

基于遥感和 GIS 的土地利用分类方法及其在 土地退化程度分析中的应用

——以陕西横山雷龙湾地区为例

许 宁^{1,2}, 郭旭东^{1,*}, 田淑芳³, 洪友堂², 张 聪³, 吴 萍²

(1. 中国土地勘测规划院, 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035; 2. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083;
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 基于陕西省横山县雷龙湾地区的遥感 ETM⁺ 影像, 分别采用最大似然法和光谱角制图分类 (SAM) 方法进行了该区的土地利用类型分类。其中, 光谱角制图分类利用最小噪声分离 (MNF) 及像元纯净指数 (PPI) 方法提取研究区的地类终端单元, 在此基础上绘制土地利用类型图。最大似然法对水体及耕地的分类精度较高, 而其它地类精度稍差, 沙地有较大漏分; 而基于像元纯净指数的光谱角制图法分类对沙地、水体分类效果较好, 对建筑用地和非建筑用地分度较高, 但林地和草地有一定混分。根据研究区反照率影像、NDVI 以及湿度图像构造了一个土地退化程度指数模型, 并选择一定的系数对研究区的土地退化程度进行了分类, 利用 GIS 软件成图输出。利用光谱角制图分类的纯净像元样本进行比较分析, 发现土地退化程度指数与土地利用的相关性较强, 表明该方法可以较好地反映当地的土地退化程度情况。

关键词: 土地退化; 遥感; GIS; 退化程度指数; 方法比较; 横山雷龙湾

文章编号: 1000-0933(2008)11-5410-08 中图分类号: S151, TP97, P901 文献标识码: A

Remote sensing and GIS based comparison of land-use classification methods and data mining for degree of land degradation: a case study in Leilongwan Area, Hengshan County, Shannxi Province

XU Ning^{1,2}, GUO Xu-Dong^{1,*}, TIAN Shu-Fang³, HONG You-Tang², ZHANG Cong³, WU Ping²

1 Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, China China Land Surveying & Planning Institute, Beijing 100035, China

2 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3 School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5410 ~ 5417.

Abstract: This study employed the maximum likelihood classifier and spectral angle mapping (SAM) method to classify land-use types in the Lilongwan area, Hengshan County, Shannxi province, using Landsat ETM⁺ remote sensing data. The SAM adopted the minimum noise fraction rotation (MNF) and pixel purity index (PPI) to extract terminal elements of land-use types and based on that to develop the land-use map. The maximum likelihood classifier achieved higher accuracy on water and arable land than the other land-use categories with omission errors occurred on the sandy land category. As the

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目 (2006BAB15B05); 国家国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目资助

收稿日期: 2007-12-21; **修订日期:** 2008-06-23

作者简介: 许宁 (1982 ~), 男, 四川成都人, 硕士生, 主要从事遥感信息提取及 GIS 应用研究. E-mail: x_ning520@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoxudong@mail.cslpi.org.cn

Foundation item: The project was financially supported by China National Key Technologies R&D Program of the 11th Five-Year Plan (No. 2006BAB15B05); Excellent Young Scientists Plan of the Ministry of Land and Resources, China

Received date: 2007-21-21; **Accepted date:** 2008-06-23

Biography: XU Ning, Master candidate, mainly engaged in remote sensing and GIS. E-mail: x_ning520@yahoo.com.cn

SAM achieved better classification results for sandy land, urban and built-up land and water categories, certain level of confusion existed between woodland and grassland categories. We then established a model of land degradation degree index (DDI) using Albedo, NDVI and wetness from remote sensing data and selected parameters of the model to obtain an improved classification result. We employed GIS technology to produce the map for degree of land degradation. The comparison analysis between SAM classification and PPI samples showed a good correlation between DDI and land-use types. This study indicates that the methodologies developed in this study can be used to reveal the degree of land degradation information of the study area.

