

基于线性光谱分离技术的西藏乃东县 土地覆被变化监测

戴尔阜^{1,2}, 吴卓^{1,2,3}, 芦海花⁴, 付华⁵

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 山西省太原市第二实验中学, 太原 030024; 5. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 青藏高原是全球气候变化研究关注的热点地区, 也是中国生态保护的重点区域, 其土地覆被变化研究对优化土地利用结构、改善土地覆被状况和生态环境具有重要意义。线性光谱分离技术是利用遥感手段监测土地覆被变化的有效方法。本文选取西藏乃东县为研究区, 利用1988、2000和2010年三期 Landsat TM、ETM 遥感影像, 采用线性光谱分离技术, 定量提取了研究区三期影像中单个像元的植被、裸土、裸岩覆被率比例, 同时将植被分量与NDVI结果进行对比分析。结果表明: ①研究区山峦重叠, 沟谷纵横, 地表破碎, 混合像元比例高, 线性光谱分离技术可以很好地处理复杂地物的土地覆被变化; ②1988-2010年间, 研究区裸土面积下降幅度较大, 植被覆盖率及裸岩覆盖率有所上升, 说明本区植被得到一定的恢复, 但同时石漠化也在进一步加剧; ③通过对线性光谱分离的植被分量与NDVI结果比较, 发现线性光谱分离技术对青藏高原土地覆被识别具有较好的适用性。

关键词: 土地覆被变化; 线性光谱分离; 植被; 裸土/裸岩; 乃东县

1 引言

土地覆被变化是人类活动与自然过程对地球陆地表层共同作用的结果, 同时也是土地利用/土地覆盖变化(LUCC)计划的3个重点领域之一(Turner et al, 1995), 全球土地计划(GLP)也明确指出, 要探究生物物理控制的土地覆盖与土地演化动态的关系, 从而弄清陆地上人类—环境耦合系统变化的原因、结构及性质(Moran et al, 2005)。随着土地覆被变化研究的深入, 在适当的时空尺度监测土地覆被变化, 评估土地动态的综合结果已成为新时期土地变化研究的重点方向(Müller et al, 2014)。其中, 遥感手段已经逐渐成为监测土地覆被变化最直接有效的方法。传统的遥感手段探测区域土地覆被变化的方法主要有“土地利用/覆被分类法”和“植被指

数法”, 这两种方法在使用过程中存在着一定的局限性。如利用遥感手段监测土地覆被变化分析的精度受影像分辨率的限制, 同时也与地表状况密切相关(万军等, 2003)。随着传感器波段的增多, 以及时间分辨率的提高, 遥感应应用领域不断扩展及定量化应用水平不断深化, 逐步发展到了光谱遥感分析的新阶段(曹入尹等, 2008; 岳跃民等, 2008; 张飞等, 2012)。如赵振亮等(2014)利用光谱遥感分析方法对新疆典型绿洲进行了土壤特征分析与盐渍化信息提取, 研究结果精度评价较好, 具有重要的科学价值; 林川等(2013)基于光谱特征变量对北京野鸭湖湿地植物生态类别进行了识别, 并取得了较高的识别精度; 罗海江(2013)基于遥感数据量化了北京城乡的植物物候差异, 揭示了人类活动对植物物候周期的影响。随着遥感数据的广泛应用, 对数据

收稿日期: 2014-11; 修订日期: 2015-04。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB452702, 2012CB416906); 国家科技支撑计划项目(2013BAC03B04); 国家自然科学基金项目(41371196)。

作者简介: 戴尔阜(1972-), 男, 甘肃静宁县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为自然地理综合研究、气候变化及其区域响应、土地利用变化模拟, E-mail: daief@igsrr.ac.cn。

引用格式: 戴尔阜, 吴卓, 芦海花, 等. 2015. 基于线性光谱分离技术的西藏乃东县土地覆被变化监测[J]. 地理科学进展, 34(7): 854-861. [Dai E F, Wu Z, Lu H H, et al. 2015. Linear spectral unmixing-based method for the detection of land cover change in Naidong County, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Progress in Geography, 34(7): 854-861.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.07.007

