

文章编号 1004-924X(2013)12-3183-08

## 黄河源玛多县“黑土滩”遥感定量识别

安 如,徐晓峰\*,李晓雪,梁 欣

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**采用混合像元分解方法提取“黑土滩”信息以实现玛多县“黑土滩”的遥感识别。以 Roberts 提出的多端元混合像元分解(MESMA)模型为基础,分析玛多县的地物组成并提取端元;针对 MESMA 在本研究区应用存在的不足,优化了解析策略和机制,并利用改进后的 MESMA,结合“黑土滩”的形成机制提取研究区的“黑土滩”信息。最后,采用实测数据对本文“黑土滩”识别结果进行精度验证,得到的精度为 82.81%,较 MESMA 方法的 71.09%有明显提高,说明改进后的 MESMA 可以有效识别“黑土滩”。利用本文方法得到玛多县“黑土滩”面积为  $1.592 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,主要分布在玛多县北部。该方法在保证“黑土滩”提取精度的同时,效率较传统的目视解译方法有了明显改善。该方法亦适用于其他复杂环境地表组分信息的提取。

**关键词:**黑土滩;遥感;定量识别;定量提取;多端元混合像元分解;玛多县

**中图分类号:** TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3183

## “Black Soil Land” recognition at Maduo County in source region of Yellow River based on quantitative remote sensing

AN Ru, XU Xiao-feng\*, LI Xiao-xue, LIANG Xin

(School of Earth Science and Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China)

\* Corresponding author, E-mail: 695367020@qq.com

**Abstract:** The Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis(MESMA)was used to extract the information to identify the “Black Soil Land” in a remote sensing image. Based on the MESMA proposed by Robert, the surface features in Maduo were analyzed while the endmembers were extracted. In consideration of the insufficient in applying MESMA to this research area, the decomposition strategy and its mechanism were optimized, then along with the formation mechanism of “black soil land”, modified MESMA was applied to extraction of the “black soil land” information. Identified results of “black soil land” was verified by the measured data, which shows the identifying accuracy is 82.81%, significantly higher than the accuracy of 71.09% from the MESMA and proves that the improved MESMA can identify the “Black Soil Land” effectively. On the basis of the improved MESMA, it indicates that the “black soil land” accounts for  $1.592 \times 10^3 \text{ km}^2$  in Maduo County, and it mainly distributes in the northern Maduo County. In conclusion, the extracting efficiency for “Black Soil Land” has improved significantly as compared to that of visual interpretation method in guaranteeing the extrac-

收稿日期:2013-06-04;修订日期:2013-08-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41271361);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB421105);“十一五”国家科技支撑计划资助项目(No. 2006BAC08B00)

tion accuracy. Preliminary analysis demonstrates that this method can also be applied to the extraction of surface composition information in other complex environments.

**Key words:** black soil land; remote sensing; quantitative recognition; quantitative extraction; Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis(MESMA); Maduo County

## 1 引言

“黑土滩”是指在青藏高原海拔 3 600 ~ 4 800 m 独特的自然条件下,高寒草甸经风蚀、水蚀,严重退化后形成的一种大面积次生裸地,或原生植被退化呈丘岛状的自然景观。因其裸露的土壤呈黑色,故名“黑土滩”<sup>[1]</sup>。

目前我国学术界对“黑土滩”的定义尚未形成统一认识<sup>[1-8]</sup>,对“黑土滩”成因的研究主要包括“人成说”、“鼠成说”、“牧成说”和“综合成因说”4 种观点。“综合成因说”是引用最为广泛的观点,即认为“黑土滩”是草原在自然和人为因素的作用下所形成的一种特殊的景观类型。总体认为,“黑土滩”植被的基本特征是植被稀疏,原生植被盖度在 0%~50%,大多在 30% 以下<sup>[2]</sup>。

