

## 基于端元可变的喀斯特地形复杂区石漠化信息提取

阮 欧<sup>1,2</sup>, 刘绥华<sup>1,2\*</sup>, 罗 杰<sup>1,2</sup>, 胡海涛<sup>1,2</sup>

1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025

2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025

**摘 要** 喀斯特山区因地形复杂、地表破碎等特点使得遥感影像中阴影、混合像元及光谱变异现象普遍存在,传统基于多光谱遥感的像元二分法(DPM)在光谱变异和阴影显著的区域难以准确的对喀斯特石漠化(KRD)信息进行提取。采用高光谱遥感的混合像元分解技术可将复杂的混合像元分解为纯净的地物光谱与各地物光谱对应的混合比例,为复杂山区获取更高精度的石漠化信息提供可能。然而,由于光照、环境及大气等诸多因素的变化会引起端元发生不同程度变异,导致在混合像元分解过程中出现显著的误差,其次要从地形复杂、地表异质性强的山区影像上直接获取地物纯净光谱建立用于应对光谱变异的光谱库极其困难。因此,如何在应对光谱变异和地形效应,获取有效、准确的对石漠化信息进行提取是当前研究的重点。针对以上问题,采用通过模拟由光照条件造成的地物反射率变化,并考虑每个波长间隔光谱变异情况的广义线性混合模型(GLMM),以减轻喀斯特地区石漠化信息提取过程中光谱变异与地形效应的影响。首先,从GF-5 高光谱影像中提取喀斯特地区主要地物(植被、裸岩、裸土)的典型代表性光谱,然后基于提取的地物光谱模拟不同光照下每个像元光谱的变异情况,选择最适合的光谱组合对像元进行分解,得到最优的解混效果。为了验证方法的可靠性,利用高分辨率影像目视解译的结果作为参考对方法预测结果进行验证,同时选择未考虑端元变异的全限制最小二乘法(FCLS)和DPM进行对比。结果表明,在地形高度复杂的喀斯特山区,考虑阴影、混合像元及光谱变异是必要的,GLMM在石漠化信息提取中总精度达到了84.89%,明显高于其他两种方法的59.68%和67.34%。通过对光照区和阴影区分别进行精度检验,发现GLMM在光照区与阴影区有着相似的精度表现,而另外两者则差异较大,阴影区明显低于光照区。这反映GLMM能较为有效地减轻地形效应的影响,对喀斯特石漠化信息提取的精度有一定提升。

**关键词** 光谱混合分解; 广义线性混合模型; 石漠化信息提取; 地形效应

**中图分类号:** TP753

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2269-09

### 引 言

喀斯特地区是典型的生态脆弱区,受其特殊的地质环境的影响,生态环境和抗干扰能力都较差<sup>[1]</sup>。喀斯特石漠化(KRD)是一种特殊类型的土地退化,由于土壤被水侵蚀导致基岩广泛裸露,使得土地的承载力明显下降,形成类似荒漠的景观,喀斯特石漠化已成为目前我国最严重的生态环境问题<sup>[2]</sup>,同时也是导致山区农村经济贫困的根源<sup>[3]</sup>。在石漠化发生时,当地的生态系统会发生逆向演替,在这一过程中,土壤不断流失导致植被退化或消失,裸露的基岩成为最明显的地表特征<sup>[4]</sup>。基岩裸露率和植被覆盖率被认为是评价喀斯

特石漠化的关键生态指标<sup>[5]</sup>。因此如何快速、准确的获取基岩裸露率和植被覆盖率是监测石漠化的关键问题。

遥感是一种先进的对地观测手段,可以提供大范围、多时相、多光谱的地面信息,已被广泛用于地物分布和人类活动的监测中<sup>[6]</sup>。当前对喀斯特地区植被和裸岩的提取大多都是基于中等分辨率多光谱的遥感数据利用像元二分法(DPM)进行的。然而,喀斯特地区因其地形复杂多变、地表异质性强和阴影效应明显等特点,常常在较小范围内同时存在植被、裸土、裸岩和阴影等,导致在遥感影像的一个像素中包含多种地物,而多光谱数据由于其分辨率和波段数的限制,使得基于传统DPM方法估算植被覆盖度和裸岩率的精度会受到较大的影响。相比之下,高光谱遥感具有光谱数量

收稿日期: 2021-06-09, 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61540072)资助

作者简介: 阮 欧, 1995年生, 贵州师范大学地理与环境科学学院硕士研究生 e-mail: RUANOU1995@163.com

\* 通讯作者 e-mail: lsh23h@163.com

多的特点,可以建立各个地物的端元矩阵,通过光谱解混模型计算混合像元中包含的光谱成分和各地物在像元中的比例,从而获得比多光谱遥感更好的地物识别效果<sup>[7]</sup>。当前,运用最多、场景最广的混合像元分解模型是线性混合模型(linear spectral mixture model, LSMM),其原理是假设地表有多种物质,太阳入射光线仅和其中一种地物发生作用,各地物之间并没有相互作用,每个光子只能“看到”一种地表物质并按一定的比例叠加到相机的传感器上,通过将混合像元的光谱假设为几种地物光谱线性组合进行解混,从而达到提取不同地物占比的目的<sup>[8-9]</sup>。然而在实际的场景中,地表受大气、光照条件及地形等的影响,地物光谱会发生不同程度的变异,特别是在光照不足的阴影区地物反射率会变得很低,因此考虑端元的变异性是必须的<sup>[10-11]</sup>。针对混合像元分解过程中光谱变异的问题,在 20 世纪 80 年代末,Roberts 等<sup>[12]</sup>提出了多端元光谱混合分析(multiple endmember spectral mixture analysis, MESMA),通过建立地物端元库,枚举出最优端元组合,以解决端元的变异问题,但该方法端元组合最多不超过 4 个。Song 等<sup>[13]</sup>将某些特定端元出现的几率在端元选取过程中考虑进来,提出了贝叶斯光谱混合分析。Rogge<sup>[14]</sup>等提出了迭代光谱混合分析(iterative spectral mixture analysis, ISMA),通过逐一去除像元中最小丰度值的端元,利用重构误差变化量确定每个像元的最优端元集。但上述方法计算较慢,并且对端元集的建立比较困难。Lucas Drumetz 等<sup>[15]</sup>通过对角矩阵乘端元的方法有效地模拟由光照影响的地表物质反射率的变化,以解决端元的变异情况,同时提高计算效率,该方法被称为扩展线性模型(ELMM),这一方法有着明确的物理机制。虽然 ELMM 在

