本研究区中,村庄和小城镇的分布连成片,不便于将所有村庄掩膜掉,所以先将非土地的地物类型分出来,再进行土壤有机质含量的分类(附图 12)。从

(上接第 247 页)

- [12] 韩磊,贺康宁,芦新建,等. 青海高寒半干旱区蒙古莠叶水势变化及其与环境因素的关系[J]. 水土保持通报, 2008,28(6):1-5.
- [13] 王华田,马履一,徐军亮. 油松人工林 SPAC 水势梯度时空变化规律及其对边材液流传输的影响[J]. 植物生态学报,2004,28(5):637-643.
- [14] 徐军亮,马履一,王华田. 油松人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J]. 北京林业大学学报,2003,25(5):1-5.
- [15] 刘静,贺康宁,韩磊. 黄土高原西部高寒区引进树种银

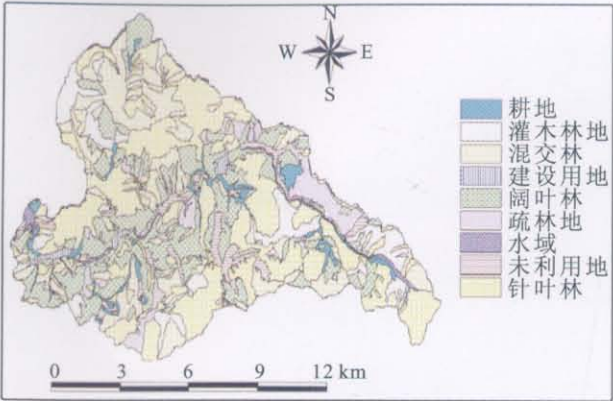
黑龙省北安市到哈尔滨市范围内,通过遥感影像将耕地土壤有机质含量空间分布趋势直观地显示出来。总体来看,研究区南部地区有机质含量明显低于北部地区。有机质含量随纬度的增加呈现出逐渐升高的趋势。

3 结 论

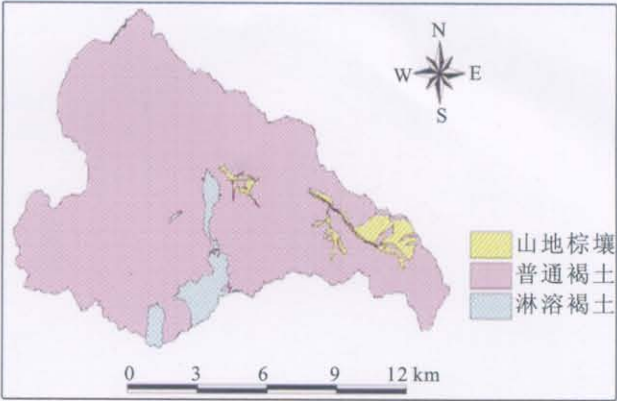
通过分析遥感影像的光谱值及其数学变换形式与有机质含量的对数形式的关系,并且建立有机质含量估测模型,将研究区土壤有机质含量分为 5 个等级。利用线性回归比较估测值和测试值, $R^2 = 0.91$,模型精度较高,稳定性好。表明通过遥感影像将耕地土壤有机质含量空间分布趋势直观地显示出来。

参考文献:

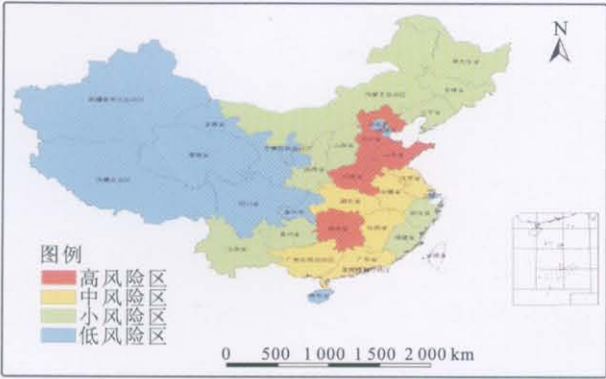
- [1] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京:农业出版社,1983.
- [2] Wolf S A, Buttel F H. The political economy of precision farming[J]. Am. J. Agr. Econ., 1996,78:1269-1274.
- [3] Stone E R, Baungardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981,45:1161-1165.
- [4] 戴昌达. 中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究遥感文集[C]. 北京:科学出版社,1981:315-323.
- [5] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究[J]. 土壤,2000(6):281-287.
- [6] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44:1282-1285.
- [7] 黑龙江省土壤肥料总站. 黑龙江土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1991.
- [8] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1993.
- 水牛果叶水势研究[J]. 水土保持研究,2009,16(5):194-198.
- [16] 宋耀选,周茂先,张小由,等. 肖洪浪额济纳绿洲主要植物的水势与环境因子的关系[J]. 中国沙漠,2005,25(4):496-499.
- [17] 康绍忠,刘晓明. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [18] 卜崇峰,刘国彬,许明祥. 陕北黄土区狼牙刺水势研究[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1393-1397.



