

DOI:10.13203/j.whugis20150168



文章编号:1671-8860(2018)03-0399-07

三江源典型区草地退化 Hyperion 高光谱遥感识别研究

安如¹ 陆彩红¹ 王慧麟² 姜丹萍¹ 孙梦秋¹
Jonathan Arthur Quaye Ballard¹

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,210098

2 南京大学地理与海洋科学学院,江苏 南京,210023

摘要:三江源草地退化直接影响当地及长江、黄河和澜沧江中上游地区的生态安全、水资源合理利用、经济可持续发展和社会稳定,一直是人们关注的焦点问题。近年来,该地区草地群落毒杂草组分增大,退化严重。高光谱遥感具有精细识别草地种群的潜在能力,如何利用其进行草地群落组成信息探测并进行退化识别是当前研究的热点和难点问题。利用卫星高光谱 Hyperion 影像和地面实测高光谱遥感数据,通过多端元混合像元分解技术,提取可食牧草、毒杂草以及裸土组分信息;以此为指标对研究区草地退化程度进行分类识别,依次为:未退化、轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化。利用野外样方实测数据验证监测结果,精度达到 84.2%,表明高光谱遥感对草地退化探测具有良好的应用潜力。

关键词:高光谱遥感;Hyperion;多端元混合像元分解;三江源;草地退化识别

中图法分类号:P237

文献标志码:A

草地生态系统在调节气候、涵养水源、水土保持、防风固沙等方面有着重要作用。草地退化、沙化、荒漠化是当今人类面临的重大环境与社会问题之一^[1]。草地退化是由于人类活动或不利的自然因素(主要是气候因素)所引起的草地生态系统的组成、结构与功能发生明显的变化,表现在草地(包括植被及土壤)质量衰退,生产力、经济潜力及服务功能降低,生态环境变劣以及生物多样性或复杂性降低,恢复功能减弱或丧失^[2]。三江源地区位于青藏高原腹地的青海省南部,大部分地区海拔在 4 000 m 以上,地势险峻,气候寒冷。三江源作为世界上最大的自然保护区,是我国生态安全的重要屏障;作为黄河、长江和澜沧江的发源地,素有“中华水塔”之美誉。大量观测事实与研究结果指出,三江源地区生态系统近几十年来出现了显著的退化现象^[3-5],成为十分脆弱的生态系统。

草地退化不仅表现为生产能力的变化,还表

现为种群结构的变化,例如优势草种组分的减少和毒杂草比例的增加。在草地退化监测中植被盖度、生物量及群落优势种变化(如可食牧草率)是常用的草地退化监测指标^[6-7]。利用高光谱遥感技术识别群落中草本植物种类,并反演各主要草种占群落的面积比例,可为草地退化监测提供重要的生态系统结构指标。文献[8]采用随机森林算法选择识别草种的最佳波段,有效地识别了代表 4 种不同草地退化级别的指示物种。文献[9]实地测量了多种植物的叶片、冠层以及多种植物混合的群落反射光谱数据,利用有效的光谱特征参量化方法,提取叶片和冠层的光谱特征,准确区分了草甸草原的几种建群和退化指示草本植物种。文献[10]通过多源遥感数据进行群落分类研究,发现光谱分辨率区分物种群落的能力相当显著,分辨力随光谱分辨率的提高而提高。