据不完全统计,青藏高原退化草地面积约为  $4.251 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,占全区可利用草地面积的 33%,其中严重退化的“黑土滩”草地估计为  $7.0319 \times 10^2 \text{ km}^2$ ,占全区退化草地的 16.54%<sup>[1]</sup>。黄河源区的“黑土滩”约有  $2.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,并仍以每年  $1 \text{ km}^2$  的速度递增<sup>[9]</sup>。“黄河源区第一县”——玛多县是三江源自然保护区的重点区域,近年来由于草地生态环境的急剧恶化,草场退化非常严重<sup>[10-12]</sup>。“黑土滩”的形成加速了该地区生态环境恶化的进程,直接威胁着本地区广大牧民群众的生存与发展,也威胁着黄河源中下游广大地区的生态平衡<sup>[2,4]</sup>。

以往对“黑土滩”的提取多采取实测数据结合人工目视解译的方法,将像元作为最小分类单元,虽然分类精度相对较高,但效率较低,人力、财力耗费用大,自动化程度低<sup>[5-6]</sup>。目前鲜有对三江源区大面积“黑土滩”时空分布格局进行科学有效探测的报道。另外,由于传感器空间分辨率的限制以及研究区地域辽阔加上地物的复杂多样性,混合像元普遍存在于研究区遥感图像中,混合像元问题是影响黑土滩遥感探测精度的关键因

素<sup>[13-14]</sup>。Roberts<sup>[14]</sup> 1998 年提出了 MESMA (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis,多端元混合像元分解)算法,该算法允许每种地物有多种端元,并且像元不同,其端元组成的种类和数量也随之变化。该方法一经提出就得到了较多的应用<sup>[15-18]</sup>。对于地域辽阔、地物类型复杂多样的研究区,MESMA 允许端元的类型和数量随像元的不同而变化,更符合玛多县的实际情况。

本文以 Roberts 提出的 MESMA 为基础,分析玛多县的地物组成并提取端元,针对 MESMA 在本研究区应用存在的不足,对分解策略和机制作适当的优化。并利用改进后的 MESMA,结合“黑土滩”的形成机制提取研究区的“黑土滩”信息。为整个三江源区“黑土滩”分布的时空格局探测提供科学先进的方法,也为研究区草地生态系统保护提供科学依据。本文采用先进的遥感多端元混合像元分解方法进行三江源黑土滩信息的定量识别与提取,相较目前的地面小范围测量和遥感目视解译方法,更具先进性和大面积动态监测的实用可能性。本文还对 MESMA 做了改进。除了对阴影端元、分解的约束条件进行改进外,还根据实际分解情况,制定了最优分解模型的选择标准用于选择最终分解结果。相较之前的以最小均方根误差为选择标准,更符合实际情况。结果显示,利用改进后的方法进行“黑土滩”提取,精度从 71.09% 提高到 82.81%。

## 2 研究区

玛多县位于三江源核心区,是黄河的发祥地,素有“千湖之县”的美誉。玛多县辖属于青海省果洛藏族自治州,位于  $33^{\circ}50' \sim 35^{\circ}40' \text{ N}$ ,  $96^{\circ}50' \sim 99^{\circ}20' \text{ E}$ ,总面积为  $25\,253 \text{ km}^2$ 。全县平均海拔在 4 200 m 以上<sup>[19]</sup>,地势平坦,多湖泊、沼泽地。玛多县属高寒草原气候,年平均气温  $-4^{\circ} \text{ C}$ ,年降水量  $247.8 \sim 484.8 \text{ mm}$ ,全年无四季之分,只有冷暖

两季之别。玛多县草地类型简单,仅有高寒草甸、高寒干草原、平原草甸 3 个大类草地,受地形、土壤和水势等因素的影响,其水平分布规律不明显,但随着海拔高度、气候、水分等因子的差异,草地

分布具有明显的垂直地带性,研究区地理位置见图 1。

### 3 研究方法

#### 3.1 数据来源及预处理

##### 3.1.1 遥感影像数据

玛多县包括三景 TM 影像,轨道号分别为 134/36、134/35、133/36,三景影像经过 FLAASH 大气校正以及几何校正后,叠加镶嵌;再利用矢量化的玛多县边界对影像进行裁剪,得到研究区的 TM 影像图(图 1),图 1 中白色点状地物为 2009 年 8 月 6 日至 19 日进行野外调查的地面点位置。TM 影像成像时间均为 2008 年 7 月,与地面调查数据获取时间不同年,但时相接近,每景影像中都存在一定量的云。