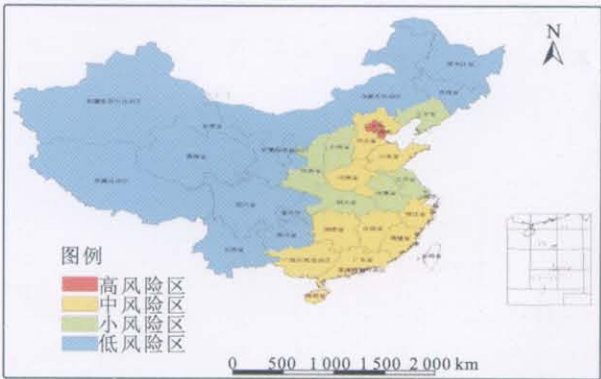
附图5 红门川流域2005年土地利用图



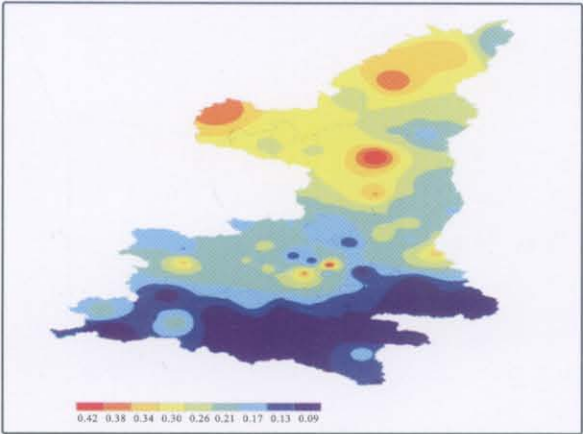
附图6 红门川流域土壤类型图



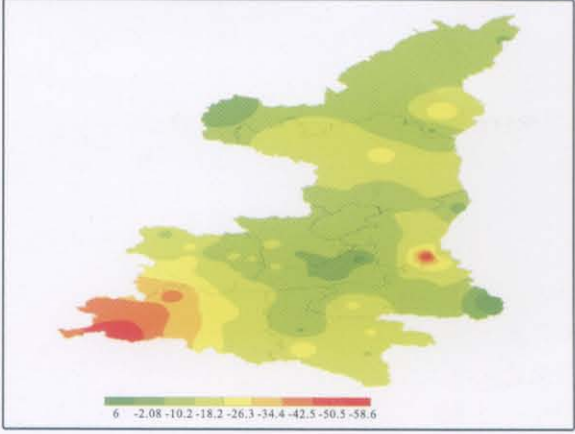
附图7 2020年我国旱灾风险等级图



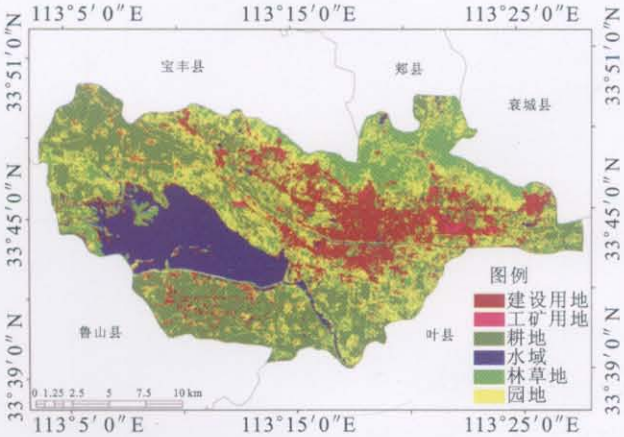
附图8 我国旱灾相对减产风险等级图



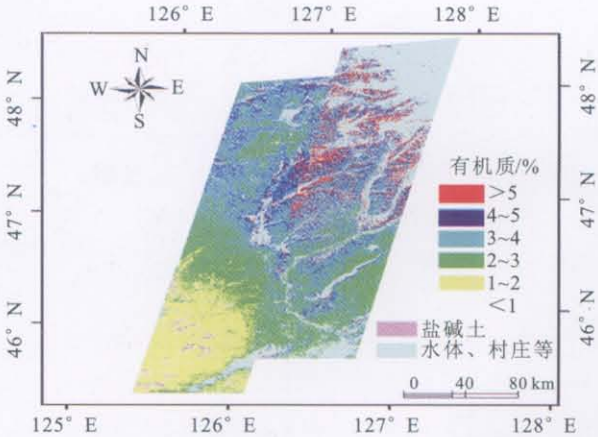
附图9 1961-2008年陕西省气温线性趋势空间分布



附图10 1960-2008年陕西省降水线性趋势空间分布



附图11 研究区景观分类图



附图12 土壤有机质含量空间分布图