

基于线性光谱混合模型分解 MODIS 多光谱影像的研究

陆广勇^{1,3}, 杨勤科^{2,1}, 张少伟^{1,3}, 王海江^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北大学 西安 710127; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为了获取多时相的土地覆盖基础数据以支持区域土壤侵蚀定量评价, 基于线性光谱混合模型分解 MODIS 多光谱影像, 并对分解结果进行了定性、定量评价。结果表明, 结合像元年内植被指数变化特征, 基于线性混合像元分解, 可解译出耕地、林地、草地、裸地、水体、居民地等类型。分类结果与 2006 年 TM 分类结果的总体一致性为 64.46%, Kappa 系数为 0.519 9, 土地覆盖类型分类结果可靠; 各类端元估算误差基本小于 20%, 且与对应 TM 分类结果具有相关性, 总体精度较好; 林地端元能够较好地反映植被盖度信息。基于 LSM 分解 MODIS 影像可为区域环境研究提供可靠的土地覆盖类型图和植被覆盖信息。

关键词: 线性混合像元分解; 土地覆盖类型分类; MODIS; 精度评价

中图分类号: F205; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0010-05

Classification of MODIS Multispectral Images Based on Line Spectral Mixture Model

LU Guang-yong^{1,3}, YANG Qin-ke^{2,1}, ZHANG Shao-wei^{1,3}, WANG Hai-jiang^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100 China; 2. Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Soil erosion monitoring works require multi-temporal land cover data on a regional scale. This paper estimated the abundance of land cover components using MODIS09GA multispectral images based on linear spectral mixture model (LSMM) and assessed the accuracy. The results showed the overall accuracy of the final land cover map was 64.46%, and the Kappa coefficient was 0.519 9; the estimation error of the end-member fraction is less than 20% for most of land cover components. There is fine linear correlation between the abundance of land cover components and the classification of Landsat image. For the forest endmember, the linear correlation coefficient is 0.79. It is suggested that, for MODIS image, applying LSMM in land cover classification is feasible and is promising to extracting vegetation fraction.

Key words: linear spectral mixture analysis; land cover classification; MODIS; accuracy assessment

土地覆盖是指地球表面当前所具有的自然和人为影响形成的覆盖物, 土地覆盖数据库是全球或区域尺度研究的重要数据源, 而遥感是获取该数据的重要手段^[1]。遥感影像土地覆盖类型分类方法很多, 其中基于混合像元分解的分类方法能够达到亚像元级, 提供每个像元内基本组分所占比例, 比以像元为单位的常规遥感分类精度更高, 是资源环境研究的有效方法^[1-2]。Adams^[3]、Roberts^[4]、Small^[5]等将混合像元分解方法应用于 Landsat 影像土地覆盖类型; 而 Ridd^[6]、Small^[7]、Tooke^[8]、胡健波^[9]等基于混合像元

分解的端元丰度结果提取了影像像元的植被盖度, Jimenez-Munoz 通过比较研究指出该方法是土地覆盖分类的可行和有效方法^[10]。

但是, 区域土壤侵蚀评价中对土地利用和覆盖信息的提取大多都基于 Landsat 影像进行, 该影像往往会受云、影像周期较长等因素的影响而无法获取, 难以满足研究的需求。而中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 具有多通道、高时间分辨的特点, 研究应用前景广阔。虽然部分学者运用混合像元分解对 MODIS 光谱影像进行覆盖分类^[11]或者提取区域植被覆

收稿日期: 2011-02-28

修回日期: 2011-03-18

资助项目: 黄土高原水土流失数学模型 (第一期) 研发 (黄水保 200651-08)

作者简介: 陆广勇 (1985-), 男 (壮族), 广西贵港市人, 在读硕士研究生, 主要从事 GIS 应用和区域土壤侵蚀研究。E-mail: luguangyong16@163.com

通信作者: 杨勤科 (1962-), 男, 陕西省陇县人, 博士, 教授, 主要从事区域水土流失与 GIS 应用研究。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