本文从裸土和植被群落组成这两个指标出发,结合地面实测与高光谱遥感影像数据,利用多

收稿日期:2015-12-05

项目资助:国家自然科学基金(41271361);“十二五”国家科技支撑计划(2013BAC03B04);江苏省“六大人才高峰”项目(XXRJ-011)。

第一作者:安如,博士,教授,主要从事生态环境遥感监测,遥感图像信息提取与模式识别,地理信息获取与可视化研究。
anrunj@163.com

通讯作者:陆彩红,硕士。caih@qq.com

端元混合像元分解技术^[11-12],进行可食牧草、毒杂草以及裸土的遥感信息提取,建立草地退化等级分类指标,从而获得研究区的草地退化等级分布图,为区域尺度上进行毒杂草和草地退化的监测提供借鉴。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于东经 $95^{\circ}32' \sim 95^{\circ}50'$,北纬 $33^{\circ}20' \sim 34^{\circ}10'$ 范围内,属高原亚寒带半干旱区,位于玉树藏族自治州西部通天河保护区内,覆盖治多县东南和曲麻莱县南部的部分区域,如图1所示。野外综合考察发现,研究区地物组成复杂,同一像元内至少有两种及以上地物。道路两旁砾石裸土分布较多,鼠洞分布因地而异,退化较严重地区平均 10 m^2 内约有10个鼠洞,有草蠕动特点。研究区内平均植被覆盖率达到 $70\% \sim 80\%$,草种主要有嵩草、针茅等可食牧草以及矮火绒草、细叶亚菊等各类毒杂草。

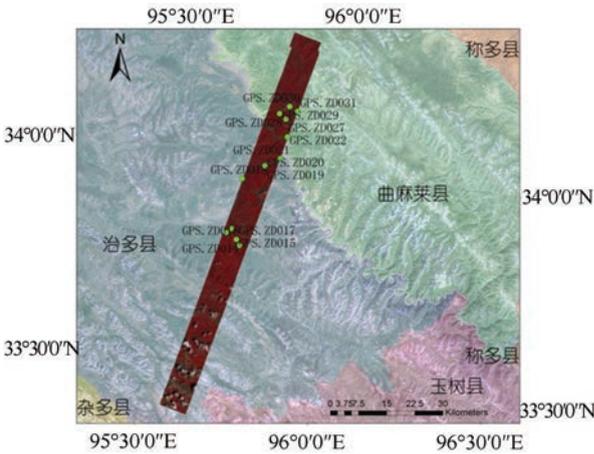


图1 研究区位置及采样点分布

Fig.1 Location of Study Area and Sampling Sites

1.2 研究数据及处理

Hyperion 影像采用了图谱合一技术,共242个波段,光谱覆盖范围为 $355 \sim 2\,577\text{ nm}$,传感器空间分辨率为 30 m 。本文选用的影像拍摄时间为2012-08-03,与野外实测数据获取的季相时间基本一致。图像预处理后通过分段主成分分析与波段指数相结合的方法^[13]提取了最佳波段。将Hyperion 高光谱数据的176个波段缩减为8个信息量丰富且相关性小的最优波段组合。

2013年8月11至21日进行了研究区野外综合考察和光谱测量。本文使用美国SVC公司HR-1024型便携式地物光谱仪进行野外光谱数

据的测量,光谱范围为 $350 \sim 2\,500\text{ nm}$ 。综合多种资料进行典型样方位置的选择,通过GPS精确定位中心点确定采样路线。采用“X”法取样,样方面积为 $30 \times 30\text{ m}^2$,每个样方内布设5个采样点,在每个采样点放置 $0.5 \times 0.5\text{ m}^2$ 的样方框(见图2)。在每个采样点进行GPS定位、光谱测量、草种识别、总盖度和分盖度估算。野外共测量获得地物光谱48条,其中纯净草种38种,包括莎草科嵩草属5种、禾本科针茅属3种、毒杂草21种、各类裸土10种、水体2种,部分地物光谱曲线见图3。由野外考察发现,在一个 $30 \times 30\text{ m}^2$ Hyperion 像元内,各类可食牧草和毒杂草混生,各草种均无法找到影像纯净像元。为了更好地运用地面实测端元光谱作为影像端元光谱进行光谱解混,需要将实测端元光谱重采样至影像端元光谱。本文采用高斯函数模拟Hyperion 卫星高光谱传感器波段的光谱响应函数^[14]进行地面实测光谱的重采样,实现与Hyperion一致的波段分布。