Key Words: land degradation; remote sensing; GIS; degradation degree index; methods comparison; Hengshan County

遥感技术已经广泛应用于土地利用分类与土地退化的监测评价中,基于不同目的,不同的土地利用遥感分类方法比较仍然是当前研究的一个重点。土地退化信息可以通过目视解译、人机交互解译,以及非监督分类、监督分类来获取^[1~5],或是利用一些指标来进行土地退化评价和制图^[6~8]。利用不同的土地利用遥感分类技术以及指标结合来进行退化分析也是一个重要的研究方向^[9~11]。由于地表复杂的地理、覆盖条件,以及遥感影像空间、光谱分辨率的限制,给土地退化的定量化、精细化研究造成了一定的困难,而对土地退化的遥感信息进行进一步挖掘可以更真实的反映地表退化状况,更有效的利用遥感数据。因此,基于遥感技术,通过一些指数和模型,进一步深入挖掘土地退化程度信息成为近年来土地退化研究的热点^[12~14]。

本文以陕西省横山县境内的雷龙湾作为试验区(图 1),利用遥感 Landsat ETM⁺ 数据获得了该区的反照率、植被指数以及湿度图像,探索一种反映土地退化程度的量化分析方法,并结合 GIS 软件来进行横山雷龙湾地区的土地退化程度的分析和制图。

1 研究区概况

雷龙湾地处横山县西北角(北纬 37°51′~38°06′,东经 108°56′~109°13′),北临毛乌素沙漠南缘,属典型的风沙草滩区,面积约为 388km²。区域气候为半干旱大陆性季风气候,年平均温度 8℃,平均日照时数为 2815h,无霜期 146d 左右,年平均降水量 400mm 左右,降水多集中在 7~9 月份,年际变率大。研究区区内土壤以黄绵土为主,土质疏松,抗蚀性差。域内自然植被破坏殆尽,垦殖指数较高,土地利用以耕地、梯田、坝地、草地、林地和灌木林地为主。

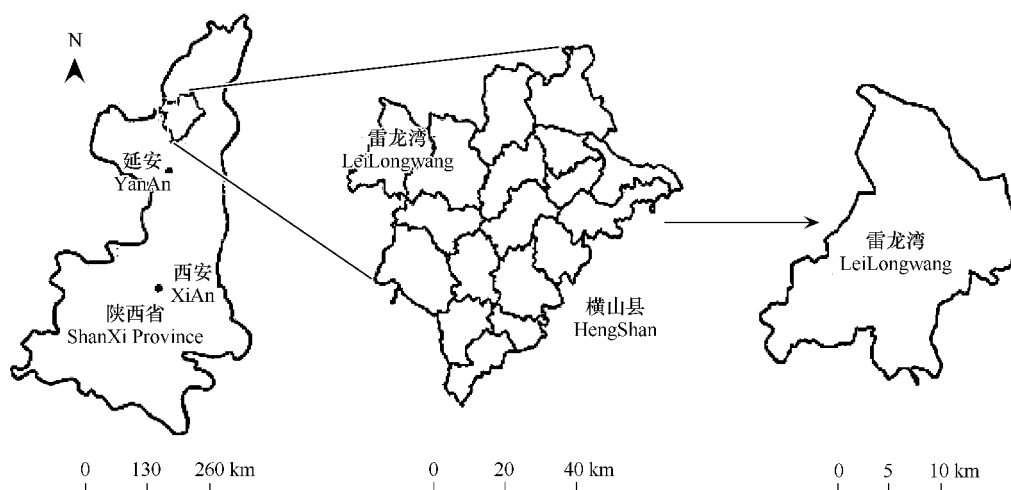


图 1 研究区陕西横山雷龙湾地区

Fig. 1 Location of the study area

2 遥感及 GIS 数据处理

2.1 数据预处理

本文收集了该地区 2002 年 9 月 23 日的 Landsat7 ETM⁺ 数据,为 1~5、7 及全色波段。收集的遥感影像是经过辐射校正和系统级几何校正的数据,据此做以下预处理:(1)结合横山地区的地形图,选择控制点对遥感影像进行二次多项式精校正,将多光谱波段与全色波段进行了融合。(2)在 ArcGIS 软件中利用横山行政区划图导出雷龙湾地区的行政界线,设为感兴趣区并截取了研究区的遥感影像。