盖信息^[12], 但混合像元分解 MODIS 多光谱影像的结果缺少定量验证, 特别是将分解的定量结果应用于较大区域土壤侵蚀研究还不够。本次实验在地形复杂区(黄土丘陵沟壑区)进行, 基于线性光谱混合模型分解 MODIS 光谱影像, 定性、定量分析其结果精度, 探讨该方法可行性, 进而为区域环境动态监测、土壤侵蚀评价提高时间分辨率的可靠土地覆盖基础数据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

延河流域地处陕北黄土高原中部, 地理位置为 $36^{\circ}23' - 37^{\circ}17' N$ 和 $108^{\circ}45' - 110^{\circ}28' E$, 面积约 $7\ 684\ km^2$ 。该流域属暖温带大陆性半干旱季风气候, 年平均气温 $9^{\circ}C$ 左右, 年均降雨量为 $500\ mm$ 左右, 其中 7–9 月份降雨量占全年降雨量的 60% 以上。流域植被区划上属于森林草原地带。由于严重的土壤侵蚀, 土壤类型以黄土母质上发育的黄绵土为主, 土壤质地均一, 土质疏松, 抗侵蚀能力差。流域内沟壑纵横, 地形复杂, 植被覆盖率低, 属典型黄土丘陵沟壑区^[12-13]。

1.2 数据源与数据处理

1.2.1 数据源

(1) NASA USGS 提供的地表反射率产品数据 MOD09GA, 该产品影像周期为 1 d, 空间分辨率约为 $500\ m$ ^[14]。影像获取时间为 2006 年 9 月 9 日, 共 7 个波段, 但第五波段存在坏线, 故本实验使用了 MODIS 的 1–4、6–7 共 6 个波段的影像。

(2) 2006 年 9 月 10 日成像的 Landsat TM 5 图像解译生成的 2006 年土地覆盖类型图(简称 LU 06)和矢量化的 2000 年延河流域土地利用图(简称 LU 2000)。

(3) DEM 是利用 1:5 万地形图和 ANUDEM 软件生成的 $10\ m$ 分辨率 DEM, 用以空间配准。

(4) 本文采用 NASA USGS 提供的植被指数数据产品 MOD13Q1 的归一化植被指数 MODIS–NDVI, 空间分辨率为 $250\ m$, 产品合成周期为 16 d。时间从 2006 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 30 日, 共 23 期影像。

1.2.2 数据预处理

(1) 以 DEM 为基准, 在 ENVI 系统下, 利用二次多项式模型对 TM 影像进行空间配准, 均方根误差为 0.48, 满足配准误差小于 1 个像元要求, 然后利用 ISODATA 法对配准后的 TM 影像非监督分类, 得到 LU 06。

(2) 利用 MRT 软件对 MOD09GA 进行重新投影, 获取各单波段信息, 然后采用与 TM 一样的配准

方法, 以配准后的 TM 5 影像为基准, 对 MOD09GA 空间配准, 配准均方根误差为 0.29, 满足空间配准要求。

(3) 利用 TM 5 对 MODIS–NDVI 进行空间配准, 均方根误差小于 1。基于 HANTS 对 MODIS–NDVI 时序影像进行平滑处理^[15], 获取各个像元特征值: 年内最大值 Max, 4–10 月内各个像元 NDVI 的极值之差 GDd 和最小值 GDM in^[12]。不同的土地覆盖类型具有不同的植被时间序列曲线特征, 本实验基于年内 NDVI 值变化特征区分林地与川耕地、草地与坡耕地^[16]。

1.3 线性混合像元分解

目前, 许多研究者发展了众多混合像元分解模型^[2]。其中线性光谱混合模型(LSMM, Linear Spectral Mixture Model)具有一定的理论依据、实验验证基础和一定的精度保证, 操作运算较简单、便利而被广泛应用, 并且是针对不同的应用领域可行性总体最好的一种模型^[1-2]。因此本次实验选择线性光谱混合模型进行混合像元分解。

线性光谱混合模型 LSMM 是指像元在某一光谱波段的光谱反射率, 是由构成像元的基本组分(端元)的反射率以其所占面积比例为权重系数的线性组合。全约束性 LSMM 可表示为^[1, 17]:

$$\begin{cases} R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} r_{k\lambda} + \varepsilon_{\lambda} \\ \sum_{k=1}^m f_{ki} = 1 \end{cases} \quad 0 \leq f_{ki} \leq 1 \quad (1)$$