##### 3.1.2 辅助数据

玛多县 MESMA 算法所需的实验数据见表 1,实地考察采样路线见图 1。

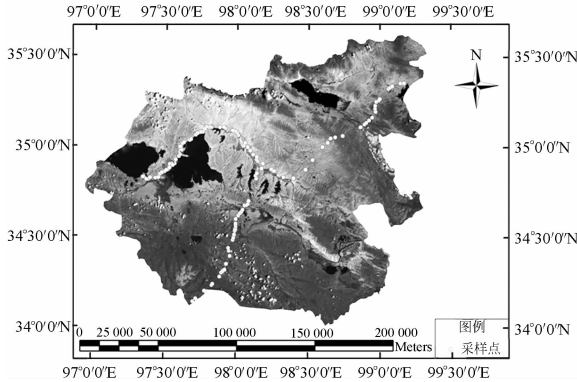


图 1 研究区及实地考察采样路线

Fig. 1 Study area and the sampling route for field surveying

表 1 实验辅助数据

Tab. 1 Experimental auxiliary data

数据名称	比例尺/分辨率	格式	备注
三江源地形图	1 : 10 <sup>5</sup>	.tiff	WGS_1984_UTM_zone47N
三江源土地利用分类图	1 : 10 <sup>6</sup>	.shp	采用全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系
三江源草地类型图	1 : 10 <sup>6</sup>	.shp	包括 78 种草地类型
26 个地面点实测植被盖度	25 cm × 25 cm	.xls	同一样地随机调查 5 个点,然后取平均值
三江源区数字高程模型	100 m	.grd	WGS_1984_UTM_zone47N
128 个野外调查点		.xls	对草地退化程度的描述
玛多县行政边界	1 : 4 × 10 <sup>6</sup>	.shp	WGS_1984_UTM_zone47N

### 3.2 MESMA 及其优化

#### 3.2.1 端元选择

混合像元分解中,端元的选择至关重要,因其直接影响混合像元分解的精度。依据三江源土地覆盖/土地利用类型图、研究区实际地表组成类型以及研究目的来确定需要提取的端元类型。分析总结得到的端元类型有 3 大类,分别是植被类、裸土类和其它类(高反射率和低反射率)。

将三江源草地类型图和土地利用图分别与 4/3/2(近红外、红、绿)波段组合的假彩色 TM 影像叠加,在每种类型上人工选择感兴趣区(ROI),每种类型选择 1~3 个 ROI,每个 ROI 包含 20~

30 个像元,共 120 个 ROI 产生出 1 216 条光谱。选取 ROI 后,在每种 ROI 类型中,利用端元平均均方根误差(Endmember Average Root Mean Square Error,EAR)指数<sup>[20]</sup>产生每种类型各自的最优端元光谱。

共选出 78 条草地类端元光谱,4 条林地类端元光谱,6 条裸土类端元光谱。考虑到过多端元组合导致运算量过大,因此,对 82 种植被类光谱进行重分类,以减少植被类端元总数。重分类算法采用光谱角分类法,即计算 82 条光谱两两之间的光谱角,将光谱角小于 0.05 的光谱归为一类,并用平均光谱代替新类别的光谱。最终重分类出

15 条植被类端元光谱,用植被 1,植被 2,……,植被 15 表示。高、低反射率端元采用像元纯度指数 (PPI) 确定。

最终提取出的端元包括 15 条植被类光谱,6 条裸土类光谱和 2 条其它类光谱(高、低反射率端元光谱曲线)。从图 2 中可以看出,15 条植被类端元光谱曲线较为相似,均在第 4 波段达到最大值。由于 1、2、3 波段处于叶绿素吸收带,5、7 波段处于水分吸收带,植被光谱曲线仅在第 4 波段(近红外波段)区分较为明显。裸土类端元光谱反射率随波长的增大而增大。