光谱可变性主要由照明变化引起的情况下表现良好,但当端元受到更复杂的环境时光谱会失真,并且该模型假设所有波长都有固定的缩放,因此,它缺乏必要的灵活性。针对以上问题,Imbiriba 等<sup>[16]</sup>在 ELMM 的理论基础上提出了广义线性混合模型(generalized linear mixing model, GLMM),考虑了每个波长间隔的光谱变异情况,依据波段的比例因子来适应端元光谱的任意变化。

喀斯特地区由于特殊的环境,阴影效应、混合像元及光谱变异的现象普遍存在,且由于地形复杂、地物分布破碎,在影像中直接提取地表物质的端元建立相应的端元库较为困难。针对以上问题,基于考虑端元变异的广义线性混合扩展模型(GLMM)并与未考虑端元变异的最小二乘法(FCLSU)和传统的像元二分法进行比较,探讨 GLMM 方法在喀斯特地区的对石漠化信息提取的适用性,为石漠化监测提供技术参考。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

研究区位于威宁西部,牛栏江东部,与云南接壤,经纬度在  $103^{\circ}45'43''$ — $103^{\circ}54'11''$ ,  $26^{\circ}49'51''$ ~ $26^{\circ}57'58''$ N 之间,面积  $25 \text{ km}^2$ ,属于亚热带季风性湿润气候,年平均降雨  $926 \text{ mm}$ ,全年温差较小。该地峰壑交错,碳酸盐岩分布广泛,地形起伏大,平均海拔  $2\ 200 \text{ m}$ ,人口密度大,人多地少,强烈的人为活动干扰和土壤侵蚀导致植被退化,岩石广泛裸露,是典型的石漠化研究区。

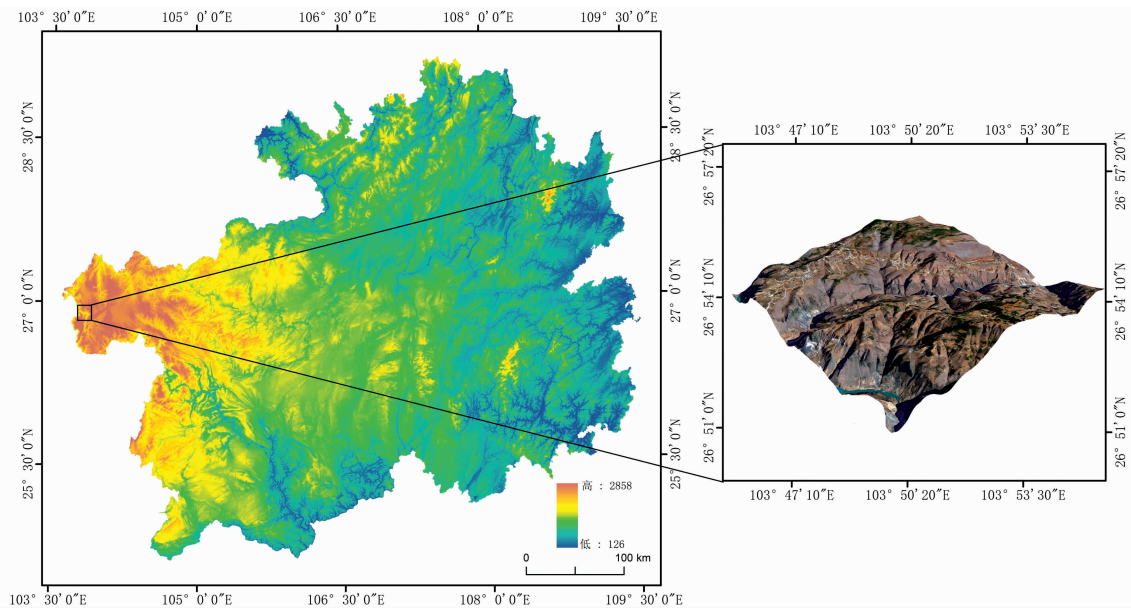


图 1 研究区位置及地形图

Fig. 1 Location and topographic map of study area

### 1.2 数据来源

本工作的数据主要包括 GF-5 高光谱数据、GF-2 和 GF-6 高分辨率数据及 DEM 数据。GF-5 和 GF-6 成像时间为

2020 年 1、2 月份,GF-2 成像时间为 2019 年 2 月,以上数据均来自高分贵州分中心。其中经过大气校正、坏波段剔除、条带去除、地形校正的 GF-5 高光谱数据用于混合像元分解、

植被覆盖度计算和裸岩率计算。GF-2 和 GF-6 高分辨率数据的预处理主要是以 GF-5 为参考采用二次多项式进行几何校正，然后用于地物目视解译以验证各方法提取石漠化信息的精度。DEM 高程数据来自于地理空间数据云，分辨率为 30m。数据源详细参数见表 1。

表 1 数据源参数

Table 1 Parameters of data source

| 数据源  | 时间         | 参数                       | 获取方式    |
|------|------------|--------------------------|---------|
| GF-2 | 2019 年 1 月 | 多光谱 4 波段，全色<br>分辨率 0.8 m |         |
| GF-5 | 2020 年 1 月 | 高光谱 330 波段，分<br>辨率 30 m  | 高分贵州分中心 |
| GF-6 | 2020 年 2 月 | 多光谱 4 波段，全色<br>分辨率 2 m   |         |
| DEM  | /          | 分辨率 30 m                 | 地理空间数据云 |