式中: $R_{i\lambda}$ ——第 λ 波段第 i 像元的光谱反射率; $r_{k\lambda}$ ——对应于 i 像元的第 k 个端元的反射率; f_{ki} —— i 像元内第 k 个端元组分的丰度; ε_{λ} ——残余误差值; n ——端元的数目。方程组(1)中, $r_{k\lambda}$ 从实验训练中获取, $R_{i\lambda}$ 为已知项, 利用最小二乘法进行求解, 得到端元组分的丰度 f_{ki} 。

LSMM 中端元组分的确定是混合像元分解成败的关键^[1, 18], 端元组分的数量应该不大于像元波段数, 如何选择纯净的像元作为端元是最重要的一个步骤。本实验通过对多光谱影像进行最小噪声分离变换 MNF(MNF 本质上是两次层叠的主成分变换)分离噪声, 基于 MNF 组分图进行纯净像元指数(PPI)计算, 确定可能是纯净像元的像元集^[19]。然后参考对应的 TM 5 土地覆盖类型图, 基于 MNF 组分的二维散点图, 最终确定各种端元对应的纯净像元^[7, 20-21]。各类端元对应像元(每类选择 6–20 个像元)的反射率均值作为该类端元的反射率^[20]。根据研究区域土地覆盖类型特点, 本次实验基于 MODIS 影像选择 5 种端元: 林地端元、草地端元、裸地、水体、

居民地。本试验中,林地与川耕地的光谱特征相似,难以区分,而研究区域内川耕地比例很小,所以本次实验林地端元代表了林地与川耕地两种覆盖类型。延河流域为典型的丘陵沟壑区,地形复杂,斑块破碎,在 500 m 分辨率的 MODIS 影像上,草地与坡耕地混合现象严重,光谱特征较为相近,故本次实验将草地和坡耕地合并为一种端元(草地端元)进行线性分解。各类端元的光谱反射率特征曲线如图 1 所示。

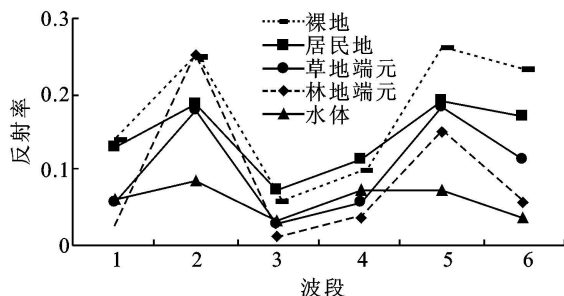


图 1 光谱特征曲线

2 结果与分析

本实验利用 IDL 语言编写程序进行混合像元分解。基于 LSM 分解结果进行土地覆盖类型分类,像元内丰度最大的端元即为该像元的覆盖类型。影像的空间分辨率约为 500 m,延河流域地形复杂,斑块破碎,像元混合现象严重,草地与坡耕地难以区分,实验结果中草地端元包含草地和坡耕地,林地端元包含林地和川耕地。

为了与参考数据进行有效对比、验证,本次实验应用 MODIS-NDVI 影像的特征值 (Max 、 GDd 、 $GDMin$) 对 LSM 分类结果中的林地端元类型和草地端元类型分别进行再分类。林地覆盖类型年内植被指数值 ($NDVI$) 都比较大;耕地像元的 $NDVI$ 值呈季节性波动变化,存在明显的波峰、波谷;而草地虽然其像元的 $NDVI$ 随季节而波动变化,但其最大值(峰值)一般比较小,生长期变化相对较小^[12,16]。本次实验中,林地端元类型范围内 $Max \geq 0.4$ 且 $GDMin \geq 0.35$ 的像元划分为林地,其余的林地端元像元划归为川耕地;而草地端元类型范围内 $Max \geq 0.4$ 且 $GDd \geq 0.35$ 的像元划为坡耕地,其余的草地端元像元为草地覆盖类型。最后形成林地、川耕地、草地、坡耕地、裸地、水体和居民地共 7 种土地覆盖类型的影像分类结果。