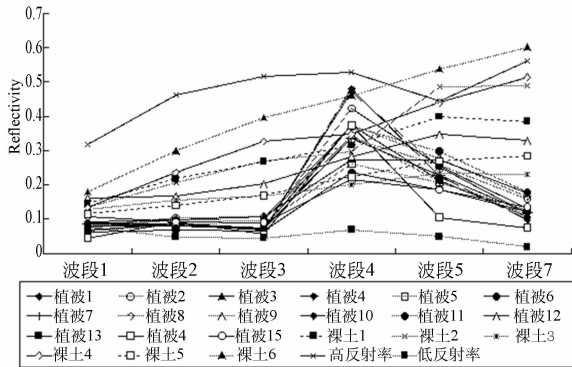


图 2 端元光谱曲线

Fig. 2 Endmember spectral curve

### 3.2.2 MESMA 及其优化

#### a. MESMA 原理<sup>[14]</sup>

MESMA 是由 Robert 等<sup>[14]</sup>在混合像元分解模型(Spectral Mixture Analysis, SMA)的基础上发展起来的。SMA 是具有物理意义的分解模型,它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:

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

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  $\alpha$  为该像元中各端元的丰度(abundance), $n$  为  $m$  维高斯随机噪声。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,然后从中确定最佳端元模型,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。

#### b. MESMA 优化

在 MESMA 算法中,每个端元模型中均加入阴影端元,分解时定义为反射率为 0 的值。在本研究区沼泽、湿地分布较广,水体是实际存在的地物,因而,本研究不是把阴影定义为反射率为 0 的值,而是改用具有低反射率的沼泽中的水体、云影等暗物质光谱代替。

MESMA 方法采用所有端元丰度和为 1 和分解均方根误差(RMS)  $\leq 0.025$  的约束条件。

本研究在实施 MESMA 分解时,不仅采用了以上两种限制,还使用了各实际存在的在  $[0, 1]$  之间地物端元丰度,从而进一步提高了分解的合理性。

另外,在各具有相同端元数模型分解完成后,本研究根据实际分解情况,制定了最优分解模型的选择标准进行最终分解结果的选择。利用改进后的 MESMA 进行多端元混合像元分解,得到研究区的植被和裸土丰度,结合“黑土滩”的形成机制提取研究区的“黑土滩”信息。技术路线如图 3 所示。

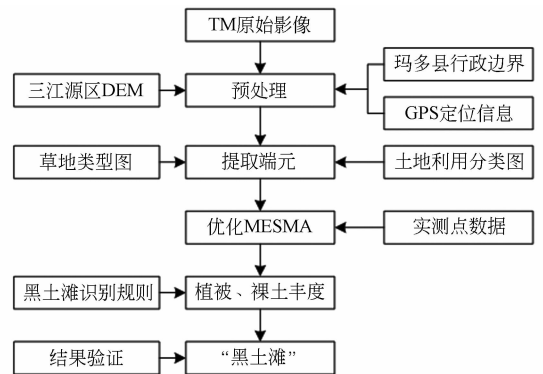


图 3 技术路线图

Fig. 3 Methodological flowchart

## 4 “黑土滩”提取与精度验证

### 4.1 “黑土滩”识别规则

“黑土滩”是高寒草甸严重退化后形成的大面积次生裸地和稀少植被相间的一种景观表现,因此,对“黑土滩”的判定需要综合植被和裸土的丰度才有效,将低植被覆盖区作为“黑土滩”,即植被丰度  $< 30\%$  或者裸土丰度  $> 50\%$  的区域为“黑土滩”<sup>[1,2,5,8]</sup>。根据“黑土滩”的定义,只有海拔在特

定范围内的高寒草甸才会形成“黑土滩”,离开这两个特殊条件不会形成“黑土滩”<sup>[1,7,21]</sup>。综上,“黑土滩”识别原则如下:

- (1) 植被丰度 < 30% 或者裸土丰度 > 50%;
- (2) 分布在海拔 3 600~4 800 m 之间;
- (3) 分布在高寒草甸分布区。

经过程序的运行,得到满足(1)的分布区域,再通过 ARCGIS 的叠加分析,排除不符合(2)、(3)的区域,最终得到玛多县“黑土滩”的空间分布,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。