1.3 方法

1.3.1 端元提取

端元提取采用顶点成分分析法 (vertical component analysis, VCA)，该方法基于凸面几何理论以数据中存在纯像元为前提进行端元提取，该方法考虑了地形的起伏变化，运用凸锥对数据进行建模，原理如图 2 所示，将影像中所有的像元投影到随机方向上，将其中最大的投影像元作为第一端元，通过迭代方式将数据投影到与由已提取端元构成的子空间正交方向上的方法来提取其余端元。将影像中提取的所有植被、裸岩、裸土的端元各自平均，得到能普遍代表植被、裸岩、裸土的端元用于混合像元分解，提取的端元如图 3 所示(a 为提取的所有地物端元，b 为各地物端元的平均波谱)。

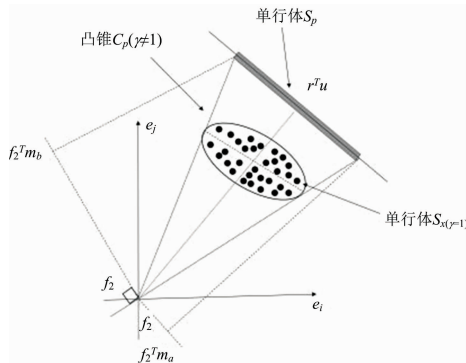


图 2 VCA 原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VCA principle

1.3.2 广义线性混合模型

广义线性混合模型 (GLMM) 是为了弥补线性扩展模型 (ELMM) 不能考虑每个波长间隔的光谱可变性的一个延展，其原理是采用一个与谱带相关的缩放因子，使其能够适应端元光谱的任意变化<sup>[15-16]</sup>。在 GLMM 模型中每个像元  $r_n$  用式 (1) 表示

$$r_n = (M \odot \Psi_n) a_n + e_n \quad (1)$$

式(1)中,  $\Psi_n \in \odot^{L \times R}$  ( $L$  为波段、 $R$  为端元) 是一个缩放因子,

$[\Psi_n]_{l, \kappa} = \Psi_{nl, \kappa} \geq 0$ ,  $\odot$  是一个 Hadamard 乘积。该模型是 ELMM 的一种推广, ELMM 具体原理参考文献[16], 其中缩放矩阵  $\Psi_n$ , 可以单独作用于每个端元的每个波长, 允许考虑每个端元光谱不一致的变量, 这样使得模型变得更加灵活。因此, ELMM 只是 GLMM 的一种特殊情况, GLMM 可以用于每个波长范围任意粒度级别的变化, 以至于达到每个像素中每个端元的每个波长分量独立缩放的极限。

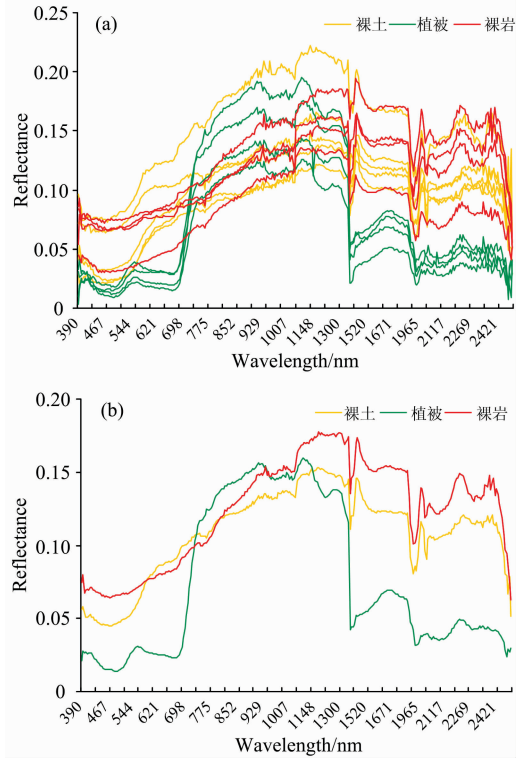


图 3 各地物光谱曲线图

Fig. 3 Spectral curves of local objects

1.3.3 像元二分法模型 (DPM)

(1) 植被覆盖度计算

采用 DPM 计算植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC), 基于归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 的 DPM 对研究区的植被覆盖度进行估计, NDVI 计算公式为式 (2)

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2)$$

式(2)中,  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_{RED}$  分别为中心波长为 860 与 660 nm 的反射率, 预处理后 GF-5 对应的波段分别为 111 和 64。

根据上述公式计算研究区的 NDVI 值。NDVI 值服从正态随机分布, 其小于 5% 和大于 95% 的值不是植被覆盖程度的反映。选择 NDVI=5% 的值为  $NDVI_{min}$ , NDVI=95% 的值为  $NDVI_{max}$ , 按照如式(3)计算植被覆盖度

$$f_c = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (3)$$

(2) 岩石裸露率计算

计算方法与植被覆盖度计算方法类似, DPM 是基于 NDVI 计算的, 计算公式分别如式(4)和式(5)

$$\text{NDRI} = \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_b + \rho_a} \quad (4)$$

$$f_r = (\text{NDRI} - \text{NDRI}_0) / (\text{NDRI}_r - \text{NRVI}_0) \quad (5)$$

根据岩石在 GF-5 影像上的光谱特征,  $\rho_b$  和  $\rho_a$  分别取中心波长为 2 355 和 2 335 nm 处的反射率。根据以往研究本工作选取累积频率为 95% 和 5% 的 NDRI 为  $\text{NDRI}_r$  和  $\text{NRVI}_0$ 。

#### 1.3.4 精度验证

采用误差矩阵对植被覆盖度和岩石裸露率进行精度验证。Kappa 系数用于评估预测的植被覆盖度和岩石裸露率的准确度, 同时还计算了每个类别的总体精度、用户精度(UA)及生产者精度(PA)。根据石漠化评估指标将植被覆盖度和岩石裸露率各分为 5 个等级(0~10%, 10%~35%, 35%~50%, 50%~70% 和 70%~100%)。石漠化地面参考数据主要是通过 GF-2 与 GF-6 协同目视解译提取的, 两者分辨率分别为 0.8 和 2 m, 根据实地调查, 提取的地物与实际分布状况是相符合的。根据目视解译结果参照 GF-5 分辨率建立对应的 30 m×30 m 的网格, 并计算每个网格中植被与岩石的占比, 同样将植被覆盖度和岩石裸露率分为 5 个等

