

文章编号: 1007 4619(2006)04 0469 06

石漠化程度遥感信息提取方法研究

夏学齐^{1,2}, 田庆久², 杜凤兰²

(1 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093 2 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏南京 210093)

摘要: 岩溶石漠化是中国西南地区的一种严重的生态环境问题, 近年来有进一步恶化的趋势。本文以贵州省普定县典型研究区 KONOS 遥感数据为例, 给出了一种利用多光谱遥感数据定量提取岩溶石漠化程度信息的算法。在多维光谱的向量空间分析的基础上, 提出了“植被线”的概念, 并定义“石漠化几何指数”(GRI)为多维向量空间中不同程度的石漠化像元到“植被线”的归一化距离。作者认为使用这种方法提取石漠化程度, 可以避免人工解译的主观性强, 工作量大的缺点。使提取到的石漠化程度结果客观稳定。

关键词: 石漠化; 遥感; 终端单元; 植被线; 石漠化几何指数(GRI)

中图分类号: TP79 X 87 文献标识码: A

Retrieval of Rock-desertification Degree from Multi-spectral Remote Sensing Images

XIA Xue-qi^{1,2}, TIAN Qing-jiu², DU Feng-lan²

(1 Department of Earth Sciences, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

(2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

Abstract Rock-desertification is a unique environmental and ecological problem in Southwest China. As remote sensing is an important way of monitoring variation of rock-desertification, a method for measurement and information retrieval of rock-desertification is developed in this paper. MNF transform is applied to KONOS data to reduce the number of spectral dimensions to 3. In this 3-dimension, endmembers in the image are found out and analyzed. It is found that various vegetations group into a line called “vegetation line”, in which “dark vegetations”, such as coniferous forest and broad leaf forest, continuously change to “bright vegetations”, such as grasses. It is presumed that is caused by different proportion of shadow mixed in leaves or branches in various types of vegetation. The normalized distance between points for rock-desertification and the vegetation line is defined as Geometrical Rock-desertification Index(GRI), which can be used to scale rock-desertification. This method was used in the KONOS image of Puding, Guizhou province and showed many advantages.

Key words rock-desertification; remote sensing; endmembers; vegetation line; geometrical rock-desertification index(GRI)

1 引言

荒漠化是当今最严重的环境引起的社会经济问

题之一, 它也已经严重影响了中国部分地区的可持续发展, 石漠化作为荒漠化的一种, 在中国西南岩溶地区广泛分布^[1]。石漠化是指在湿润气候条件下, 受岩溶作用及人类不合理活动的干扰, 岩溶山区地

收稿日期: 2005-01-04 修订日期: 2006-01-19

基金项目: 加拿大 CDA 项目“中国碳循环研究”和南京大学研究生创新工程“科研创新基金”项目资助。

作者简介: 夏学齐(1979—), 男, 南京大学地球科学系博士研究生。主要研究领域为环境遥感和地理信息系统应用, 已发表论文 5 篇。

Email: sdqxq@163.com; dg0429007@ymail.nju.edu.cn

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表土层流失,基岩裸露,呈现出一种无土无水无林、类似于荒漠化的景观现象与过程^[2]。简单地讲,它是一种水蚀作用下的石质荒漠化^[3],是长期水土流失的结果。由于多种自然条件和人为条件,石漠化在中国贵州、云南、广西等地均有分布。近年来,国家对西部的生态环境建设非常重视,对石漠化也加强了治理。同时,使用遥感技术提取石漠化强度及其分布,以及在此基础上的石漠化程度的动态监测,具有重要的意义。

有学者使用遥感和地理信息系统技术提取过石漠化强度信息,但多在中等分辨率的多光谱遥感影像基础上进行,使用的是目视解译和判读的方法^[4],或统计不同石漠化程度下 TM 数据各波段像元 DN 值的变化范围进行石漠化信息提取^[4]。童立强也曾提出使用波段比值的指数进行石漠化信息提取^[5]。

从机理上讲,石漠化信息提取的实质是混合像元分解。线性光谱分解模型把混合像元光谱看作各端元组分的线性组合。从向量空间角度看,任意混合像元坐标位置为各端元按其相对丰度加权组成的线性和^[6]。因此,混合像元总位于各端元组分围成的凸包(Convex Hull)之内^[7-8]。这种像元向量空间的凸体几何理论方便了对混合像元的分析^[7-9],形成了一套光谱混合分析理论(Spectral Mixture Analysis)^[10-12],并在许多遥感数据的定量应用中显示了它的优势^[6-13-15]。MNF变换^[16]和PPI^[17]指数计算分别作为波谱向量空间降维方法和寻找纯净像元作为终端单元的方法为该理论的应用提供了技术手段。本文在高空间分辨率(4m)遥感数据的基础上,以贵州省普定县石漠化典型研究区为例,在上述理论指导下,进行了石漠化强度信息的提取,并提出了一种利用高空间分辨率多光谱遥感影像定量提取石漠化程度的算法。

2 研究区

研究区位于贵州省普定县,覆盖了补郎乡的全部区域。该区位于贵州高原中部,年均温 15°C ,年均降水量 1396mm ,热量资源丰富,降水充沛,由于碳酸盐岩广泛出露地表,为典型的石灰岩喀斯特地貌类型。由于多种自然和人为因素,使水土流失严重,生态环境恶化,使该地区石漠化发育。在石漠化区域,以石灰岩为背景,有限的土壤中生长着灌木和草类或为农田;土层较厚的山地多为针叶林、阔叶