2.2 遥感反照率的反演

遥感影像记录的是平均辐射强度对应的 DN 值(digital number),为了更好地反映地表的真实情况,有必要对遥感数据进行处理,获得其反射率图像。遥感 ERDAS 软件的 Modeler 模块提供了运算功能,可以利用公式(1)获取星上反射率。该模块进行计算需要遥感数据的增益和偏置等参数(见表 1),可以在数据的头文件中得到:

$$L_{\lambda} = Gain \times DN + Bias, \rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta)} \quad (1)$$

式中, L 辐射亮度($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); DN 像元灰度值,取值(0~255); ρ 星上反射率,无量纲; d 地日距离,天文单位; $ESUN$ 大气外平均太阳光谱辐射量($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$); θ 太阳天顶角($^{\circ}$)。

得到的星上反射率还需要进行大气校正等处理最终反演地面真实反照率,常用的辐射传输模型有 6S、ATCOR、MODTRAN 等,这些模型都需要成像当地的大气、气候及地表特征参数^[15,16],对此,本文将基于星上反射率进行近似实验。为简化和方便后期计算,在导入计算生成星上反射率图像时用式(1)中的第二式乘以一百并取整,得到整数反射率值图像。最后,利用 Liang^[16] 的研究成果,用公式(2)得到宽波段的单景反照率影像:

$$\rho_{wide} = 0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018 \quad (2)$$

表 1 研究区 2002 年遥感影像头文件参数($\theta = 47.5^{\circ}$)
Table 1 Parameters in head file of remote sensing data ($\theta = 47.5^{\circ}$)

波段 Band	增益 Gain ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	偏置 Bias ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	$ESUN_{\lambda}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)
1	1.180708708725576	-7.380708517990713	1969.000
2	1.209842496030913	-7.609842591398344	1840.000
3	0.942519661009781	-5.942519661009781	1551.000
4	0.969291362236804	-6.069291266869373	1044.000
5	0.191220471239465	-1.191220471239465	225.700
7	0.066496066573098	-0.416496060612633	82.07

2.3 植被和湿度信息提取

遥感影像通常利用植被指数进行植被信息提取,本文比较了归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)以及通过缨帽变换获得的绿度分量图像,最后选择归一化植被指数进行分析。NDVI 能很好地反映植被生长状态,是植被盖度的最佳指示因子,并且能部分消除太阳高度角、地形、阴影等的影响^[3]。同时,利用缨帽变换($K-T$)提取了研究区的湿度分量图像。

3 土地利用制图分析

遥感分类技术被广泛应用于土地利用类型的区分,在监督分类中,样本的选择是决定分类结果的关键因素。本次实验首先选用了最大似然法和基于纯净像元的光谱角制图(spectral angle mapper, SAM)方法区分地类,并以这两种分类的结果作为基准和参考,与后续的土地退化程度指数模型进行比较分析,以此判别土地退化指数方法的合理性和可行性。

3.1 基于概率统计的最大似然法分类

最大似然法根据相似的光谱性质和属于某类的概率最大来指定某个像元的类别,经常被应用于多光谱数据分类,是一种经典的监督分类方法^[17]。将试验区遥感影像以 743 彩色合成,结合当地的土地利用图件和地物覆盖特征建立解译标志,并判读明显区域地物作为感兴趣区保存。选择的地类包括耕地、林地、荒草地、水域、沙化地、建设用地 6 类。在 ENVI 软件中进行最大似然法分类,经过多次对比,反复修改选择的样本数据,最后选概率阈值为 0.78,生成分类图像(图 2a)。