的处理与分析也提出了越来越高的要求。其中线性光谱分离技术是处理多光谱遥感影像比较实用的方法,并已在多方面显现出易于实施和适应性强等特点。例如,在缺乏地面观测资料的情况下,周斌(2000)和马超飞等(2001)利用线性光谱分离技术可以直接计算植被覆盖率,进而用于通用土壤流失方程计算水土流失;刘珍环等(2011)在研究深圳市不透水表面指数的城市地表覆被特征中,利用线性光谱分离技术对遥感影像进行了处理与解译,结果表明该方法具有很好的适应性。张志新等(2011)应用改进的线性光谱分离模型对广州市1988-2009年植被覆盖度进行遥感监测,克服了时空差异所造成的误差,实现了多时相对比研究。

中国青藏高原地区山峦重叠,沟谷纵横,地表破碎,独特的自然地理环境使得在该地区进行土地覆被野外监测面临很多困难,从而造成了该地区地面实测资料相对缺乏,而利用线性光谱分离技术可以较直接地对植被、裸土和裸岩覆被进行定量评价,与其他遥感数据处理方法相比较具有信息分离快且操作简便等特点。因此,本文选择西藏乃东县为研究区,利用1988、2000和2010年三期多波段的TM及ETM影像,应用线性光谱分离技术,研究乃东县的土地覆被状况变化,旨在探讨线性光谱分离技术在青藏高原地区土地覆被变化监测中的适用性。此外,研究结果可为该县土地利用合理规划、生态系统的结构改善、功能提升和区域社会、经济、生态可持续发展提供科学参考。

2 研究区域

研究区乃东县位于西藏山南地区北部,91°32′~92°01′E、28°44′~29°36′N之间,县域面积2213.53 km²,属高原温带半干旱季风气候区。太阳辐射强,日照时间长,年平均气温7.5℃,最冷月(1月)平均气温-2.2℃,最暖月(6月)平均气温15.5℃,气温年较差较小,日较差较大。降水主要集中在6-9月,降水量为409.8 mm,占全年降水量的92%。研究区位于藏南宽谷湖盆地带的雅鲁藏布江中游区,处于西藏“一江”两河地区(图1)。该地区是西藏重要的农业区,生态系统脆弱,植被覆盖以草本植物为主。在环境退化的背景下,政府制定了人工造林、种草等重要开发项目,改变了该区的土地覆被。然而受地形等自然要素的限制,通过实地调查方式获取该区域土地覆被变化数据具有很大难度。因此,本文基

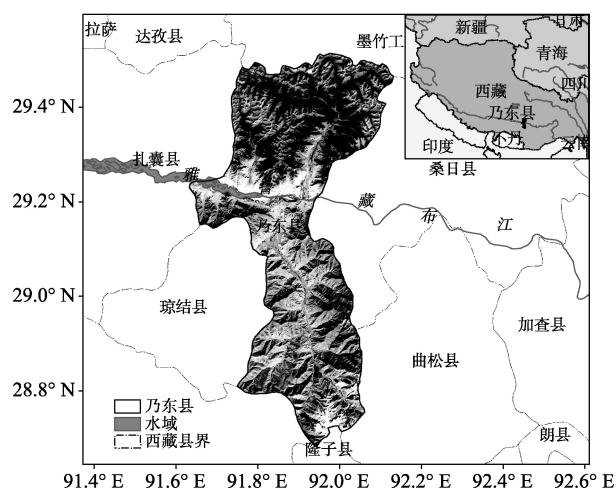


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the research area in Tibet

于遥感影像,采用线性光谱分离技术进行土地覆被变化研究。

3 研究方法

3.1 线性光谱分离技术

混合像元分离处理过程需要利用地物光谱的混合模型。地物光谱混合模型主要有5种:线性(Linear)模型、概率(Probabilistic)模型、几何光学(Geometric-optical)模型、随机几何(Stochastic Geometric)模型和模糊分析(Fuzzy)模型(Ichoku et al, 1996)。以上各混合像元分解模型都能够进入像元内部估计亚像元的比例,比以像元为单元的常规遥感分类精度更高,其中又以线性模型应用最为广泛。线性光谱分离技术是基于线性模型的遥感分析技术,它可以根据地物的波谱特征,获取多光谱图像中的地物丰度信息,是探测区域土地覆被状况的有效工具。线性光谱混合模型由于算法简单、操作方便,并且具有一定的实验验证基础和精度保证,因而广泛地应用于光谱数据分析和遥感地物量化(赵英时等, 2003)。加上近年来在终端单元提取中融入空间信息算法、顶点成分分析(VCA)、自动提取形态端元(AMEE)等,使得该技术逐渐成熟(Plaza et al, 2011; Somers et al, 2012)。