2 多端元混合像元分解提取群落组分信息

2.1 端元的选择和提取

混合像元分解的端元来源于参考端元和影像端元,由于研究区影像中混合像元普遍存在,采用重采样后的地面实测端元作为影像端元来进行分析。依据实地采集数据记录、样点及环境照片,并结合土地利用类型图、草地资源类型图,将端元类型分为可食牧草、毒杂草和裸土3大类,包括:(1)可食牧草的莎草科嵩草属(小嵩草、矮嵩草、线性嵩草、藏嵩草和高山嵩草5个草种);(2)毒杂草的菊科(亚菊属细叶亚菊种、火绒草属矮火绒草种、狗娃花属阿尔泰狗娃菜种)、唇形科(独一味属独一味种)、龙胆科(龙胆属麻花苣种)和刺续断科(刺续断属青海刺参种);(3)裸地包括含沙石的裸土、砂石、沙地、干裸土、湿裸土和斑块状黑土(黑土滩)。共有可食牧草光谱7种、毒杂草光谱6种、裸土光谱6种。

将端元光谱降维为8个波段,为后续的混合像元分解做准备。图4中显示的是3类地物的光谱曲线。低反射率地物是指影像中存在的云影、水体、山体阴影和太阳光入射角度所产生的地物阴影等,本文中低反射率地物光谱由研究区水体光谱代替。