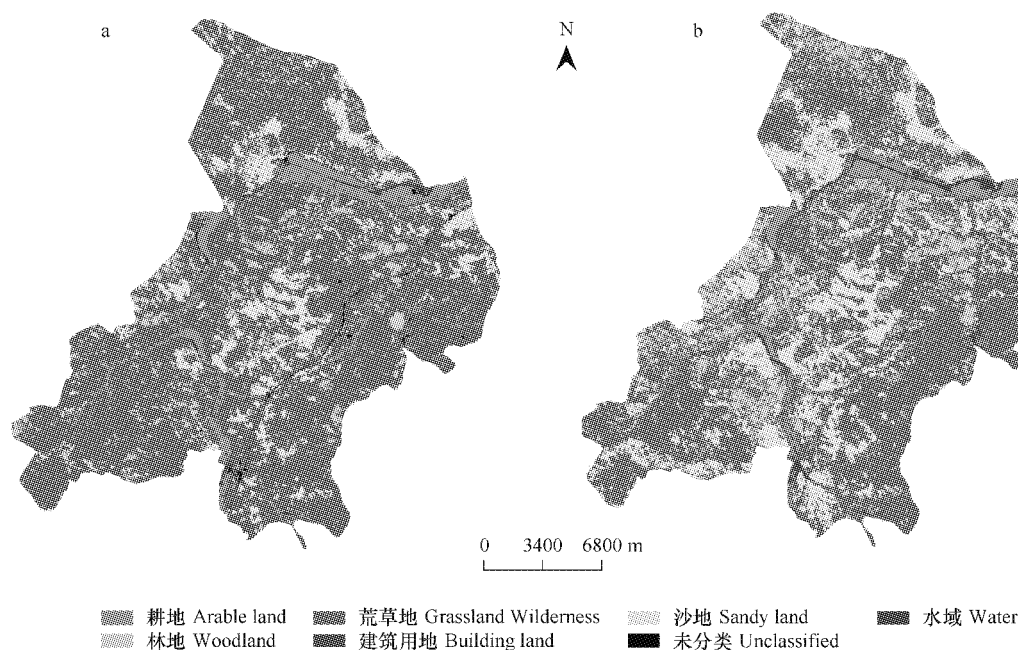


图 2 最大似然法(a)和光谱角制图法(b)分类结果

Fig. 2 Classification results of Maximum Likelihood way (a) and SAM (b)

3.2 基于纯净像元的 SAM 分类

人工选择的分类样本数据显然不是非常纯净的象元。结合高光谱数据的处理方法,选择在 N 维空间中提取终端像元(endmember)对试验区进行土地利用的分类。

首先把试验区多光谱图像的无数据区进行掩膜处理,再进行最小噪声分离变换(minimum noise fraction, MNF),选择生成 6 个组分,各个组分的信息含量逐渐减小。最小噪声分离本质上是含有两次叠置处理的主成分变换,其作用是可以很好的将光谱信息和噪声分离,由此提高波谱处理的效果,该方法在高光谱数据中应用很广。接着进行像元纯净指数(pixel purity index, PPI)迭代分析,迭代次数为 10000 次,阈值因子设为 3(图 3)。像元纯净指数可以在光谱数据中寻找最纯净的端元,从而提取不同地物信息。在生成的 PPI 图像上,像元亮度值代表该像元被标记为纯净端元的次数。通过分析,选择 200 为最小阈值提取感兴趣终端像元,提取得到的终端像元 1416 个,将这些终端像元在三维空间中进行散度图分析,在三维空间中,有的像元呈团堆状,有的呈连续拐弯状。