遥感影像像元特征是地表不同地物反射光谱的综合反映。在地物单元面积较大的情况下,可以认为到达传感器的光子只与唯一的地物发生作用,这种单一的地物则被称为“终端单元(Endmember)”,其余影像像元值为终端单元光谱反射值的线

性组合(万军等,2003)。在实际操作中,消除了大气和其他技术因素的影响后,影像像元值可以认为是裸土、裸岩、水体、植被、植被的阴影等的混合反射(Hill et al, 1998),以构成像元的终端单元所占像元的面积比例为方程系数,构建终端单元的光谱亮度值线性方程,通过求解线性方程来确定每类地物的丰度。因此可以用如下公式表示:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^n F_{ki} C_{kj} + \varepsilon_{ij} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: R_{ij} 为第 j 个波段第 i 个像元的光谱反射率(已知), F_{ki} 为对应于 i 个像元的第 k 个终端单元所占的分量值(待求); C_{kj} 为第 k 个终端单元在第 j 个波段的光谱反射率; ε_{ij} 为残余误差值; n 为终端单元的数目。

通过求解线性方程得到终端单元在所在像元中占面积比例,从而将所有像元分解成这些终端单元的分量。通过像元分解计算,最终可以得到各终端单元的分量值和以均方根误差表示的残余误差图像。本文应用专业遥感处理软件ENVI 4.2进行线性光谱分离操作,主要操作步骤包括:数据预处理、主成分分析(PCA)、终端单元的收集、线性光谱分离、结果检验与校正等。

3.2 线性光谱分离过程

应用线性光谱混合模型(LSMM)对数据进行分析时,终端单元的类型、数量以及光谱值大小选择是准确划分地表覆被类型的关键。在波段选择上,本文选取除第6波段外的其他6个TM波段进行线性光谱分离分析。由于河流、湖泊等水体仅反映影像的局部特征,为了减少线性光谱模型求解变量,本文中将水体作为无效的终端单元,将三期影像中的水体去除。我们采用 TM_2/TM_3 方法来提取影像的水体,这是因为水体在 TM_3 范围内对红外波段吸收强,而且与其他地物类型相比,水体的 TM_2 波段的反射值要明显高于 TM_3 波段的反射值。利用上述方法,再经过多次选取试验样本可以确定水体提取阈值,最终提取出水体。在随后的线性光谱混合分解过程中,选择已经去除了水体的影像作为图层,直接对其他影像部分进行混合模型分解。

在确定像元终端单元时,本文选择主成分分析(PCA)方法。经过主成分分析后,TM影像6个波段中的有效信息主要集中于第一(PC1)和第二(PC2)两个主成分分量上,其累计信息量分别占1988、2000和2010年6个波段总信息量的99.20%、98.92%和

99.71%。在1988、2000和2010年的PC1和PC2主成分的散点分布图上,不同类型的地物明显分布于不同的区域(图2),为终端单元候选样本的选择和确定提供了条件。由图2可见,1988、2000和2010年的散点图均呈星型分布,顶端分别对应遥感影像上的裸土、裸岩、植被。把上述地物组分别作为初选的终端单元进行LSMM分析,结果表明RMS(Root Mean Square)误差较大。这说明初选的终端单元尚不能完全表达该区域内典型的地物信息,需要对终端单元进行追加。根据RMS最小,各地物空间分布值在0~1之间的原则,并参考该区域土地利用、土地覆被现状图,在上述LSMM分解所得的误差图像上,对误差集中的区域进行二次终端单元确定。最终确定了裸土、裸岩、植被和阴影4个终端单元用于LSMM分析。

终端单元在各波段上取值是影响结果精度的重要因素。为了保证线性光谱分离结果的准确,提高分类精度,将PC1和PC2散点图中的三类终端单元分布区作为样本选取区域,对每类终端单元选择30~40个像元进行重复取样,将样点值平均得到每类终端单元在各波段上的取值。1988、2000和2010年LSMM分析的终端单元各波段的取值见表1。

4 结果与分析

4.1 线性光谱分离结果

终端单元的类型、数量以及光谱值大小确定后,利用线性混合光谱模型分别对1988、2000和2010年的图像进行混合像元分解。我们得到裸土、裸岩、植被和阴影四幅终端单元丰度图和一幅RMS误差图像。其中,植被丰度图像主要反映了区域内不同环境条件下的林草地、耕地、草地的分布。植被丰度图中河谷低地周围的亮度区主要为农耕地,