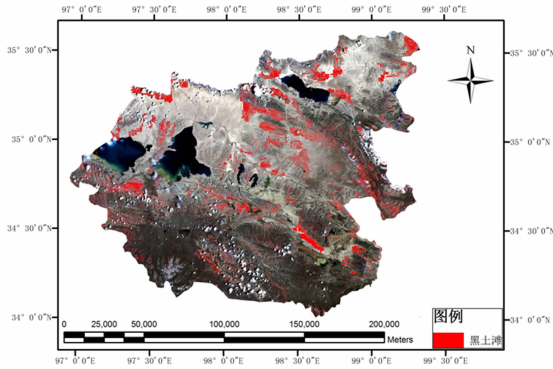


图 4 玛多县“黑土滩”分布图(红色代表“黑土滩”)

Fig. 4 “Black Soil Land” distribution in Maduo County(red means “Black Soil Land”)

### 4.2 “黑土滩”识别精度验证

利用以上优化方法及识别规则对影像进行“黑土滩”提取。利用 128 个实测点数据对提取结果进行精度验证,部分数据见表 2,其中 1 表示为“黑土滩”,0 表示为非“黑土滩”。本文方法的“黑

表 2 精度验证数据节选

Tab. 2 Part of precision validation data

ID	实测	MMESMA	MESMA	ID	实测	MMESMA	MESMA
1	0	0	1	11	1	1	1
2	0	0	1	12	0	0	0
3	0	0	0	13	1	1	1
4	0	0	1	14	0	0	1
5	0	0	0	15	0	0	1
6	0	0	0	16	0	0	0
7	0	0	0	17	0	0	0
8	0	0	0	18	1	0	0
9	0	0	0	19	0	0	0
10	0	0	0	20	1	0	0

土滩”识别精度为 82.81%,利用相同的光谱库对影像进行 MESMA 分解,提取出“黑土滩”,精度为 71.09%。本文方法对“黑土滩”的识别精度有较大提高。

### 4.3 玛多县“黑土滩”的空间格局特征与成因分析

据本研究结果统计(见黑土滩空间分布图 4)玛多县共有“黑土滩”1 592 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 6.92%。其中花石峡镇最多,为 763 km<sup>2</sup>,其他依次为扎陵湖乡 420 km<sup>2</sup>、黑河乡 182 km<sup>2</sup> 和黄河乡 227 km<sup>2</sup>。整体上来看,“黑土滩”主要分布在北部的冬格纳措湖周边,且连片分布。这部分区域牧民过度放牧,造成这部分区域低植被和高裸土覆盖的现象,与人类活动密切相关。同时,摆万奇<sup>[22]</sup>等人研究也表明过度放牧是造成玛多县草地退化的主要原因。扎陵湖、鄂陵湖以南的草地覆盖较好,这从 3、2、1 波段组合的 TM 影像上就可以看出,该区域颜色较深,“黑土滩”分布也较少。

## 5 结 论

本文应用遥感技术对玛多县“黑土滩”进行了定量识别,玛多县共有“黑土滩”1 592 km<sup>2</sup>,占草地总面积的 6.92%。应用优化后的 MESMA 方法,提取“黑土滩”精度相对 MESMA 法有较大提高,整体精度为 82.81%,为玛多县的“黑土滩”遥感监测研究提供了有效方法。应用多时相的遥感图像,还可以对玛多县“黑土滩”进行动态监测,为草地治理和恢复提供决策支持。

由于气候、水热条件、地形地貌和人类活动的区域差异,玛多县“黑土滩”具有明显的空间分异性。在气候变化敏感区域、河道两侧和靠近居民点等人类活动较为频繁区域“黑土滩”现象较为严重。境内牧民的过度放牧、鼠害以及自然灾害是造成玛多县草地退化的重要原因<sup>[23]</sup>。

在秋冬季节,草场表现为黄色的草皮,而这时的“黑土滩”,由于毒害草枯莠,只留下细高的草秆、地表的黑土显现出来。此时的“黑土滩”特征很明显。所以调查“黑土滩”退化草地,采用目视解译时通常使用秋季或深秋的卫星影像<sup>[24]</sup>。本研究选用的 TM 遥感影像,属夏季草地生长旺盛的时期,取得了较好的研究精度(82.81%)。如