级, 最后得到用于验证样本共 940 个, 其中光照区 720 个, 阴影区 220 个。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各方法石漠化信息提取总体精度评价

以高分辨率遥感影像解译结果作为参考, 验证 GLMM, FCLSU 和 DPM 预测的精度。从表 2 中可以看出 GLMM 方法预测结果无论是在光照区还是阴影区都是最好的, 所有区域总精度达到了 84.89%, Kappa 系数为 0.767, 明显高于 FCLSU 的 59.68% 和 DPM 的 67.34%。从光照区和阴影区的精度来看, GLMM 在光照区与阴影区都有着较好的分类精度, 其中光照区精度为 86.81%, 阴影区为 78.18%。相比之下, 虽然 FCLSU 和 DPM 在光照区有着较好的表现, 精度分别为 66.52% 和 74.44%, 但在阴影区两种方法的精度明显下降, 仅为 35.91% 和 44.09%, Kappa 系数也非常低, 仅为 0.111 和 0.061。

表 2 估计的植被和裸岩覆盖度百分比总体精度(OA)和 Kappa 系数

Table 2 Overall accuracy (OA) and Kappa coefficient of estimated vegetation and bare rock coverage percentage

|       | 光照区   |       |       | 阴影区   |       |       | 所有区域  |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | GLMM  | SCLSU | DPM   | GLMM  | SCLSU | DPM   | GLMM  | SCLSU | DPM   |
| OA/%  | 86.81 | 66.53 | 74.44 | 78.18 | 35.91 | 44.09 | 84.89 | 59.68 | 67.34 |
| Kappa | 0.767 | 0.451 | 0.553 | 0.559 | 0.111 | 0.061 | 0.723 | 0.357 | 0.433 |

### 2.2 植被覆盖度和基岩裸露率提取精度评价

利用光照区域和阴影区域的精度评价混淆矩阵, 探讨各方法预测植被覆盖度及基岩裸露率的精度。从表 3 可以看出, 在光照区 GLMM 能较好地预测每一个等级的植被覆盖率与裸岩率, 两者用户精度均在 63%~95% 之间, 相对来说 GLMM 对 20%~35% 区间的覆盖率预测稍差, 植被与裸岩的覆盖度精度都只在 65% 左右。FCLSU 对高植被覆盖度和低植被覆盖度区域的预测较好, 用户精度在 75.61%~84.43% 之间, 但在中等覆盖度预测效果较差, 用户精度都在 49% 以下, 在对裸岩率的预测上 FCLSU 除了对裸岩率高的区域能有较好的预测外其他等级预测结果与实际相差较

大。DPM 对植被的预测除小于 10% 的低覆盖度地区较差外对其他等级的预测较为准确, 精度在 58.70%~77.36% 之间, 但是对岩石裸露率的预测除了 70%~100% 的高覆盖区预测精度达到 95.29% 以外, 其他等级的精度都较差, 特别是对 20%~70% 区间的覆盖度几乎都没成功预测。相比之下, 对阴影区植被和裸岩的预测, 各方法都有不同程度的下降。在植被覆盖度预测上, GLMM 对 70%~100% 覆盖度的预测达到了 91.75%, 在 0%~70% 的预测精度明显低很多, 准确度仅在 33.33%~66.67% 之间, 在对裸岩的预测上, 低于 10% 的低覆盖区与高于 70% 的高覆盖区域, GLMM 都能有一个较好的预测结果, 预测精度在 84.48%~90.00% 之间,

表 3 光照区与和阴影区域各方法结果精度验证混淆矩阵

Table 3 Confusion matrix of accuracy verification of results in illumination area and shadow area

| GLMM_光照区<br>基岩裸露率/% | 参考数据     |           |           |           |            |      | GLMM_光照区<br>植被覆盖度/% | 参考数据     |           |           |           |            |      |      |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------|------|
|                     | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 | PA/% |                     | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 | PA/% |      |
| 反演<br>数据            | 0~20     | 29        | 0         | 0         | 0          | 0    | 100.0               | 0~20     | 36        | 9         | 1         | 0          | 0    | 78.3 |
|                     | 20~35    | 2         | 4         | 1         | 0          | 0    | 57.1                | 20~35    | 5         | 36        | 5         | 0          | 1    | 76.6 |
|                     | 35~50    | 0         | 2         | 6         | 2          | 0    | 60.0                | 35~50    | 0         | 12        | 31        | 4          | 0    | 66.0 |
|                     | 50~70    | 0         | 0         | 1         | 16         | 15   | 50.0                | 50~70    | 0         | 0         | 6         | 34         | 18   | 58.6 |
|                     | 70~100   | 0         | 0         | 0         | 3          | 240  | 98.8                | 70~100   | 0         | 0         | 0         | 8          | 193  | 96.0 |
| UA/%                | 93.5     | 66.7      | 75.0      | 76.2      | 94.1       |      |                     | UA/%     | 87.8      | 63.2      | 72.1      | 73.9       | 91.0 |      |