2.2 多端元混合像元分解

多端元混合像元分解(multiple endmember

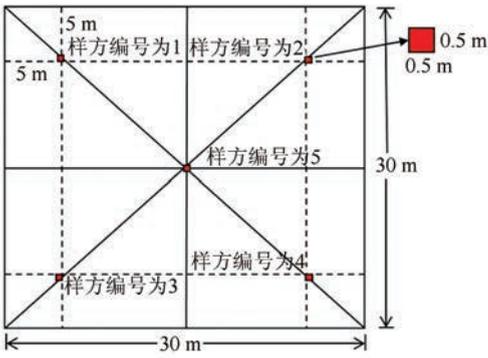


图 2 30×30 m²样方布点图
Fig.2 Diagram of Sampling Spots

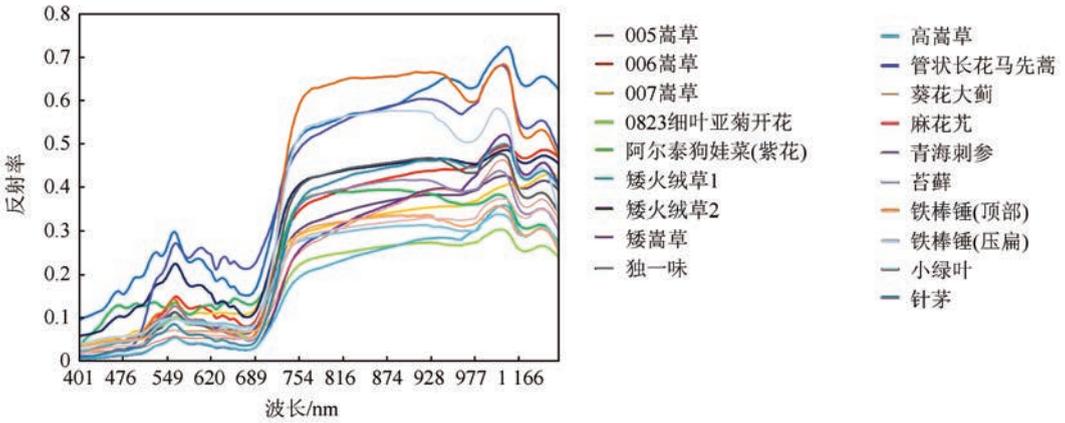


图 3 研究区部分草种光谱曲线
Fig.3 Part of Spectral Curves

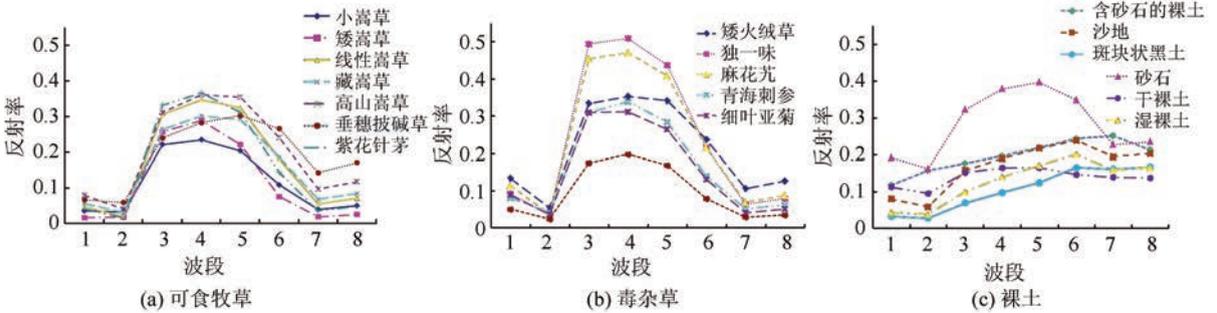


图 4 3 类地物的波谱曲线
Fig.4 3 Kinds of Spectrum Curves

spectral mixture analysis, MESMA) 由文献 [12] 在简单的光谱混合分析 (spectral mixture analysis, SMA) 的基础上发展而来。SMA 常用的方法包括线性光谱混合模型 (linear spectral mixture mode, LSMM)、概率模型、几何光学模型、人工神经网络 (artificial neural Networks, ANN)、回归树等, 其中 LSMM 认为混合像元是纯净光谱 (端元) 的线性组合。对于每个像元, 各波段的反射率表示为它的端元组分特征反射率与他们各自丰度的线性组合。其表达式为:

$$r = \sum_{i=1}^p \alpha_i s_i + n = S\alpha + n \quad (1)$$

式中, r 为 m (m 为影像波段数) 维混合像元光谱反射率, 是已知观测量; S 为 $m \times p$ (p 为端元数目) 端元光谱矩阵, 其中每一列为一个端元的光谱向量; 向量 α 为该像元中各端元的丰度; n 为 m 维高斯随机噪声。假设式 (1) 中组成混合像元的端元光谱是完整的, 则比例系数 α_i 应该满足以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^p \alpha_i = 1, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

MESMA 理论的实质是利用简单 SMA 技术对像元运行所有可能的端元组合模型,从而选取一套最能代表该像元的最优端元组合模型,同时具有与其他端元类别最小的光谱混淆,从而获得

精度更高的丰度信息。MESMA 相比 SMA 解决了同物异谱现象,并且允许不同的像元拥有不同的端元组合,使分解更符合实际地表组成^[12]。

1)端元组合模型。根据研究区地表覆盖组成情况,将上节中提取的端元光谱进行组合,形成可能的地表组成模型(见表 1)。

表 1 端元组合

Tab.1 Total Types of Endmember Assembly

2 端元+低反射率	模型组合数	3 端元+低反射率	模型组合数
可食牧草+可食牧草+低反射率	28		
可食牧草+毒杂草+低反射率	42		
可食牧草+裸土+低反射率	42	可食牧草+毒杂草	252
毒杂草+毒杂草+低反射率	21	+裸土+低反射率	
毒杂草+裸土+低反射率	36		
裸土+裸土+低反射率	21		
合计	190		252

2)端元数相同的模型分解。确定端元组合类型和每一类端元组合模型的个数之后,对端元数相同的每一个组合进行像元分解。分解共分为两重迭代,外层为端元组合的迭代,内层是以像元为单位的迭代。组合一种端元模型后对待分解影像进行分解(即进入内层迭代,内层迭代以像元为单位),对像元上的分解结果依次判断是否满足丰度和为 1、各端元组分在 $[0, 1]$ 区间内以及均方根(root mean square, RMS) ≤ 0.025 的 3 个判断条件,和 RMS 是否小于已保留模型的 RMS,若满足条件则用新模型替换旧模型。内层迭代停止的条件是迭代次数达到像元数,即跳出内层迭代转而进入外层继续迭代,直到完成所有端元数相同的端元组合模型的分解。运行一次算法完成同等数量端元的模型分解。不同端元数的模型分解通过再次运行程序实现。通过分解和第一次最优模型的判断,得到了相同端元数模型中的最优分解模型,即分别得到了 2、3 端元模型中各自的最优模型。然后再根据规则实现 2、3 端元模型间最终分解模型的选择。