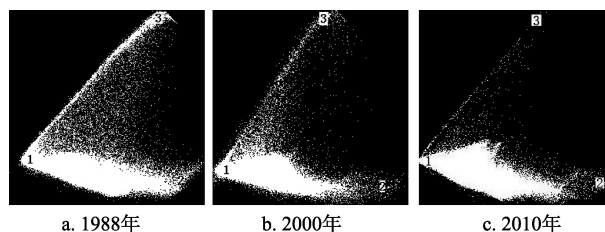


图2 1988、2000和2010年主分量散点图

(1-裸土;2-裸岩;3-植被)

Fig.2 Scatter Plots of PCA in 1988, 2000, and 2010
(1-Bare soil, 2-Rock, 3-Vegetation)

表1 1988、2000和2010年终端单元采样均值表

Tab.1 Mean values of the samples of endmembers in 1988, 2000, and 2010

波段	终端单元											
	裸土			裸岩			植被			阴影		
	1988年	2000年	2010年	1988年	2000年	2010年	1988年	2000年	2010年	1988年	2000年	2010年
TM ₁	0.16	0.06	0.08	0.21	0.19	0.18	0.36	0.55	0.43	0.05	0.07	0.03
TM ₂	0.23	0.12	0.11	0.34	0.31	0.30	0.81	0.61	0.67	0.03	0.06	0.04
TM ₃	0.32	0.19	0.16	0.50	0.45	0.44	0.71	0.57	0.61	0.03	0.05	0.05
TM ₄	0.37	0.36	0.35	0.54	0.54	0.54	0.88	0.86	0.82	0.02	0.06	0.06
TM ₅	0.58	0.57	0.57	0.67	0.72	0.69	0.08	0.06	0.03	0.04	0.07	0.06
TM ₇	0.58	0.40	0.61	0.62	0.60	0.60	0.05	0.05	0.05	0.02	0.06	0.06

呈条块状分布,其他亮度区为林草地分布区。裸岩丰度图的亮度区主要集中在乃东县山地周围,其丰度图像更多地反映该区的土地退化状况。裸土丰度图上较亮的区域主要集中在与植被镶嵌的区域。阴影丰度图上高亮度区域主要分布在山区。RMS误差图像主要表现了由于大气状况和遥感传感器等造成的随机噪声误差。

表2显示:1988-2010年,除去无法解译的阴影部分,研究区裸土覆被率有较大幅度的下降,下降幅度达7.78%;裸岩比例上升了4.51%。表明研究区整体水土流失量在下降,水土保持工程初见成效,但局部地区的水土流失造成的石漠化也在增加。同时,植被覆盖率有一定上升,增加了3.58%,说明研究区的草地、林地保护与恢复措施效果明显。

4.2 土地覆被状况变化原因

根据以上数据结果,将土地覆被变化原因分析如下:

(1) 1988-2010年,研究区植被覆被面积有所增加,增加了3.58%。其主要原因是1991年政府制定并开始实施西藏“一江两河”地区农业综合开发十年规划(兰志明等,2000),其主要目的之一就是改善地区的农业生态环境。针对区域土地退化,实施了

植树造林、改良草场等大量生物工程技术措施(边多等,2001)。其中河谷平原是近年来变化最明显的地区,大量的生物工程措施使很多地段的天然植被为人工植被所取代,土地利用程度和植被覆盖度明显提高。

(2) 研究区裸土覆被率幅度有较大幅度的下降,而水土流失与土壤裸露程度密切相关,随着植被覆盖率的增加,土壤裸露程度有所降低(降低了7.78%)。表明在实施农业综合开发十年规划期间,当地植树造林和植被恢复已经取得较明显的效果,有利于研究区的水土保持。同时,对危及农业发展的风沙、水土流失等灾害的控制将起到极大作用。

(3) 裸岩覆被面积有明显上升,其中裸岩比例上升4.51%,水土流失造成的石漠化面积也在明显增加。研究区植树造林,改良草场等生物工程措施主要在人类活动比较集中、地势比较低平的河谷地带进行,人类对于难以利用的山地和坡地的覆被则很少关注。然而在山地坡度较大的草地上,自然条件恶劣,草被盖度很低,在高原温带半干旱季风的影响下,非常容易发生水土流失,导致基岩裸露,石漠化程度加剧。此外,许多地段土壤已经出现流失殆尽,即使土壤流失正在减少的地段,也在形成新的裸岩地。