续表 3

| FCLSU_光照区<br>基岩裸露率/% |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%   | FCLSU_光照区<br>植被覆盖度/% |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%  |
|----------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|----------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
|                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |        |                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |       |
| 反演<br>数据             | 0~20   | 11       | 0         | 0         | 0         | 0          | 100.0  | 反演<br>数据             | 0~20   | 31       | 26        | 5         | 0         | 1          | 49.2  |
|                      | 20~35  | 12       | 1         | 0         | 1         | 0          | 7.1    |                      | 20~35  | 4        | 18        | 17        | 2         | 0          | 43.9  |
|                      | 35~50  | 6        | 4         | 1         | 0         | 0          | 9.1    |                      | 35~50  | 1        | 8         | 14        | 16        | 5          | 31.8  |
|                      | 50~70  | 2        | 1         | 4         | 7         | 4          | 38.9   |                      | 50~70  | 2        | 4         | 6         | 22        | 27         | 36.1  |
|                      | 70~100 | 0        | 0         | 3         | 13        | 251        | 94.0   |                      | 70~100 | 3        | 1         | 1         | 6         | 179        | 94.2  |
|                      | UA/%   | 35.5     | 16.7      | 12.5      | 33.3      | 98.4       |        |                      | UA/%   | 75.6     | 31.6      | 32.6      | 47.8      | 84.4       |       |
| DPM_光照区<br>基岩裸露率/%   |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%   | DPM_光照区<br>植被覆盖度/%   |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%  |
|                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |        |                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |       |
| 反演<br>数据             | 0~20   | 16       | 1         | 2         | 2         | 2          | 69.6   | 反演<br>数据             | 0~20   | 17       | 5         | 0         | 0         | 0          | 77.3  |
|                      | 20~35  | 3        | 0         | 0         | 0         | 1          | 0.0    |                      | 20~35  | 24       | 38        | 5         | 1         | 1          | 55.1  |
|                      | 35~50  | 6        | 2         | 0         | 1         | 6          | 0.0    |                      | 35~50  | 0        | 14        | 28        | 16        | 5          | 44.4  |
|                      | 50~70  | 1        | 0         | 0         | 3         | 3          | 42.9   |                      | 50~70  | 0        | 0         | 10        | 27        | 42         | 34.2  |
|                      | 70~100 | 5        | 3         | 6         | 15        | 243        | 89.3   |                      | 70~100 | 0        | 0         | 0         | 2         | 164        | 98.8  |
|                      | UA/%   | 51.6     | 0.0       | 0.0       | 14.3      | 95.3       |        |                      | UA/%   | 41.5     | 66.7      | 65.1      | 58.7      | 77.4       |       |
| GLMM_阴影区<br>基岩裸露率/%  |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%   | GLMM_阴影区<br>植被覆盖度/%  |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%  |
|                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |        |                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |       |
| 反演<br>数据             | 0~20   | 9        | 2         | 1         | 0         | 0          | 75.0   | 反演<br>数据             | 0~20   | 6        | 4         | 1         | 0         | 0          | 54.5  |
|                      | 20~35  | 0        | 1         | 0         | 0         | 0          | 100.0  |                      | 20~35  | 7        | 2         | 1         | 0         | 0          | 20.0  |
|                      | 35~50  | 1        | 0         | 1         | 1         | 1          | 25.0   |                      | 35~50  | 1        | 0         | 4         | 0         | 0          | 80.0  |
|                      | 50~70  | 0        | 0         | 1         | 2         | 8          | 18.2   |                      | 50~70  | 0        | 0         | 0         | 9         | 8          | 52.9  |
|                      | 70~100 | 0        | 0         | 0         | 3         | 49         | 94.2   |                      | 70~100 | 0        | 0         | 0         | 8         | 89         | 91.8  |
|                      | UA/%   | 90.0     | 33.3      | 33.3      | 33.3      | 84.5       |        |                      | UA/%   | 42.9     | 33.3      | 66.7      | 52.9      | 91.8       |       |
| FCLSU_阴影区<br>基岩裸露率/% |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%   | FCLSU_阴影区<br>植被覆盖度/% |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%  |
|                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |        |                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |       |
| 反演<br>数据             | 0~20   | 2        | 0         | 0         | 0         | 0          | 100.00 | 反演<br>数据             | 0~20   | 9        | 6         | 3         | 1         | 1          | 45.0  |
|                      | 20~35  | 1        | 0         | 1         | 0         | 0          | 0.00   |                      | 20~35  | 4        | 0         | 1         | 11        | 26         | 0.0   |
|                      | 35~50  | 0        | 0         | 0         | 0         | 0          | /      |                      | 35~50  | 0        | 0         | 1         | 3         | 39         | 2.3   |
|                      | 50~70  | 6        | 3         | 1         | 0         | 0          | 0.00   |                      | 50~70  | 1        | 0         | 1         | 2         | 24         | 7.1   |
|                      | 70~100 | 1        | 0         | 1         | 6         | 58         | 87.88  |                      | 70~100 | 0        | 0         | 0         | 0         | 7          | 100.0 |
|                      | UA/%   | 20.00    | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 100.00     |        |                      | UA/%   | 64.3     | 0.0       | 16.7      | 11.8      | 7.2        |       |
| DPM_阴影区<br>基岩裸露率/%   |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%   | DPM_阴影区<br>植被覆盖度/%   |        | 参考数据     |           |           |           |            | PA/%  |
|                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |        |                      |        | 0~<br>20 | 20~<br>35 | 35~<br>50 | 50~<br>70 | 70~<br>100 |       |
| 反演<br>数据             | 0~20   | 0        | 0         | 0         | 0         | 1          | 0.0    | 反演<br>数据             | 0~20   | 2        | 2         | 1         | 0         | 0          | 40.0  |
|                      | 20~35  | 0        | 0         | 0         | 1         | 1          | 0.0    |                      | 20~35  | 4        | 0         | 2         | 5         | 2          | 0.0   |
|                      | 35~50  | 0        | 0         | 1         | 1         | 12         | 7.1    |                      | 35~50  | 1        | 0         | 2         | 2         | 13         | 11.1  |
|                      | 50~70  | 5        | 0         | 0         | 4         | 26         | 11.4   |                      | 50~70  | 0        | 0         | 1         | 2         | 14         | 11.8  |
|                      | 70~100 | 5        | 3         | 2         | 0         | 18         | 64.3   |                      | 70~100 | 7        | 4         | 0         | 8         | 68         | 78.2  |
|                      | UA/%   | 0.0      | 0.0       | 33.3      | 66.7      | 31.0       |        |                      | UA/%   | 14.3     | 0.0       | 33.3      | 11.8      | 70.1       |       |