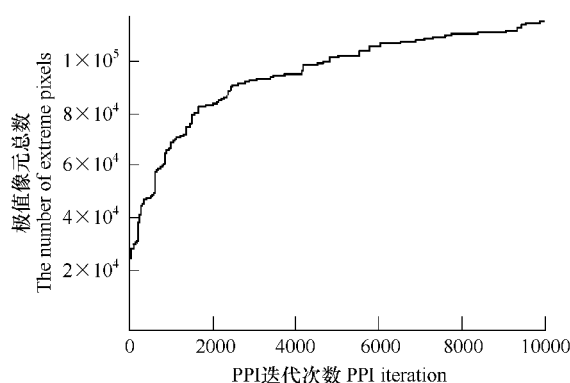


图 3 PPI 变换迭代曲线

Fig. 3 Iteration curve of PPI

通过试验分析,最后在空间中选择提取了6个(水体有两种,一种色调偏浅,一种偏深,只列出一种)不同位置的端元团,对应的光谱曲线(试验区林地偏深色调(见图4)。将这六类端元作为分类样本,利用光谱角制图进行监督分类,经过合并地类等后处理得到分类结果图像(图2b)。

4 土地退化程度制图分析

4.1 土地退化程度指数构建

对于遥感影像反照率及植被指数同沙化程度的关系,曾永年^[8]等人做了一些研究,并证明了沙化和前二者有很大联系。由于试验区地处黄土高原区,沙化严重,土壤含水量是土地退化的重要影响因子,因此在土地退化程度指数的构建中引入了湿度影像。通过多次试验,构造研究区土地退化程度指数(degradation degree index, DDI):

$$DDI = a \times \text{Albedo} - b \times \text{NDVI} - c \times \text{Wet} \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 为系数,Albedo为遥感影像反照率,NDVI为归一化植被指数,Wet为湿度。

将研究区水体和人工建筑用地进行掩膜,考虑研究区各分量影像的数值,为拉开退化程度的差距,更好地表现不同程度的退化信息,在通过多次试验以后,以DDI系数 $a=100$, $b=2000$, $c=10$ 进行计算,其中由于湿度图像像元值为负值,在经过图像统计后,得知湿度值最小为-58.5,做波段运算 $60 +$ 将湿度图像转为正值,得到研究区土地退化程度指数图像。据式(3)可知,DDI值越高,土地退化程度越严重。将DDI影像导入GIS软件,根据反照率、NDVI、Wet影像及DDI灰度图像数值统计和分析情况,将土地退化程度分为极重度退化、重度退化、中度退化、轻度退化和未退化五个级别,最后设定阈值,得到最终结果(图5)。

4.2 DDI与土地利用类型相关性分析

为便于统计,以选择的纯净像元为基础,在743合成图像上进一步进行人工选择,对研究区内四大地类增加了样本的数量,包括耕地、沙地、林地以及荒草地。统计发现,所选地类反照率、NDVI、湿度的像元均值均有较大差别(表2)。把这些不同地类样本进行了DDI值的统计,获得不同地类的DDI值均值,其中林地地为-590,耕地为80,荒草地为1619,沙地为4642(建筑用地和水体不参与退化土地分析)。再将这4种地类进行编号并把它与DDI进行了相关性分析,发现土地利用类型与土地退化指数(PPI)存在较高相关性,其相关系数 R 达到0.956,进行线性拟合分析得到的拟合方程式见图6。可分析得知极重度退化地基本为沙地,重度退化地为少量沙地和裸露荒草地,这类地反照率高,NDVI值低,湿度低;中度退化地为较裸露荒草地及一些坡

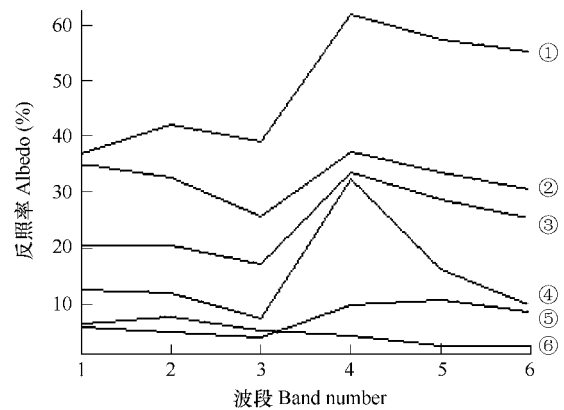


图4 提取的终端端元光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of different endmembers