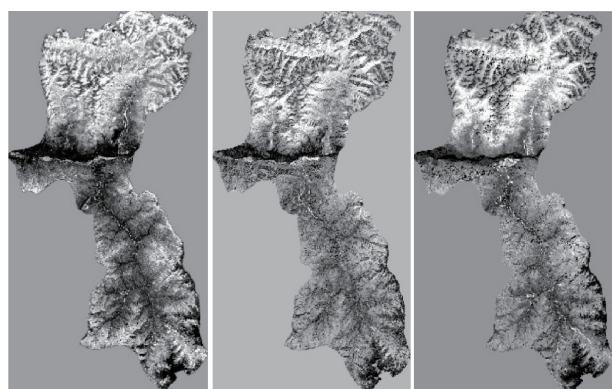
4.3 线性光谱分离技术适应性

一般认为,归一化植被指数(NDVI)可以有效探测区域植被覆盖状况。本文将线性光谱分离的植被分量与NDVI结果进行了比较,其中NDVI数据通过对1988、2000和2010年TM及ETM遥感影像波段运算后得到(图3)。从图3中可以看出,两者具有良好的相关性,在置信度 $\alpha=0.99$ 的情况下选择样本分析,其相关系数分别为:

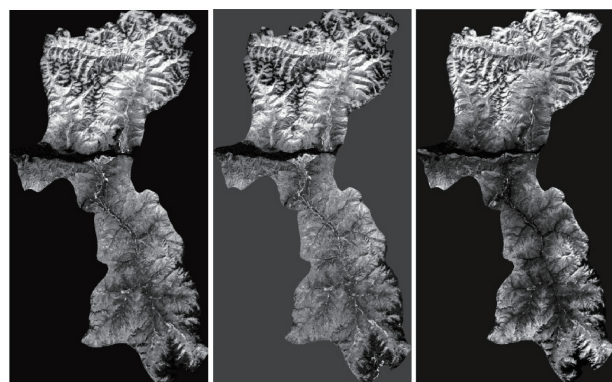
表2 1988、2000和2010年研究区影像线性光谱分离结果

Tab.2 Linear spectral unmixing result of the images in 1988, 2000, and 2010

年份	植被/%	裸土/%	裸岩/%	阴影/%	RMS/%
1988	10.56	35.54	23.63	30.27	1.32
2000	13.12	28.46	27.32	31.10	1.87
2010	14.14	27.76	28.14	29.96	1.49



a. 1988年植被覆盖状况 b. 2000年植被覆盖状况 c. 2010年植被覆盖状况



d. 1988年NDVI e. 2000年NDVI f. 2010年NDVI

图3 1988、2000和2010年植被覆盖状况与NDVI比较

Fig.3 Comparison between vegetation coverage derived from linear spectral unmixing and NDVI in 1988, 2000, and 2010

$$r_{\text{veg_NDVI}} = \begin{cases} 0.846 & (1988) \\ 0.906 & (2000) \\ 0.825 & (2010) \end{cases} \quad (2)$$

统计回归方程为:

$$C_{\text{veg}} = \begin{cases} 1.43 \times NDVI_{1988} + 0.03024 \\ 1.28 \times NDVI_{2000} + 0.05961 \\ 1.18 \times NDVI_{2010} + 0.16132 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_{\text{veg_NDVI}}$ 为相关系数, C_{veg} 为植被分量, 1988、2000、2010 为年份, $NDVI$ 为归一化植被差异指数。

由于传统遥感解译方法缺乏有效提取地面土壤裸露和基岩出露等方面定量指标手段, 利用线性光谱分离技术则可以直接提取土地覆被状况的植被覆盖率、土地裸露率和基岩出露率等关键指标, 实现了研究区土地覆被动态监测(万军等, 2003)。在缺乏相关地面资料修正的情况下, 线性光谱分离技术可以直接确定区域植被覆盖度和土壤裸露程度, 利用该技术进行土地覆被变化监测具有明显的优势。