但对 20%~70 之间的预测较低。FCLSU 在对中高覆盖度植被的预测上准确度差，只有低覆盖区域稍好，精度为 64.29%；对裸岩的预测则相反，在 70%~100% 之间的预测精度达到了 100%，然而其他等级几乎都没有成功预测。DPM 的表现则明显高估了各等级的覆盖度，表明该方法受阴影影响最大。

### 2.3 地形效应对提取方法的影响

图 4 表明 GLMM 估计的植被平均覆盖率在光照区域与

阴影区域除 0%~10% 覆盖度外，其余类别阴影区域光照区预测结果较为类似，预测值都在参考值的范围内；在植被低覆盖区域的阴影部分预测值明显偏高，平均高了 28% 的覆盖度。在对裸岩率的预测中，GLMM 在 10%~35% 之间的覆盖度阴影区预测平均值偏低，平均值仅为 12%，其余等级覆盖度光照区与阴影区预测较为接近，均满足参考区间的范围；从整体来看 GLMM 能较好地减轻阴影的影响，对于复杂山区石漠化的提取效果较好。相比之下，另外两种方法受



地形效应的影响较大, FCLSU 对光照区的植被覆盖度预测较好, 所有的预测值都与参考值很好的契合, 但在阴影区除在 10%~35% 之间的植被覆盖度预测较为准确外, 其余覆盖区间的预测均有较大的差别, 在 0%~10% 之间的预测偏高, 高出参考值 17%, 而在 35%~100% 覆盖区间则又偏低, 覆盖度越高, 与预测值之间的相差越大, 在 70%~100% 之间覆盖度与参考值相差达到 33%。FCLSU 对裸岩的预测则表现与植被覆盖度预测相反结果, 在高值区的表现好于低值区, 但无论是光照区还是阴影区, 裸岩率低于 50% 时, 预测

结果与实际结果出现较大偏差, 预测结果明显大于参考值; 相对而言, DPM 的预测结果在三种方法中表现最差, 除了对光照区大于 10% 覆盖率和阴影区大于 50% 覆盖率的植被预测表现较好外, 对其余区间植被和裸岩的预测表现都较差。总体来说, 三种方法在光照区的预测精度均高于阴影区, 考虑光谱变异的 GLMM 方法预测结果表现最好, 能有效地减轻地形效应的影响, FCLSU 与 DPM 的方法对于地形复杂阴影明显的地区适用性较差。

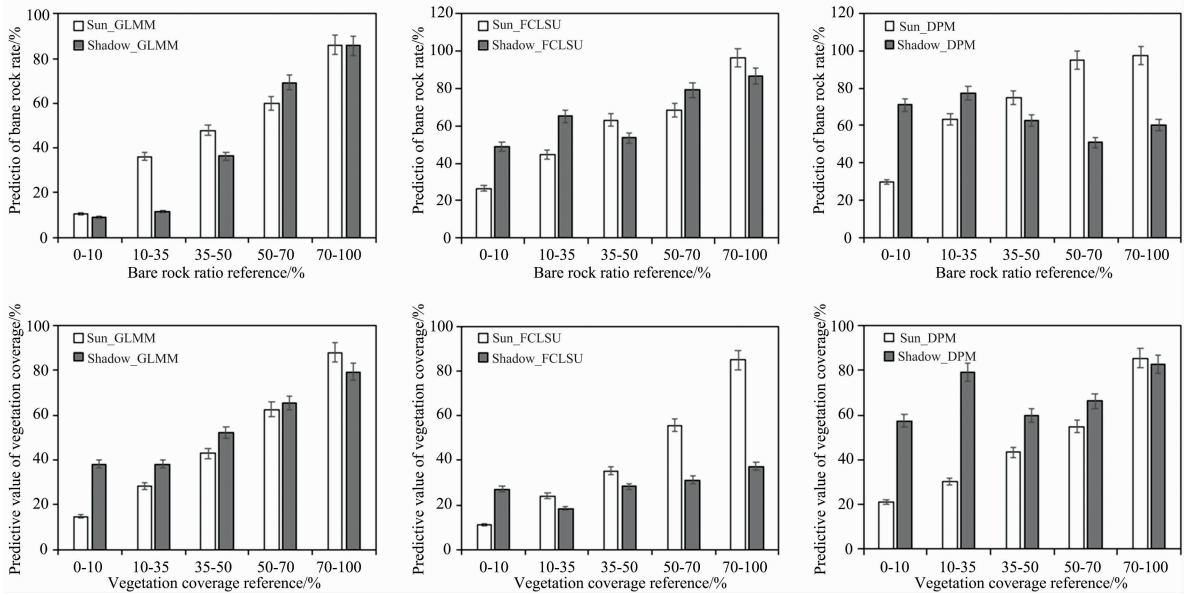


图 4 光照区和阴影区域裸岩与植被覆盖度的预测百分比

Fig. 4 Prediction percentages of bare rock and vegetation coverage in light and shadow areas

地形效应会使遥感影像中阴影区的地物光谱发生不同程度变异, 使得提取的光照区与阴影区的相同地物表现出不同的效果。以植被覆盖率的预测为例, 探讨地形效应对三种方法的影响。如图 5 所示, 原始影像上 a, b 均为阴影区, 对照 GF-6 号同时期同区域影像 (标准假彩色) 发现阴影下分布有大量植被。从图中可以看出, 在 a 区域 GLMM 较好的提取出了植被, 提取结果与地面实际分布轮廓基本一致; 预测的植被覆盖率与地面参考也较为一致, FCLSU 虽然提取结果的空间分布与地面实际一致, 但植被覆盖率预测值明显偏低; 相比之下 DPM 的表现阴影区域非常不尽人意, 整体表现偏高。在 b 区域, 蓝色和黑色方框分别代表相同植被覆盖率的光照区和阴影区, 从 GLMM 和 FCLSU 预测的结果来看, 同等植被覆盖率在光照区与阴影区表现相似, GLMM 好于 FCLSU。而 DPM 则在两个区域表现出较大差异, 阴影区预测值明显高于光照区。为了进一步分析地形对各方影响, 基于 DEM 高程数据计算太阳入射角余弦值来模拟地形产生的阴影效应, 其中方法预测的值与太阳入射角余弦值相关系数越低表明受阴影影响越小。从表 4 看出 GLMM 预测的植被覆盖度和裸岩率与太阳入射角余弦相关系数分别为  $-0.159$  和  $0.045$  且  $p$  值均大于  $0.05$ , 说明 GLMM 预测值与太阳入射角没有相关性, FCLSU 预测的裸岩率与太阳入射