①沙地 Sandy land; ②建筑用地 Building land; ③荒草地 Grassland and Wilderness; ④耕地 Arable land; ⑤林地 Woodland; ⑥水域 Water

表2 各地类提取样本点的统计结果

Table 2 Statistics result of the swatches in the study area

地类 Land use types	数据项 Data items					
	反照率 Albedo(%)		植被指数 NDVI		湿度图像 Wet	
	均值 mean	标准差 Stdev	均值 mean	标准差 Stdev	均值 mean	标准差 Stdev
耕地 Arable Land	16.60	2.96	0.53	0.08	-7.04	1.99
林地 Woodland	8.69	1.09	0.47	0.07	-9.01	0.70
荒草地 Grassland	26.78	1.36	0.34	0.02	-21.20	1.28
建筑用地 Building Land	27.55	2.81	0.23	0.01	-21.67	2.25
沙地 Sandy Land	52.10	6.71	0.23	0.02	-48.51	6.17
水体 Water	13.65	0.52	0.17	0.03	3.88	0.56

地,它们的反照率较高,NDVI 值较低,湿度较低;轻度退化地主要为荒草地及一些耕地、林地;而未退化地主要为耕地及林地,反照率低,NDVI 值大,湿度值较大。

5 结果与分析

本文采用混淆矩阵和 Kappa 系数对分类结果进行精度评价(表 3)。

对于最大似然法分类,由于人工选择地类样本点,它很好地突出了耕地和水域的分类结果,研究区左下角一块林地也得到了很好的辨认,但减少了沙化地和林地的覆盖率;荒草地占地面积较大,由于选择样本点数量的关系,精度评价结果并没有很好体现;研究区建设用地和部分荒草地波谱比较相似,该地类的分类结果最差;对所选的样本也有一些漏分,水体 2 个样本以及建筑用地的 8 个样本都归入了未分类用地。

而基于纯净像元指数的光谱角制图法对沙化土地、水体、建筑用地起到了较好的区分作用,荒草地分类效果也较好,耕地和林地有一定的混分,总体效果较好。在 PPI 指数图像中提取的端元样本还有一部分是暗色调水体,它也参与了分类,而在精度评价时没有参与评价,这是导致最后总体精度和 Kappa 系数比最大似然法低的主要原因。