2.1 分类结果空间格局与数量统计分析

附图 1 为基于 LSM 进行像元分解的结果。丰度图中颜色越深表示对应端元在混合像元的面积比重(丰度)越大,颜色越淡表示端元丰度越小。林地端元类型分布由南往北逐渐减少;草地端元类型遍布整个流域,总体上流域中、上游的丰度大于下游;裸地主

要分布在流域西北角;水体大致沿沟道分布,但水体类型中包含了一定的阴影;居民地沿沟道分布,具有一定的线性纹理,但在西北角区存在一定的错分。

均方根误差 RMSE 是评价 LSM 模型的一个重要指标,本实验的总均方根误差为 0.019。RMSE 图显示,除了流域南部边界和西北角部分误差较大,其它地区误差呈随机分布。流域内, RMSE 值小于 0.01 的像元占流域面积 54.1%,小于 0.025 的像元占 95.4%,而小于 0.035 的像元超过了 99%,表明 LSM 混合像元分解效果整体良好。

2.2 结果精度评价

本次实验从两方面进行精度评价,主要包括分类结果评价和端元丰度定量评价。

(1) 分类结果评价。影像分类结果如附图 2 所示。本实验选择 2006 年基于 TM 的土地覆盖分类图 LU06 作为标准,参考 LU2000 进行分类精度评价。基于 ENVI 4.7 软件,按覆盖类型随机选择林地、川耕地、草地、坡耕地、裸地和居民地共 529 个像元作为验证,占总流域面积约 1.6%。分类结果中林地占 35.5%,川耕地占 3.6%,草地占 47.0%,坡耕地占 12.3%,裸土占 1.2%,水体和居民地所占比重很小。该结果与谢红霞研究结果较为一致^[13]。覆盖类型分类误差如表 1 所示,分类结果与 LU06 的一致性为 64.46%, Kappa 系数为 0.519 9,表明分类结果整体较好。林地端元和草地端元分解精度最好,水体次之,裸地最差。分类结果中,林地存在高估的现象,部分耕地(坡耕地、川耕地)被错分为林地,这是分类结果中耕地类型比例偏低的主要原因。草地与林地、耕地之间存在一定的混分,难以选择具有代表性的候选像元作为草地端元是一个重要的原因;裸地易与草地混分,这与稀疏草地和裸地光谱较为相似有很大关系;居民地容易与其它类别混合,居民地面积小、类型内同物异谱的现象较普遍等是重要的影响因子。

(2) 端元丰度精度定量评价。利用 LU06 对应验证区域内各覆盖类型所占面积百分比作为真值,对 LSM 分解结果进行定量评价。如表 2 所示,各个覆盖类型超过 70% 的像元估算误差在 20% 以内,其中裸地、水体和居民地的误差相对较小,这与其占流域面积少、涉及验证像元有一定的关系;约一半的像元林地丰度估算误差小于 10%,小于 20% 的像元达 76.56%。

林地端元丰度与反映植被生长状况及植被覆盖度最佳指示因子的影像植被归一化植被指数 $NDVI$ 相关性很高^[1,18], R^2 高达 0.76,说明林地端元丰度能够充分反映植被覆盖信息。同时,林地端元验证散点

图(图 4) 显示, 虽然林地端元丰度估算总体略为偏低, 但是它与 LU06 真值具有较好的相关性, 相关系数 R^2 约为 0.62。

表 1 误差矩阵表

| 参考图像 | 被评价的图像 | | | | | | | 总和 | 制图精度/% |
|------|--------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|--------|
| | 林地 | 川耕地 | 草地 | 坡耕地 | 裸地 | 水体 | 居民地 | | |
| 林地 | 124 | 1 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 146 | 84.93 |
| 川耕地 | 24 | 15 | 51 | 3 | 1 | 0 | 3 | 97 | 15.46 |
| 草地 | 12 | 0 | 140 | 9 | 3 | 0 | 1 | 165 | 84.85 |
| 坡耕地 | 17 | 1 | 17 | 48 | 5 | 0 | 0 | 88 | 54.55 |
| 裸地 | 0 | 0 | 5 | 0 | 3 | 0 | 0 | 8 | 37.50 |
| 水体 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 6 | 83.33 |
| 居民地 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 5 | 6 | 19 | 31.58 |
| 总和 | 180 | 17 | 237 | 60 | 15 | 10 | 10 | 529 | |