3)最终模型的选择。将野外实测大样方植被丰度与 2、3 端元最优模型各自分解得到的植被丰度进行比较,找出与真实丰度最接近的端元模型,作为最终的端元模型,本文仅选用了 3 端元模型对影像进行最终分解。

3 结果与分析

3.1 草地组分信息精度评价

本文提取 19 个样本点对应的组分盖度分解

信息,其中估测植被总盖度=估测可食牧草盖度+估测毒杂草盖度,然后计算实测丰度与分解丰度之间的均方根误差、平均相对误差,得到了总盖度、可食牧草和毒杂草的分解精度统计信息,如表 2 所示。

表 2 混合像元分解精度评价

Tab.2 Accuracy Assessment of MESMA

评价指标	总盖度	可食牧草	毒杂草
相关性	0.382	0.465 *	0.511 *
显著性	0.107	0.045	0.025
平均相对误差	0.156	0.222	0.260
均方根误差	0.164	0.159	0.071

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

将得到的各丰度值划分为 5 个等级进行显示,从图 5 可知,平均植被盖度在 0.7 左右,裸土丰度等级图中的高值区域对应着可食与毒杂草丰度分量图中的低值区域;平均可食牧草盖度在 0.5 左右,可食牧草丰度等级图中的高值区域对应着毒杂草丰度分量图中的低值区域。研究区的裸土面积分布较少,植被覆盖占据较大面积。

3.2 草地退化等级分布与验证

草地退化的概念由于研究对象、研究范围、研究方法和目的等不同,其内涵和侧重也不尽相同^[15]。本文从像元尺度出发,考虑不同草地在像元中的比例组合,参照文献^[16]的退化等级指标划分标准,对实测值进行聚类分析,将草地退化等级划分为 5 类^[17],如表 3 所示。结合以上指标,通过空间叠加分析得出研究区的草地退化等级图,如图 6 所示。

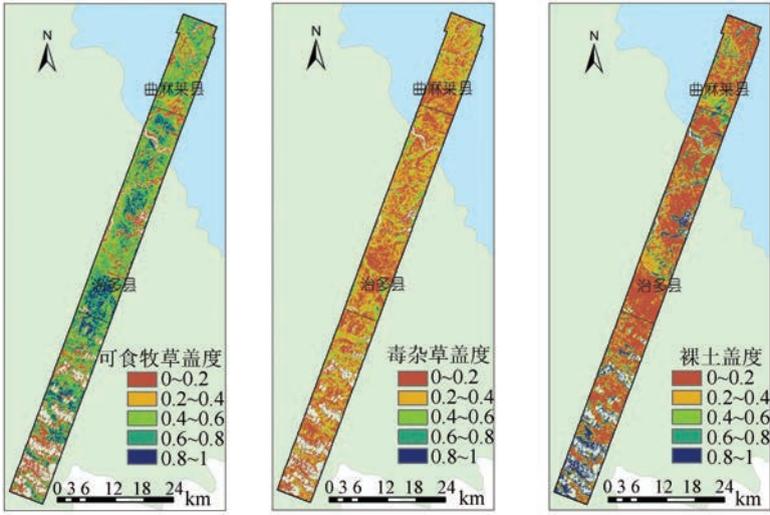


图 5 三类地物丰度等级图

Fig.5 Abundance Degree Map of Three Kinds of Ground Features

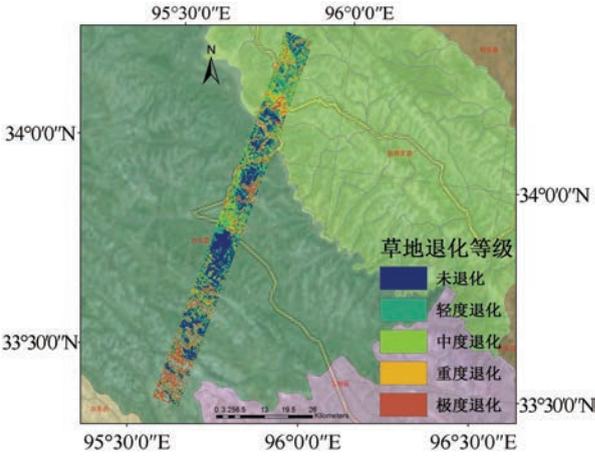


图 6 研究区草地退化等级图

Fig.6 Rangeland Degradation in Study Area

表 3 草地退化等级判断指标(%)