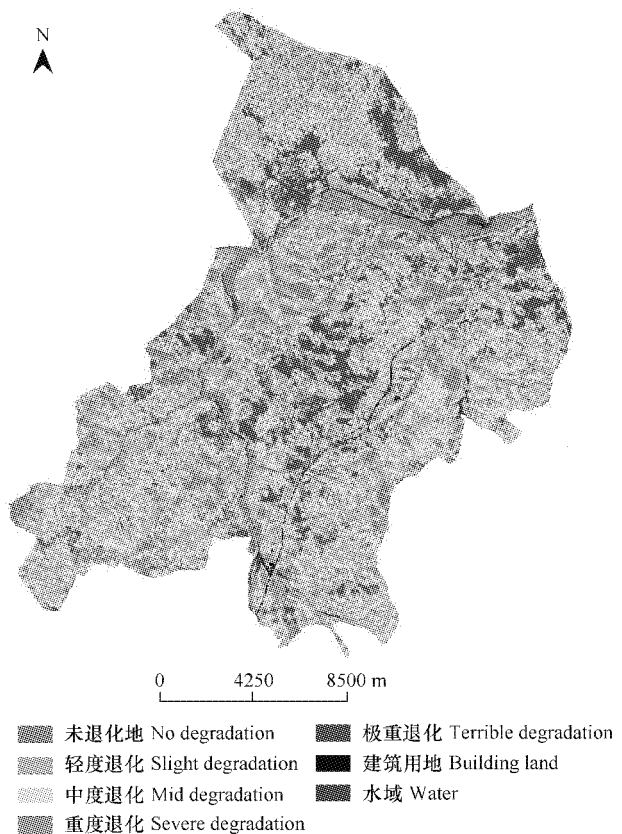


图 5 DDI 分类图像

Fig. 5 DDI image of the study area

表 3 两种分类方法精度评价结果*

Table 3 The accuracy assessment result of the classification methods

地类 Land style	沙地 Sandy Land		耕地 Arable Land		林地 Woodland		荒草地 Grassland and Wilderness		建筑用地 Building Land		水域 Water		总样点数 Total Swatches	
沙地	140	214	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	140	225
耕地	0	0	107	114	0	0	0	0	0	0	0	0	107	114
林地	0	0	0	0	157	134	0	0	0	0	0	0	157	134
荒草地	80	6	7	0	27	50	112	112	12	1	0	1	238	170
建筑用地	0	0	0	0	0	0	0	0	7	15	0	0	7	15
水域	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83	84	83	84
未分类 Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	2	0	10	0
总样点数	220		114		184		112		27		85		742	
最大似然法:总体精度 81.6%, Kappa 系数 0.77							SAM 法:总体精度 79.6%, Kappa 系数 0.75							
Total Accuracy 81.6%, Kappa Coefficient 0.77							Total Accuracy 79.6%, Kappa Coefficient 0.75							

竖列表格中各地类的前列为最大似然法,后列为光谱角制图(SAM)法结果 The former represents maximum likelihood way and the latter represents SAM way

基于前述两种地类分类结果,与 DDI 指数方法的结果进行比较分析,可以发现:DDI 方法很好的反映了试验区的土地退化程度状况,它有效地区分了极重度退化的沙化土地;对林地的区分效果也较好,如一些 SAM 法没有区分出来,但最大似然法取得很好分类效果的研究区左下部林地区,DDI 法把其列入了未退化地范畴;而荒草地部分由于其湿度、植被覆盖度较低,反照率较高,被纳入了中、轻度退化范围。总体来看,该方法可以较好地、合理地反映试验区的土地退化程度情况。

6 结论

最大似然法作为一种常用、经典的监督分类法可以为研究区分类研究提供参考。由于该方法的前提是认为每一类别地类的概率密度都呈正态分布,而不同地区、不同地类的数据可能有不同的分布方式,这就会导致一些地类较大的分类误差。而在高光谱研究中应用较广的最小噪声分离法、纯净像元指数法也可以比较好的应用于多光谱数据,本文就在此基础上选择分类样本进行不同地类的分离,取得了较理想的分类效果。

利用研究区反演的宽波段反照率影像、NDVI 以及湿度影像构造了研究区的土地退化程度指数(DDI)模型,通过试验分析选择了合适的系数进行了土地退化程度制图,并与不同分类方法结果进行了比较分析,证明该方法可以较好的反映试验区的土地退化情况。

土地退化程度指数参与的组分可能根据研究区的不同有相异的选择,系数的确定是一个难点,怎样通过量化分析来确定系数模型也值得深入分析。

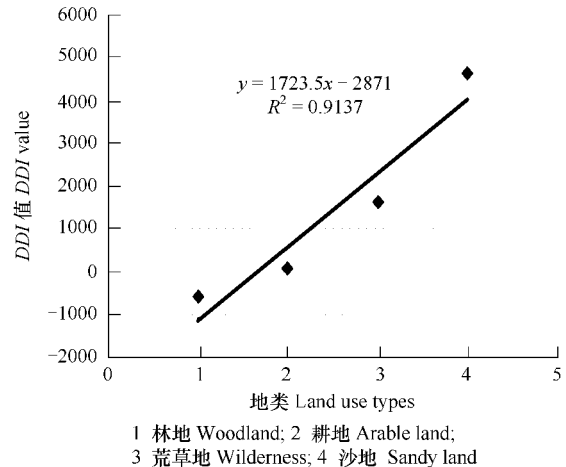


图6 地类与 DDI 值的相关性

Fig. 6 The correlation between land use types and DDI value

References:

- [1] Sommer S, Hill J, Mégier. The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, 67(3): 197–209.
- [2] Fang H B, Zhang Z D, Zhang P M. A remote sensing study of land desertification along the Peripheral Areas of TARIM Basin. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2003, 56(2): 5–10.
- [3] Chabrillat S, Kaufmann H, Hill J, *et al.* Research opportunities for studying land degradation with spectroscopic techniques. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 4886: 11–19.
- [4] Gao H J, Jiang Q G, Huo X B. Remote sensing research of sandy desertification along the great wall in northern Shanxi. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 471–475.
- [5] Zhang P M, Zhang Z D, Li X Q, *et al.* Desertification remote sensing information extraction from Qinghai-Tibet Plateau and evolution analysis. *Arid Land Geography*, 2006, 29(5): 710–717.
- [6] Bertiller M B, Ares J O, Bisigato A J. Multiscale indicators of land degradation in the Patagonian Monte, Argentina. *Environmental Management*, 2002, 30(5): 704–715.
- [7] Khan N M, Rastovskuev V V, Sato Y. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 2005, 77: 96–109.
- [8] Wang P X, Wan Z M, Gong J Y, *et al.* Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 527–533.
- [9] Silvia F, Steven A L, Stefania M, *et al.* Satellite-based indices in the analysis of land cover for municipalities in Siena province, Italy. *Journal of Environmental Management*, 2007, 86(2): 383–389.
- [10] Diodato N, Ceccarelli M. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators*, 2004, 4: 177–187.
- [11] Mohamed Ch, Ferdinand B, Amadou I B, *et al.* A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: Application to a semi-arid Mediterranean catchment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, (7): 140–153.
- [12] Wu J, He T, Cheng P G. Study on land degradation mapping by using hyperion data in HengShan Region of China. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 131–139.

- [13] Zeng Y N, Xiang N P, Feng Z D, Albedo-NDVI Space and Remote Sensing Synthesis Index Models for Desertification Monitoring. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1): 75—28.
- [14] Alejandro M A, Kenji O. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 309—324.
- [15] Ghulam A, Qin Q M, Zhu L J. 6S Model Based Atmospheric Correction of Visible and Near-Infrared Data and Sensitivity Analysis. *Acta Scicentiarum Naturalum Universitatis Pekinesis*, 2004, 40(4): 611—618.
- [16] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo 1 Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 213—238.
- [17] Pu R L, Gong P. *Hyperspectral remote sensing and its application*. Beijing: Higher Education Press, 2000.

参考文献:

- [2] 方洪宾, 张振德, 张佩民. 塔里木盆地周边地区土地退化的遥感研究. *国土资源遥感*, 2003, 56(2): 5~10.
- [4] 高会军, 姜琦刚, 霍晓斌. 陕北长城沿线沙质荒漠化遥感研究. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 471~475.
- [5] 张佩民, 张振德, 李小琴, 等. 青藏高原荒漠化遥感信息提取及演变分析. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 710~717.
- [8] 王鹏新, WAN Zheng-ming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527~533.
- [12] 吴剑, 何挺, 程朋根. 基于 Hyperion 高光谱数据的土地退化制图研究——以陕西省横山县为例. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 131~139.
- [13] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究. *地理科学*, 2006, 26(1): 75~82.
- [15] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正. *北京大学学报*, 2004, 40(4): 611~618.
- [17] 浦瑞良, 宫鹏. *高光谱遥感及其应用*. 北京: 高等教育出版社, 2000.