5 讨论

本文研究结果显示: 植被覆盖度有明显增加, 1988-2010年间乃东县河谷地带的土地覆被类型发生了明显的变化, 草地和滩地等天然植被覆被被人工植被所取代。位于西藏“一江两河”地区的乃东县属于温带半干旱气候类型, 生态环境相对脆弱, 采取人工种树、改良草场等局部生态环境的生物工程技术措施是在短时间内改善区域环境的有效途径之一。但在河谷内尤其是河漫滩的大片植树措施, 与该地段的自然地带性相悖, 其长期适应性还有待进一步检验和研究。同时在人类活动相对缺乏地区裸岩面积有明显提升, 说明小区域短时间内的生态恢复工程并未改善整个地区的石漠化趋势, 选择切实有效的生态保护及恢复措施仍将是今后研究的重点方向。

本文通过对遥感技术手段实现了研究区土地覆被动态监测, 不仅克服了气候、环境、交通条件以及现有勘探技术装备水平制约的难题, 还提高了土地利用/土地覆被变化动态监测实时性, 大幅度降低了人力、财力的消耗。但利用线性光谱分离技术研究区域土地覆被变化目前仍然面临两个难以解决的问题: 影像阴影的影响和典型地物的选择。

研究区位于雅鲁藏布江河谷地区, 地貌的基本特征是山峦重叠, 山高坡陡, 沟谷纵横。由于高大山体阻隔, 背阴坡坡地到山顶仰角大于影像拍摄时的太阳高度角, 在影像上形成完全的阴影区, 没有地物信息。此外, 植被、崎岖的地表也会产生局部的阴影。阴影是困扰遥感影像处理的重大难题, 目前没有特别有效的消除方法。在本文和相关文献的研究中, 阴影的处理都是将其入选为一类终端单元, 将难以确定的阴影影响限制在“阴影类型”的变量范围内(表3)(马超飞等, 2001; Lucas et al, 2002; Sabol et al, 2002; 万军等, 2003; 赵莲等, 2011; 张志新等, 2011)。这种处理方式最大限度地反映了遥感影像获取地物光谱特征, 但分离结果与区域阴影区实际状况存在一定差别, 如何进一步提高线性光谱分离结果精度, 在技术环节和分离原理上仍需要继续深入探讨研究。

终端单元的选取途径有两类, 通过光谱库或通过影像训练区选取。由于地物、区域环境和影像质量状况千差万别, 普通的光谱库很难实现, 实际研究中通常采用通过影像训练提取的方法。影像训

表3 相关文献的终端单元选取和研究区环境

Tab.3 Endmember identification and environment of study areas in literature

相关文献	终端单元类型	研究区
马超飞等, 2001	植被、阴影、裸土、耕地、积雪、云	岷江流域上游高山峡谷区
Lucas et al, 2002	Vegetation, Sand, Shade/Moisture	Kenfig National Nature Reserve, UK
Sabol et al, 2002	Green Vegetation, Nonphotosynthetic	Pacific Nothwest Forests
	Vegetation, Soil, Shade	
万军等, 2003	植被、裸土、裸岩、阴影	贵州喀斯特地区
赵莲等, 2011	冬小麦、建筑用地、裸地、水体	河北平原地区
张志新等, 2011	植被、干燥土壤、纯净水体、建筑与道路	广州丘陵地区

练提取的终端单元对应的地物需要在各个波段上有“极端表现”,然而许多重要的地物,如城镇建设用地难以入选,造成线性光谱分离技术在应用区域上具有一定的局限性。

6 结论

青藏高原是具有全球意义的脆弱生态系统,研究青藏高原地区的土地覆被变化对高原本身及其邻近地区的自然环境有着深刻的影响。同时,基于对该研究区对土地利用/土地覆被变化过程的系统分析,可为人们通过优化土地利用和土地覆被状况、改善环境的生态重建途径提供理论与实践的支持。本文选定中小尺度县域为研究区域,利用1988、2000和2010年三期多波段遥感影像,采用线性光谱分离技术对西藏乃东县土地覆被状况进行定量研究。主要结论如下:

- (1) 研究区山峦重叠,沟谷纵横,地表破碎,混合像元比例高。土地覆被状况除一般的植被和土壤外,还有特殊的裸岩类型,常规方法很难全面定量地监测该区的土地覆被状况,而线性光谱分离技术则具备良好的适用性。
- (2) 线性光谱分离结果显示,1988年研究区裸土覆被率处于较高水平,裸岩覆被次之、植被覆盖率最低。1988-2010年间,研究区裸土覆被率有较大幅度的下降;植被覆被率有所上升,同时裸岩覆被率也明显上升,说明研究区实施的植树造林、改良草场等大量生物工程技术措施初见成效,但是石漠化的问题仍在继续发展。
- (3) 将线性光谱分离的植被分量与NDVI结果进行了比较,在置信度 $\alpha=0.99$ 的情况下,其相关系数达到0.825~0.906,可以看出线性光谱分离结果与NDVI具有良好的一致性。