Tab.3 Degradation Judgement Index of Alpine Meadow Grassland(%)

退化等级	可食牧草	毒杂草	裸土比例
	比例	比例	
未退化	≥72	≤15	≤10
轻度退化	55~72	15~35	10~25
中度退化	35~55	35~50	25~50
重度退化	20~35	50~75	45~80
极度退化	≤20	≥75	≥80

4 结 语

本文以曲麻莱县、治多县部分区域为研究区，将地面实测数据与高光谱遥感数据相结合，采用多端元混合像元分解技术，提取可食牧草、毒杂草以及裸土的组分盖度信息，以此作为草地退化的主要分类指标，获得三江源典型区草地退化的空间分布情况。研究表明，通过高光谱遥感数据对草地作微弱光谱差异的定量分析，对草地退化植被群落特征参数进行估算，精度较高。以后的研究中，应更多地获取野外测量信息，加强验证工作，并进行更多的试验研究。可以考虑加入更多的环境因素，有效的植被指数、地表粗糙度等，进一步提高草地退化识别的准确程度。

参 考 文 献

[1] Wang Kun, Grassland Vegetation Restoration and Reconstruction [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004(王堃.草地植被恢复与重建[M].北京:化学工业出版社,2004)

利用研究区实测点(共 19 个)对草地退化识别结果进行验证。实测与估算结果的对应关系分为:完全符合(盖度误差和≤10%)、轻微偏差(盖度误差和≤30%)、较大偏差(盖度误差和≤60%)和严重偏差(盖度误差和≥60%)，其中完全相符的共 16 个点，轻微偏差为 2 个点，较大偏差 1 个点，总体验证精度为 84.2%。

对研究区各退化等级的草地面积进行统计，退化草地面积占全区草地面积的 71.5%。其中，轻度退化草地为 28.06%，中度退化为 21.28%，重度退化为 10.76%，极度退化为 11.40%。根据统计比例可以看出，研究区草地退化较严重，大部分草地资源都已经遭到破坏，以轻度、中度退化为主但重度退化和极度退化的草地面积比例也比较大。