近 71% 的像元草地端元丰度估算误差处于 20% 以内, 估算精度总体良好; 但其与 LU06 草地参考值的线性相关分析中两者相关系数仅约为 0.59, 且出现整体高估的现象, 这与表 2 估算误差大于 25% 的像元占流域面积近 20% 相一致。而裸地、水体和居民地 3 种端元丰度与 LU06 的相关系数分别为 0.49, 0.12, 0.67。以上 4 类端元的估算精度相对于林地较差, 见图 2。

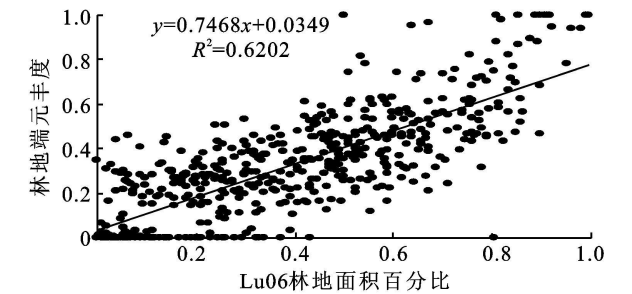


图 2 林地端元验证散点图

表 2 误差等级汇总表

| 类型 | 误差等级/% | | | | | | |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 林地端元 | 7.94 | 24.01 | 48.58 | 64.27 | 76.56 | 84.69 | 91.87 |
| 草地端元 | 5.67 | 21.36 | 41.59 | 57.47 | 71.08 | 79.77 | 86.96 |
| 裸土 | 12.29 | 33.65 | 52.55 | 73.16 | 85.07 | 93.57 | 97.16 |
| 水体 | 6.43 | 59.74 | 88.85 | 95.65 | 97.35 | 98.30 | 98.68 |
| 居民地 | 14.74 | 73.16 | 85.82 | 91.87 | 95.84 | 97.16 | 97.73 |

综上所述, 大部分类型丰度的估算误差都小于 20%, 各种端元类型的估算精度存在差异, 林地端元丰度估算精度最好, 居民地、草地次之, 然后是裸地, 水体分解精度不太理想。

3 结论

(1) 结合 MODIS-NDVI 影像, 基于线性光谱混合模型的端元丰度, 对 MODIS 多光谱影像进行土地覆盖类型分类, 其结果与 TM 影像分类结果总体一致性为 64.46%, Kappa 系数为 0.519 9, 且各类型端元

估算误差大部分小于 20%。结合年内像元植被指数变化特征, 应用线性光谱混合像元分解方法, 可使解译的类型达到 7 类, 包括林地、川耕地、草地、坡耕地、裸地、水体、居民地。表明该分类方法在延河流域 MODIS 影像土地覆盖类型分类应用中有效且现实可行。然而黄土丘陵沟壑区地形复杂, 景观斑块破碎, MODIS 遥感影像数据分辨率较粗, 这是分类精度较低的重要影响因素。

(2) 林地端元丰度与影像自身的 NDVI 指数、TM 影像土地覆盖类型分类结果都具有很强的相关性, 能够较好地反映植被覆盖状况, 表明基于混合像元分解 MODIS 影像提取区域植被盖度是一种现实、可行的方法。而 MODIS 影像成像周期仅为 1 d, 因此基于该方法提取植被覆盖信息可以为区域环境研究、土壤侵蚀动态监测提供多时相的、可靠的基础数据。

(3) 定量验证表明, 各类型丰度估算整体较好, 与 TM 影像分类结果存在一定的相关性, 但各种覆盖类型精度存在差异, 且丰度存在一定的系统偏差, 在实际研究应用中应该要慎重。同物异谱、异物同谱和影像端元不够“纯净”是重要的影响因素。如 100% 草地覆盖的像元在 MODIS 很难找到, 草地端元中掺杂部分裸地、坡耕地, 这是草地丰度被高估的一个重要因素。又如, 水体和阴影光谱特征较为相似, 且流域内水面相对较小, 在 MODIS 影像水体多为混合像元, 端元选择比较困难, 这是水体丰度估算精度最低的主要影响因子。