本文采用线性光谱分离技术量化提取复杂的土地覆被,弥补了传统的方法在西藏地区土地覆被变化评价中的不足。但在误差与精度分析上仍存在不足,尤其是对复杂地物终端单元的选择与山区阴影的处理上仍需要不断探索。从以上结论可以看出,研究区应该在未来土地利用和保护过程中,控制石漠化的进一步加剧,加快未利用地生态环境恢复及建设步伐。

参考文献(References)

边多, 除多, 李林, 等. 2001. 西藏"一江两河"地区土地资源动态监测研究[J]. 西藏科技, (1): 30-33. [Bian D, Chu D, Li L, et al. 2001. Study on the dynamic monitoring of land resource in "one river and two tributaries" basin in Tibet[J]. Tibet's Science and Technology, (1): 30-33.]

曹入尹, 陈云浩, 黄文江. 2008. 面向作物病害识别的高光谱波谱库设计与开发[J]. 自然灾害学报, 17(6): 73-76. [Cao R Y, Chen Y H, Huang W J. 2008. Design and development of hyperspectral library for recognizing disease of crops[J]. Journal of Natural Disasters, 17(6): 73-76.]

兰志明, 王清先. 2000. "八五"时期西藏"一江两河"综合开发效益分析与评价[J]. 中国藏学, (1): 11-25. [Lan Z M, Wang Q X. 2000. Analysis and appraise of synthesized effect of the exploitation of "one river and its two branches" river basin of Tibet in the eighth five year plan period [J]. China Tibetology, (1): 11-25.]

林川, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 2013. 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法: 以北京野鸭湖湿地为例[J]. 生态学报, 33(4): 1172-1185. [Lin C, Gong Z N, Zhao W J, et al. 2013. Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(4): 1172-1185.]

刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 2011. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例[J]. 地理学报, 66(7): 961-971. [Liu Z H, Wang Y L, Peng J, et al. 2011. Us-