角余弦相关系数为  $0$ ,  $p$  值大于  $0.05$ , 表明阴影地形效应对裸岩的不大, 相对之下 FCLSU 预测的植被覆盖度、DPM 预测的裸岩率和植被覆盖度则与太阳入射角余弦值有较强的相关性, 相关系数分别为  $-0.621$ ,  $0.549$  和  $-0.582$ ,  $p$  值均小于  $0.01$ , 说明两种方法受地形效应影响较大。

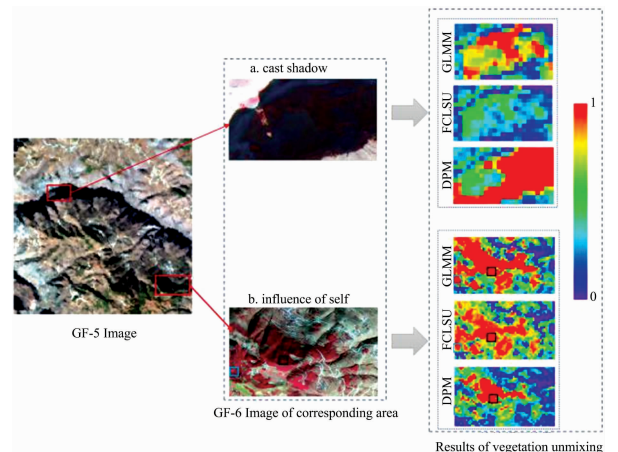


图 5 各方法阴影区植被覆盖度预测结果与高清影像对比  
Fig. 5 Comparison of vegetation coverage prediction results of shadow areas with high-definition images by various methods

表 4 各方法预测值与太阳入射角余弦值相关系数  
Table 4 Correlation coefficient between prediction value of each method and cosine value of solar incident angle

|      | GLMM_裸岩 | GLMM_植被 | FCLSU_裸岩 | FCLSU_植被 | DPM_裸岩   | DPM_植被  |
|------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 相关系数 | -0.159  | 0.045   | 0        | -0.621** | -0.582** | 0.549** |
| $p$  | 0.269   | 0.758   | 0.998    | 0        | 0        | 0       |

Note: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$

针对喀斯特山区石漠化造成的土地退化现象，如何快速、准确及时的获取石漠化信息是当前治理和预防石漠化恢复生态的关键。喀斯特地区石漠化信息提取通常利用 DPM 方法提取基岩裸露率与植被盖度，但喀斯特地区，地形起伏随处可见，崎岖的地形不仅影响植被的生长，同时也影响着植被信息的提取。在中等空间分辨率遥感影像中地形效应对地物反射率的影响非常大，受阴影影响地物反射率会明显偏低，地物光谱吸收与反射波段的 DN 值差距变小，光谱整体波动变大。以植被为例，当坡向由光照区转向阴影区时，近红外的 DN 值比红波段的 DN 下降更快，并且红波段的 DN 值甚至会出现负值，使 NDVI 计算结果偏大，导致最终 DPM 计算的植被盖度预测结果不准确，对地形复杂阴影效应明显地区不同等级石漠化面积的估测造成较大的影响。虽然有很多研究在使用 DPM 时对影像进行过地形校正，但已有研究表明地形校正模型并不能有效地提高提取地物精度，因此 DPM 的方法在地形崎岖的地区使用时必须考虑地形效应的影响，本研究也进一步证明了这一点。

其次，崎岖的喀斯特山区在产生大量阴影同时，由于地表破碎和地表异质性的特点也导致了地表大量的混合像元，针对这一问题，光谱分解方法可以较好地解决，虽然当前这类方法在喀斯特山区的应用较少，但在城市以及地形简单的地区已有了大量研究。喀斯特地区由于人为干扰、光照条件以及风化和侵蚀的影响，端元变异的现象普遍存在，且由于地物破碎获取地物端元比较困难。因此，本工作基于考虑端元可变的 GLMM 方法来试解决以上问题。研究表明，与传统的 DPM 和不考虑端元可变的 FCLSU 相比，GLMM 在光照区和阴影区对各等级植被覆盖度和裸岩率的预测都有着较好地结果，好于其他两种方法，在光照较好地地区，地物覆盖度精度高于 86%，在阴影区精度也达到了 78%，这是由于 GLMM 的方法是通过采用对角的方法模拟光照影像的反射率的变化，并且还考虑每一个波长间隔的光谱变异以适应端元的任意变化，因此能较为有效地模拟阴影区地物光谱反射率低的情况。GLMM 在阴影区对植被覆盖度的预测相较于裸岩率的预测更加准确，这可能是由于裸土端元与裸岩端元

非常相似(图 3)，阴影区各波段 DN 值变化大、值较低，GLMM 在对端元进行扩展模拟时会导致裸土和裸岩的端元差距变小，从而导致光谱的分解能力差于植被。虽然，GLMM 的方法在喀斯特复杂山区的效果好于传统的 DPM 和不考虑端元变异情况的 FCLSU，但是本工作在对地物端元的选择是还存在一定的不足，虽然通过对研究区的实际情况进行分析，考虑了地表主要的三种地物类型：植被、裸土及裸岩，但是在提取端元时由于条件限制只提取了三种地物在光照充足地区的端元，没能提取到阴影区域的端元。GLMM 虽说可以一定程度上模拟阴影区的地物光谱情况，但都是以光照区端元的光谱形态为基础进行变化的，实际上阴影区地物的端元光谱形态与光照区还是存在较大差别的。因此，在条件允许的情况下应考虑阴影区的端元，以提高对地物的提取精度。