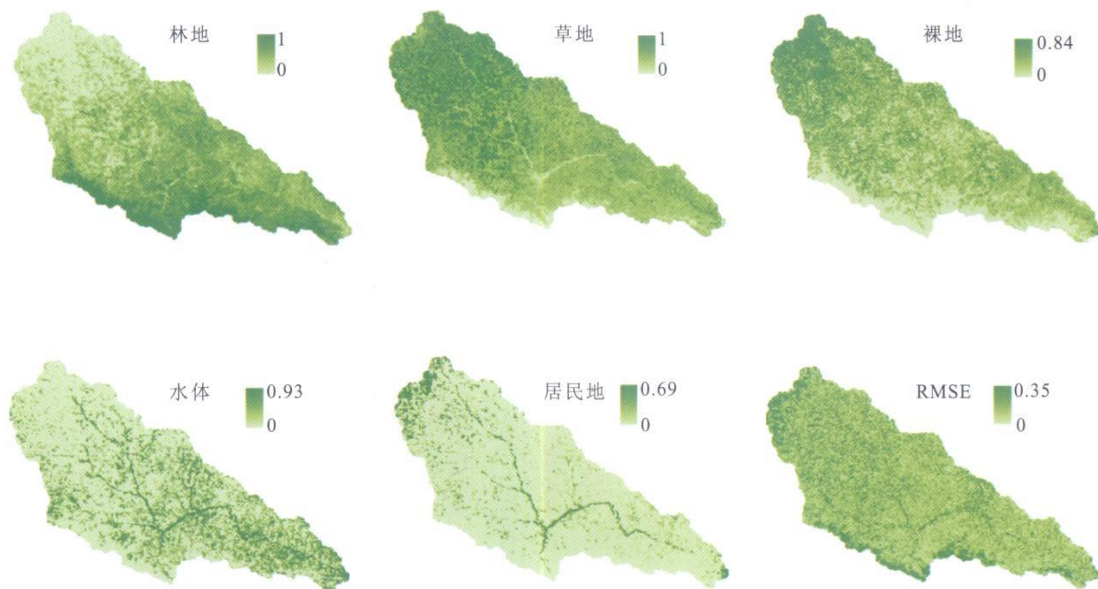
参考文献:

[1] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

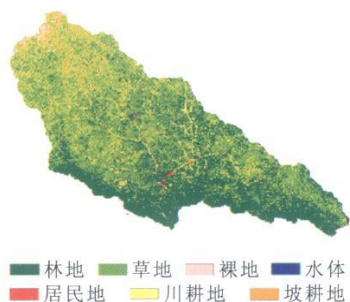
[2] Ichoku C, Karnieli A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation[J]. Remote Sensing Reviews, 1996, 13(3): 164-186.