选用秋季或深秋的数据,将需要处理枯草和裸土的区分问题,对宽波段影像识别效果如何,有待在今后的研究中加以证实。

虽然优化后的 MESMA 分解了大部分像元,但仍然有小部分像元未被合理分解。在以后的研究中将继续分析研究这部分像元未被分解的原因,对这部分像元再处理使未分解像元数减到最小。本研究区仅是三江源区的一部分,下一步的工作是将本文方法推广应用到全区的“黑土滩”遥感识别中。

## 参考文献:

- [1] 马玉寿,郎百宁,王启基. “黑土型”退化草地研究工作的回顾与展望[J]. 草业科学,1999,16(2):5-8.  
MA Y S, LANG B N, WANG Q J. Review and prospect of the study on black soil type deteriorated grassland [J]. *Pratacultural Science*, 1999, 16(2): 5-8. (in Chinese)
- [2] 杨振宇. 玛曲草原“黑土滩”分布特征及其植被演替规律的研究[D]. 兰州:兰州大学,2005.  
YANG Z Y. *Study on distribution characteristics and vegetation succession rules of black soil beach in Maqu grassland* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005. (in Chinese)
- [3] 尚占环,龙瑞军,马玉寿. 江河源区“黑土滩”退化草地特征、危害及治理思路探讨[J]. 中国草地学报, 2006, 28(1):69-74.  
SHANG Z H, LONG R J, MA Y S. Discussion on restoration and rebuilding of ‘Black Soil Patch’ degraded meadow in the headwater area of Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2006, 28(1):69-74. (in Chinese)
- [4] 马玉寿. 三江源区“黑土型”退化草地形成机理与恢复模式研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2006.  
MA Y S. *Study on formation mechanism of “Black Soil Type” degraded Grassland and restoring in the source region of Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers* [D]. Lanzhou: Pratacultural Faculty of Gansu Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [5] 李永花,王苑,赵成福. 三江源地区黑土滩的遥感图像解译[J]. 测绘技术装备, 2008,4(10):38-41.  
LI Y H, WANG Y, ZHAO F C. Remote sensing image interpretation of “Black Soil Land” in the Source Region of Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers [J]. *Geomatics Technology and Equipment*,

## 6 致 谢

感谢中国科学院地理科学与资源研究所刘纪远研究员、邵全琴研究员和樊江文研究员的指点和帮助! 感谢课题组全体老师的帮助以及提供的实验数据! 黄麟博士、肖桐博士、赵志平博士、孙朝阳博士、陈卓奇博士、陈志霞硕士等参加了三江源实地考察、数据测量整理工作,在此深表谢意!

- 2008,4(10):38-41. (in Chinese)
- [6] 刘晓玲. 三江源自然保护区“黑土滩”退化草地调查[J]. 青海师范大学学报:自然科学版,2007,1:93-96.  
LIU X L. The investigation for degenerate grassland of “Degenerated Meadow” in San jiang yuan Nature Reserve[J]. *Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 1: 93-96. (in Chinese)
- [7] 李积兰,李希来,唐燕,等. 三江源头“黑土滩”草地分布现状及退化特征研究[J]. 草业与畜牧,2009,2:6-13.  
LI J L, LI X L, TANG Y, et al.. Research on “black soil land” distribution and degradation characteristics[J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2009, 2:6-13. (in Chinese)
- [8] 李晶莹,殷清军. 基于 QuickBird 影像三江源区达日县“黑土滩”的研究[J]. 新疆农垦科技,2011,1:69-71.  
LI J Y, YIN Q J. Research on “Black Soil Land” of Dari County in Three-river Source Region based on QuickBird image[J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2011, 1: 69-71. (in Chinese)
- [9] 陈全功. 江河源区草地退化与生态环的综合治理[J]. 草业学报,2007,16(1):10-15.  
CHEN Q G. Grassland deterioration in the source region of the Yangtze-yellow rivers and integrated control of the ecological environment [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(1): 10-15. (in Chinese)
- [10] 周华坤,周立,刘伟,等. 青海省玛多县草地退化原因及畜牧业可持续发展[J]. 中国草地,2003,25(6):63-67.  
ZHOU H K, ZHOU L, LIU W, et al.. Causes of grassland degradation and sustainable development