- [2] Liu Jiyuan, Xu Xinliang, Shao Quanqin. The Spatial and Temporal Characteristics of Grassland Degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4):364-376(刘纪远,徐新良,邵全琴.近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J].地理学报,2008,63(4):364-376)
- [3] Zhang Yili, Liu Linshan, Bai Wanqi, et al. Grassland Degradation in the Source Region of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 3-14(张懿锂,刘林山,摆万奇,等.黄河源地区草地退化空间特征[J].地理学报,2006,61(1):3-14)
- [4] Chen Quangong, Liang Tiangang, Wei Yaxing. Degraded Grassland Research(II): The Degradation of Grassland Cause Analysis and Evaluation in Dari County of Qinghai Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 1998, 7(4):44-48(陈全功,梁天刚,卫亚星.青海省达日县退化草地研究(II):退化草地成因分析与评估[J].草业学报,1998,7(4):44-48)
- [5] Sun Honglie, Zheng Du. The Formation and Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998(孙鸿烈,郑度.青藏高原形成演化与发展[M].广州:广东科技出版社,1998)
- [6] Qu Ran, Li Shuang, Xu Xinliang, et al. Miscellaneous Grass Invasion Research Progress of Remote Sensing Monitoring Method for Rangeland Degradation [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(5):761-761(屈冉,李双,徐新良,等.草地退化杂类草入侵遥感监测方法研究进展[J].地球信息科学学报,2013,15(5):761-767)
- [7] Jiang Miao, Zhang Xianfeng, Sun Quan, et al. Vegetation Coverage Retrieval Scale Effect Analysis Using Multi-sensor Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 311-315(江淼,张显峰,孙权,等.不同分辨率影像反演植被覆盖度的参数确定与尺度效应分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(3):311-315)
- [8] Mansour K, Mutanga O, Everson T, et al. Discriminating Indicator Grass Species for Rangeland Degradation Assessment Using Hyperspectral Data Resampled to AISA Eagle Resolution[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 70:56-65
- [9] Wang Huanjiong, Fan Wenjie, Cui Yaokui, et al. Hyperspectral Remote Sensing Monitoring of Grassland Degradation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10):2734-2738(王焕炯,范闻捷,崔要奎,等.草地退化的高光谱遥感监测方法[J].光谱学与光谱分析,2010,30(10):2734-2738)
- [10] Hunter P, Tyler A N, Présing M, et al. Spectral Discrimination of Phytoplankton Colour Groups: The Effect of Suspended Particulate Matter and Sensor Spectral Resolution[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 112(4):1527-1544
- [11] Franke J, Roberts D, Halligan K, et al. Hierarchical Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) of Hyperspectral Imagery for Urban Environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(8):1712-1723
- [12] 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
- [13] Tan Kun, Du Peijun, Wang Xiaomei. Multi-class Support Vector Machine Classifier Based on Separability Measure for Hyperspectral Remote Sensing Image Classification[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2):171-175(谭琨,杜培军,王小美.利用分离性测度多类支持向量机进行高光谱遥感影像分类[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(2):171-175)
- [14] Xiao Qing, Li Min. A Study on the Transformation of Airborne Remote Sensing Image to Spaceborne Remote Sensing Image [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(3):234-240(肖青,李敏.机载光学图像至卫星光学图像转换方法研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):234-240)
- [15] Yan Yuchun, Tang Haiping. Differentiation of Related Concepts of Grassland Degradation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(1):93-99(闫玉春,唐海萍.草地退化相关概念辨析[J].草业学报,2008,17(1):93-99)
- [16] Pan Duofeng. Study on the Types and Grade Partition Criterion of "Black Soil Type" Degraded Grassland in the "Three-River Headwaters" Region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007(潘多锋.三江源区"黑土型"退化草地的类型及等级划分标准研究[D].兰州:甘肃农业大学,2007)
- [17] Yu Xiaoyong, Shao Quanqin, Liu Jiyuan. Spectral Analysis of Different Degradation Level alpine Meadows in "Three-River Headwaters" Region[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(3):398-404(喻小勇,邵全琴,刘纪远.三江源区不同退化程度的高寒草甸光谱特征分析[J].地球信息科学学报,2012,14(3):398-404)

Remote Sensing Identification of Rangeland Degradation Using Hyperion Hyperspectral Image in a Typical Area for Three-River Headwater Region, Qinghai, China

AN Ru¹ LU Caihong¹ WANG Huilin² JIANG Danping¹ SUN Mengqiu¹
*Jonathan Arthur Quaye Ballard*¹

¹ School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

² College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Rangeland degradation at the Three-River Headwater Region (TRHR) has been a major concern to the public in recent years, especially toxic weeds. The application of hyperspectral remote sensing in detecting meadow composition and identifying degradation become a major tool for research. Using MESMA algorithm and Hyperion image combined with the measured hyperspectral data, information about edible grass, toxic weeds and bare land were extracted to classify the degree of rangeland degradation. The study area was divided into five levels of degradation, namely: no degradation, mild degradation, moderate degradation, severe degradation and extremely severe degradation. Compared with the measurement data samples on monitoring, the precision attained was 84.2%. This shows that hyperspectral remote sensing is effective in detecting rangeland degradation at TRHR.

Key words: hyperspectral remote sensing; Hyperion; MESMA; the Three-River Headwater Region; rangeland degradation identification

First author: AN Ru, PhD, professor, specializes in ecological environment remote sensing monitoring, remote sensing image information extraction and pattern recognition and geographic information acquisition, visualization and system development. E-mail: anrunj@163.com

Corresponding author: LU Caihong, master. E-mail: caih@qq.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41271361; the National Science & Technology Pillar Program During the Twelfth Five-Year Plan Period, No. 2013BAC03B04; Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province, No. XXRJ-011.