### 3 结 论

为了减轻喀斯特山区地形复杂、地表破碎、阴影效应等对石漠化信息提取的影响，利用 GF-5 号高光谱影像基于考虑端元可变的 GLMM 方法对研究区进行石漠化信息提取，并与传统的 DPM 方法和未考虑端元变异的 FCLSU 进行对比。在三种方法中，精度最好的是 GLMM，光照区和阴影区的总精度分别为 86.80% 和 78.18%，FCLSU 与 DPM 的预测精度较低，特别是在阴影区，精度仅为 47.73% 和 44.09%，仅在低覆盖和高覆盖区表现较好，对于中覆盖区预测精度非常差。其次，三者估计的地物覆盖度与太阳入射角余弦相关系数表明，GLMM 预测的植被盖度与裸岩率和太阳入射角余弦相关性不强， $p$  均大于 0.05，受阴影效应影响较小。除 FCLSU 预测的裸岩率与太阳入射角余弦相关系数为 0， $p$  值大于 0.05 外，FCLSU 预测的植被与 DPM 预测的裸岩率和植被覆盖度则与太阳入射角余弦值有较强的相关性， $p$  值均小于 0.01，受阴影效应影响较大。因此，在喀斯特山区采用 GLMM 的方法提取石漠化信息，可以一定程度上减轻阴影的影响，进一步提高石漠化信息的提取精度。

## References

- [ 1 ] Yue Y M, Wang K L, Zhang B, et al. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13(10): 847.
- [ 2 ] You H. *Land Use Policy*, 2017, 61: 171.
- [ 3 ] Yue Y M, Wang K L, Liu B, . *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13-14): 5136.
- [ 4 ] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. *Land Degradation & Development*, 2010, 15(2): 115.
- [ 5 ] Zhang X, Shang K, Cen Y, et al. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2014, 31(9): 86.
- [ 6 ] Mello A, Alves D S. *Remote Sensing Letters*, 2011, 2(3): 189.
- [ 7 ] Keshava N, Mustard J F. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(1): 44.
- [ 8 ] Bioucas-Dias J M, Plaza A, Dobigeon N, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2012, 5(2): 354.
- [ 9 ] YUAN Jing, ZHANG Yu-jin, GAO Fang-ping(袁 静, 章毓晋, 高方平). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2018, 37(5): 43.
- [10] Halimi A, Dobigeon N, Tourneret J Y. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 4904.
- [11] Borsoi R A, Imbiriba T, Bermudez J C M, et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(4): 223.
- [12] Roberts D A, Gardner M, Church R, et al. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 267.
- [13] Song C. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 248.
- [14] Rogge D M, Rivard B, Zhang J K, et al. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44: 3725.
- [15] Drumetz L, Veganzones M A, Henrot S, et al. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 25(8): 3890.
- [16] Imbiriba T, Borsoi R A, Bermudez J C M. Generalized Linear Mixing Model Accounting for Endmember Variability. in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018. 1862.

## Rocky Desertification Information Extraction in Karst Terrain Complex Area Based on Endmember Variable

RUAN Ou<sup>1, 2</sup>, LIU Sui-hua<sup>1, 2\*</sup>, LUO Jie<sup>1, 2</sup>, HU Hai-tao<sup>1, 2</sup>

1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

2. Key Laboratory of Mountain Resources and Environmental Sensing Sensing, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

**Abstract** Shadows, mixed pixels and spectral variations are common in remote sensing images in mountainous karst areas due to complex terrain and broken surface. Dimidiate pixel model (DPM) based on multispectral remote sensing is difficult to accurately extract rocky karst desertification (KRD) information in areas with significant spectral variations and shadows. The mixed pixel decomposition technology of hyperspectral remote sensing can decompose complex mixed pixels into the mixed ratio corresponding to the pure landmark spectrum and each landmark spectrum, which provides the possibility for obtaining higher precision rocky desertification information in complex mountainous areas. However, due to the changes in many factors such as illumination, environment and atmosphere, the end members will vary to varying degrees, which will result in significant errors in the process of mixed pixel decomposition. Secondly, it is difficult to directly obtain the pure landmark spectrum from mountain images with complex terrain and strong surface heterogeneity and establish a spectrum library to deal with spectral variation. Therefore, the focus of current studies is how to deal with spectral variation and terrain effect in this case and obtain effective and accurate information extraction of rocky desertification. In order to solve the above problems, the generalized linear mixed model (GLMM), which simulates the reflectivity change of ground objects caused by illumination conditions and considers the spectral variation at each wavelength interval, was adopted to reduce the influence of spectral variation and terrain effect in the process of information extraction of rocky desertification in karst areas. First of all, the typical representative spectra of main ground objects (vegetation, bare rock and bare soil) in the karst area were extracted from GF-5 hyperspectral images. Then the spectral variation of each pixel under different illumination was simulated based on the extracted landmark spectrum, and the most suitable spectral combination was selected to decompose the pixels to get the best unmixing effect. In order to verify the reliability of the method, the visual interpretation results of high-resolution images were used as a reference to verify the prediction results of the method, and the fully constrained least squares linear spectral unmixing (FCLSU) DPM without



considering end-member variation were selected for comparison. The results showed that it was necessary to consider shadows, mixed pixels and spectral variation in karst mountainous areas with highly complex terrain. The total accuracy of GLMM in rocky desertification information extraction reached 84.89%, significantly higher than that of the other two methods (59.68% and 67.34%). The accuracy of GLMM in the illumination area and shadow area was similar to that of GLMM in the illumination area and shadow area. However, the other two were quite different, and the shadow area was lower than the illumination area, which reflects that GLMM can effectively reduce the influence of terrain effect and improve the accuracy of information extraction of rocky karst desertification.

**Keywords** Spectral mixed decomposition; Generalized linear mixed model; Rocky desertification information extraction; Terrain effect

(Received Jun. 9, 2021; accepted Aug. 25, 2021)

\* Corresponding author