- of animal husbandry in Maduo County, Qinghai Province[J]. *Grassland of China*, 2003, 25(6): 63-67. (in Chinese)
- [11] 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.  
LIU J Y, XU X L, SHAO Q Q. 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. (in Chinese)
- [12] 张懿铨,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.  
ZHANG Y L, LIU L S, BAI W Q, *et al.*. Grassland degradation in the source region of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 3-14. (in Chinese)
- [13] JU J CH, KOLACZYK E D. Gaussian mixture discriminant analysis and sub-pixel land cover characterization in remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 550-560.
- [14] ROBERTS D A. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple Endmember spectral mixture models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65: 267-279.
- [15] ECKMANN T C, ROBERTS D A, STILL C J. Using multiple endmember spectral mixture analysis retrieve subpixel fire properties from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3773-3783.
- [16] DENNISON P E, ROBERTS D A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 123-135.
- [17] THORP K R, FERNCH A N, RANGO A. Effect of image spatial and spectral characteristics on mapping semi-arid rangeland vegetation using multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 120-130.
- [18] LIU T, YANG X J. Mapping vegetation in an urban area with stratified classification and multiple endmember spectral mixture analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 251-264.
- [19] 徐剑波,陈进发,胡月明,等. 青海省玛多县草地退化现状及动态变化研究[J]. *草业科学*, 2011, 28(3): 359-364.  
XU J B, CHEN J F, HU Y M, *et al.*. Research on the status and the dynamic of grassland degradation in Maduo County, Qinghai Province [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(3): 359-364. (in Chinese)
- [20] DENNISON P E, ROBERTS D A. Robrets The effect of vegetation phenology on endmember selection and species mapping in southern California chaparral [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 295-309.
- [21] 殷青军,汪青春,杨英莲,等. 青海玛多县草地资源遥感动态监测及分析[J]. *青海气象*, 2001, 3: 9-14.  
YING Q J, WANG Q C, YANG Y L, *et al.*. Remote sensing dynamic monitoring and analysis of rangeland resources in Maduo County, Qinghai Province [J]. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2001, 3: 9-14. (in Chinese)
- [22] 摆万齐,张懿铨,谢高地,等. 黄河源区玛多县草地退化成因分析[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 823-826.  
BAI W Q, ZHANG Y L, XIE G D, *et al.*. Analysis of formation causes of grassland degradation in Maduo County in the source region of Yellow River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 823-826. (in Chinese)
- [23] 徐剑波,宋立生,赵之重,等. 近15a来黄河源地区玛多县草地植被退化的遥感动态监测[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(4): 615-622.  
XU J B, SONG L S, ZHAO Z Z, *et al.*. Monitoring grassland degradation dynamically at Maduo County in source region of Yellow River in past 15 years based on remote sensing [J]. *Arid land Geography*, 2012, 35(4): 615-622. (in Chinese)
- [24] 刘海军,魏晓琴. 3S技术在三江源区“黑土滩”退化草地调查中的应用[J]. *青海国土经略*, 2007, 3: 29-31.  
LIU H J, WEI X Q. Application of 3S technology in “Black Soil Land” degradation investigation [J]. *Qinghai Guotu Jinglue*, 2007, 3: 29-31. (in Chinese)

## 作者简介:



安 如(1963—),女,江苏淮安人,博士,教授,博士生导师,1984年于南京大学获理学学士学位,2007年于南京大学获得理学博士学位,主要从事遥感、地理信息系统的教学、研究与应用工作。E-mail: anrunj@163.com



李晓雪(1987—),女,甘肃定西人,硕士,2012年于河海大学获得硕士学位,主要从事遥感应用的研究。E-mail: lixiaox1987@yahoo.com.cn



徐晓峰(1988—),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要从事遥感信息机理与应用的研究。E-mail: 695367020@qq.com



梁 欣(1987—),男,山西阳泉人,硕士,2013年于河海大学获得硕士学位,主要从事地理信息系统与遥感的研究。E-mail: 714389402@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)