[3] Adams J B, Sabol D E, Kapos V, et al. Classification of

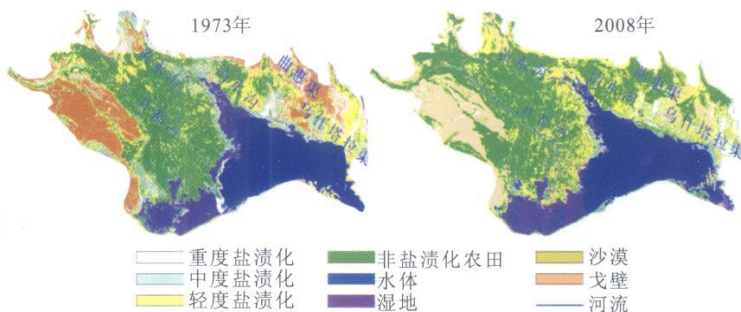
- multispectral images based on fractions of end-members: application to land-cover change in the Brazilian Amazon [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(2): 137-154.
- [4] Roberts D A, Gardner M, Church R, et al. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 267-279.
- [5] Small C. A global analysis of urban reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(4): 661-681.
- [6] Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote-sensing-comparative anatomy for cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [7] Small C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7): 1305-1334.
- [8] Tooke T R, Coops N C, Goodwin N R, et al. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 398-407.
- [9] 胡健波, 陈玮, 李小玉, 等. 基于线性混合像元分解的沈阳市三环内城市植被盖度变化 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1140-1146.
- [10] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A, Plaza A, et al. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: a case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area [J]. *Sensors*, 2009, 9(2): 768-793.
- [11] Kumar U, Kerle N, Ramachandra T V. Constrained linear spectral unmixing technique for regional land cover mapping using MODIS data [C] // *Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*. Netherlands: Springer, 2008: 416-423.
- [12] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 不同土地利用方式对黄土高原植被覆盖季节变化的影响: 以陕北延河流域为例 [J]. *第四纪研究*, 2005(6): 762-769.
- [13] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [14] U. S. Department of the Interior/U. S. Geological Survey. Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m [EB/OL]. [2010-12-20]. https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/surface_reflectance/daily_l2g_global_1km_and_500m/mod09ga.
- [15] Roerink G, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911-1917.
- [16] 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167-172.
- [17] 赵英时. 美国中西部沙山地区环境变化的遥感研究 [J]. *地理研究*, 2001(2): 210-219.
- [18] 宋现锋, 段峥, 牛海山, 等. 土壤侵蚀模型中植被管理因子的遥感估算 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(3): 58-63.
- [19] Boardman J, Kruse F, Green R. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data [C] // *Citeseer. 5th Annual JPL Airborne Earth science Workshop Jet Propulsion Laboratory*. Pasadena, CA: JPL Pub., 1995.
- [20] De Asis A M, Omasa K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of landsat ETM data [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 309-324.
- [21] De Asis A M, Omasa K, Oki K, et al. Accuracy and applicability of linear spectral unmixing in delineating potential erosion areas in tropical watersheds [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4151-4171.
- (上接第 9 页)
- [11] United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission [EB/OL]. [2009-10-21]. http://edc.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/SRTM
- [12] 程根伟, 舒栋才. 水文预报的理论与数学模型 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [13] 孔凡哲, 李莉莉. 利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定 [J]. *水电能源科学*, 2005, 23(4): 65-67.
- [14] 杨邦, 任立良. 集水面积阈值确定方法的比较研究 [J]. *水电能源科学*, 2009, 27(5): 11-14.
- [15] 芮孝芳. 水文学原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 18-43.
- [16] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [17] 冯平, 冯焱. 河流形态特征的分维计算方法 [J]. *地理学报*, 1997, 52(4): 324-330.
- [18] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义 [J]. *地理科学*, 1996, 16(2): 124-128.
- [19] 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究 [J]. *地震地质*, 1994, 10(4): 429-439.
- [20] Huang W C, Yang F T. Streamflow estimation using Kriging [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34: 1599-1608.
- [21] 王博, 田富强, 胡和平. 基于分维的水系发育程度与气候特征关系 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, 49(12): 1948-1953.



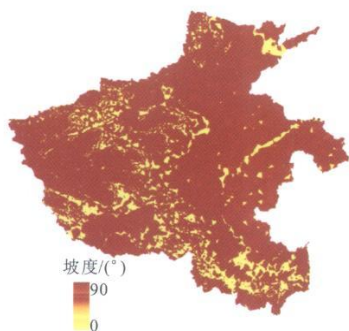
附图1 延河流域不同土地覆盖类型的丰度图和均方根误差RMSE



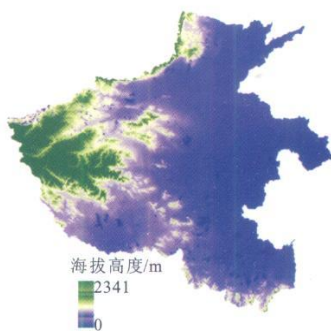
附图2 延河流域土地覆盖类型图



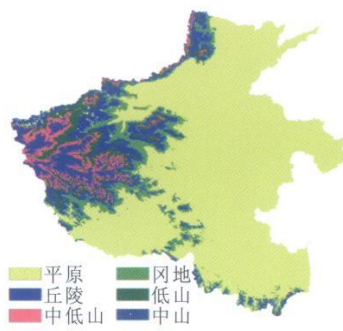
附图3 1973年 Landsat MSS与 2008年 CBERS影像分类图



附图4 河南省坡度图



附图5 河南省海拔高度图



附图6 河南省地势图