- ing ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: a case study in Shenzhen[J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(7): 961-971.]
- 罗海江. 2013. 基于卫星遥感的北京城乡植物物候差异[J]. *地理科学进展*, 32(10): 1463-1469. [Luo H J. 2013. Differences in plant phenology between urban and rural areas of Beijing based on satellite-based remote sensing[J]. *Progress in Geography*, 32(10): 1463-1469.]
- 马超飞, 马建文, 布和敖斯尔. 2001. USLE模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. *水土保持通报*, 21(4): 6-9. [Ma C F, Ma J W, Buhe A. 2001. Quantitative assessment of vegetation coverage factor in USLE model using remote sensing data[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 21(4): 6-9.]
- 万军, 蔡运龙. 2003. 应用线性光谱分离技术研究喀斯特地区土地覆被变化: 以贵州省关岭县为例[J]. *地理研究*, 22(4): 439-446. [Wan J, Cai Y L. 2003. Applying linear spectral unmixing approach to the research of land cover change in karst area: a case in Guanling County of Guizhou Province[J]. *Geographical Research*, 22(4): 439-446.]
- 岳跃民, 王克林, 张兵, 等. 2008. 高光谱遥感在生态系统研究中的应用进展[J]. *遥感技术与应用*, 23(4): 471-478. [Yue Y M, Wang K L, Zhang B, et al. 2008. Applications of hyperspectral remote sensing in ecosystem: a review [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 23(4): 471-478.]
- 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 2012. 塔里木河中游典型绿洲盐渍化土壤的反射光谱特征[J]. *地理科学进展*, 31(7): 921-932. [Zhang F, Tashpolat T, Ding J L, et al. 2012. The study on the reflectance spectral characteristic of salt-affected soil in typical oasis of the middle reaches of Tarim river[J]. *Progress in Geography*, 31(7): 921-932.]
- 张志新, 邓孺孺, 李灏, 等. 2011. 基于混合像元分解的南方地区植被覆盖度遥感监测: 以广州市为例[J]. *国土资源遥感*, 90(3): 88-94. [Zhang Z X, Deng R R, Li H, et al. 2011. Remote sensing monitoring of vegetation coverage in southern China based on pixel unmixing: a case study of Guangzhou City[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 90(3): 88-94.]
- 赵莲, 张锦水, 胡潭高, 等. 2011. 变端元混合像元分解冬小麦种植面积测量方法[J]. *国土资源遥感*, 88(1): 66-72. [Zhao L, Zhang J S, Hu T G, et al. 2011. The application of the dynamic endmember linear spectral unmixing model to winter wheat area estimation[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 88(1): 66-72.]
- 赵英时, 杨立明, 陈冬梅, 等. 2003. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社. [Zhao Y S, Yang L M, Chen D M, et al. 2003. The principles and methods for analysis and application of remote sensing[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 赵振亮, 塔西甫拉提·特依拜, 孙倩, 等. 2014. 土壤光谱特征分析及盐渍化信息提取: 以新疆渭干河/库车河绿洲为例[J]. *地理科学进展*, 33(2): 280-288. [Zhao Z L, Tashpolat T, Sun Q, et al. 2014. Soil spectrum characteristics and information extraction of salinization: a case study in Weigan-Kuqa oasis in Xinjiang[J]. *Progress in Geography*, 33(2): 280-288.]
- 周斌. 2000. 针对土地覆盖变化的多时相遥感探测方法[J]. *矿物学报*, 20(2): 165-171. [Zhou B. 2000. The multitemporal remote sensing algorithms for detecting land cover change[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(2): 165-171.]
- Hill J, Hostert P, Tsiourlis G, et al. 1998. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the Greek island of Crete with earth observation satellites[J]. *Journal of Arid Environments*, 39(2): 165-178.
- Ichoku C, Karnieli A. 1996. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation[J]. *Remote sensing reviews*, 13(3-4): 161-186.
- Lucas N S, Shanmugam S and Barnsley M. 2002. Sub-pixel habitat mapping of a coastal dune ecosystem[J]. *Applied Geography*, 22(3): 253-270.
- Moran E, Ojima D, Buchmann N, et al. 2005. Global land project: science plan and implementation strategy[R]. Stockholm, Sweden: IGBP Secretariat.
- Müller D, Munroe D K. 2014. Current and future challenges in land-use science[J]. *Journal of Land Use Science*, 9(2): 133-142.
- Plaza A, Martín G, Plaza J, et al. 2011. Recent developments in endmember extraction and spectral unmixing[M]// Prasad S, et al. *Optical remote sensing*. Heidelberg & Berlin, Germany: Springer: 235-267.
- Sabol D E, Gillespie A R, Adams J B, et al. 2002. Structural stage in pacific northwest forests estimated using simple mixing models of multispectral images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 1-16.
- Somers B, Zortea M, Plaza A, et al. 2012. Automated extraction of image-based endmember bundles for improved spectral unmixing[J]. *IEEE Journal of selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2): 396-408.
- Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. 1995. Land use and land cover change science/research plan[R]. Stockholm, Sweden: IGBP Secretariat.

Linear spectral unmixing–based method for the detection of land cover change in Naidong County, Qinghai–Tibet Plateau

DAI Erfu¹, WU Zhuo^{1,2}, LU Haihua³, FU Hua⁴

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanxisheng Taiyuanshi di er shiyan zhongxuexiao, Shanxi Province, Taiyuan 030024, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is a hotspot area for global climate change research and a key area for ecological protection in China. Land cover change research in this area can significantly contribute to optimizing land use pattern and improving ecological services and natural conditions of the region. Among various methods for land cover change detection, linear spectral unmixing (LSU) is an effective approach to monitor land cover change by using remote sensing technology. In this study, we chose Naidong County in Tibet as the study area and adopted the linear spectral unmixing technology to detect the ratio of vegetation, bare soil, and rock for each pixel of three Landsat TM/ETM images from 1988, 2000, and 2010. The vegetation component of the result was compared with NDVI. The results show that: (1) The study area has high proportion of mixed pixels, and LSU can deal with the complex features of land cover changes effectively. (2) The proportion of bare soil reduced evidently while rock and vegetation coverage increased from 1988 to 2010. It proves that vegetation cover had recovered to some degree while rocky desertification expanded rapidly. (3) Through comparing the vegetation component with NDVI we conclude that LSU is applicable for the identification of land cover change of the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: land cover change; linear spectral unmixing; vegetation; bare soil/rock; Naidong County