林、针阔混交林及灌木覆盖;沟谷冲积地带土壤肥厚,适宜农业耕种,但面积极其有限。“退耕还林还草”工程实施以后,石漠化区域很少再种植粮食作物,尤其石漠化较重的地区。此外,人工建筑和道路在该区有零星分布。图1为研究区影像的一部分,显示了该区主要土地覆盖类型。

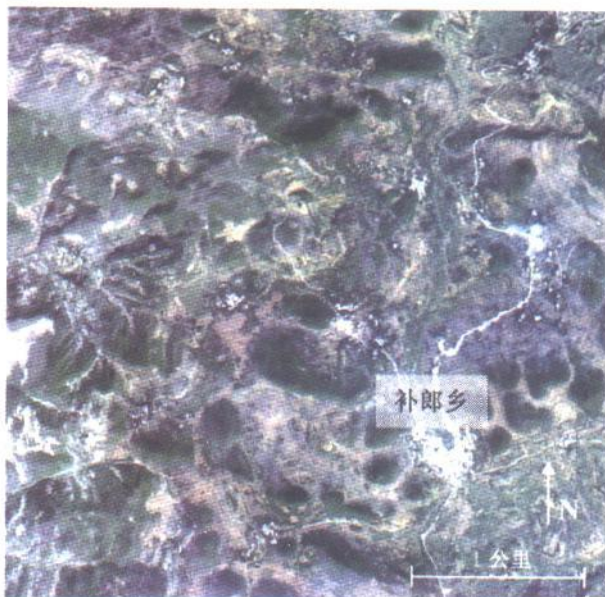


图1 研究区 3(R), 2(G), 1(B)波段合成 KONOS影像
Fig 1 KONOS image of the study area 3(R), 2(G), 1(B)

本文使用了2000年5月13日获取的研究区KONOS影像,选取其多光谱4个波段数据,波段范围见表1,其空间分辨率为4m。

表1 KONOS遥感影像多光谱波段设置
Table 1 Band width of KONOS band 1-4

波段号	波段范围(μm)	对应于
1	0.45-0.52	蓝
2	0.52-0.60	绿
3	0.63-0.69	红
4	0.76-0.90	近红外

3 算法分析

从混合像元角度来看,岩溶石漠化区域实际上是石灰岩和植被或者土壤的混合。理论上可以使用光谱分解的方法,但由于目前光谱分解方法模型不成熟,而且很复杂,即使相对较简单常用的线性模

型,在实际应用上也遇到一些问题,例如难以确定分解的终端单元,常常得到 $[0, 1]$ 区间外的解,且不稳定,不利于使用多时相信息进行动态监测^[18]。因此本文考虑使用波谱向量空间方法。

从数学角度看,遥感影像是个三维矩阵,第一维和第二维确定了像元的空间位置,像元矩阵的第三维又可以表达成 n 维矢量: $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 n 为遥感影像的波段数。矢量 V 是该像元对应地面位置的光谱特性的表现。同时 V 也确定了像元在 n 维向量空间里的点。研究遥感影像中像元各点在向量空间的分布情况,可以进一步理解遥感影像并从中提取有用的信息。但随着遥感影像波段增多, n 的数值加大,三维以上空间情况很难直观表达。使用降维方法可以使信息集中分布在靠前的波段,在较少丢失信息的情况下把影像信息压缩到较低的维度。MNF 变换是一种较好的降维方法,它在主成分分析的基础上发展而来,它在噪音估计的基础上使变换后的图像按有用信息大小进行波段排列,而不是像主成分分析那样不考虑噪音,直接按方差大小排列变换后的波段^[19]。遥感影像中的像元既有多个终端单元 (End member) 组成的混合像元,又有单个终端单元形成的纯净像元 (Pure Pixel)。各终端单元的纯净像元代表了各终端单元的波谱性质,混合像元是两种以上终端单元线性或者非线性的组合波谱混合。从数学的观点来看,遥感影像中的各像元,在几何空间里的散点可以抽象成一个单形体,纯净像元对应着单形体的顶点,混合像元的点分布在单形体的内部或边上^[17]。应用纯净像元指数 (PPI) 可以计算像元的“纯度”,从而可以提取纯净像元,帮助寻找终端单元。可以设置纯净像元指数的阈值,纯净像元指数大于该值的像元即被认为是较纯净的像元,纯净像元指数算法的本质就是基于以上理论寻找单形体的顶点和边。光谱混合分析 (SMA) 模型把图像光谱描述为“纯净”的终端单元的线性组合。在该模型中,混合像元在向量空间里的坐标被描述为^[6, 15]

$$p = k_1 p_1 + \dots + k_i p_i + \dots + k_{n+1} p_{n+1} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} k_i = 1 \quad (2)$$

光谱混合分析 (SMA) 模型可以分解各终端单元的相对含量。

4 图像分析

本文对 4m 分辨率的 IKONOS 原始 DN 值图像

选取了一个典型石漠化的子集区域进行石漠化提取方法研究。该区域中除了多数地区为石漠化区域外,还有针叶林、阔叶林、灌木、草地、农田等植被覆盖,以及道路、农村和城镇居民点。对该图像子集进行了 MNF 变换, MNF 变换结果图像的信息量随波段的增加而减少,取前 3 个波段,就可以代表大部分信息。把图像各像元前三个波段组成的散点,在三维空间中进行研究,可以发现不同地表覆盖类型几何位置特点,观察结果表明,图像散点在三维空间的分布大致成四面体,具有四个顶点。四面体即是三维空间里的单形体,说明该结果符合上述单形体理论。利用 PPI 变换对像元“提纯”,较“纯净”的像元则集中在四面体的顶点和边上,从而显示了四面体的骨架。

图 2 显示了较“纯净”的像元在三维空间里的分布情况。图中顶点 ABCD 组成的四面体中, B 处为纯净的水泥质建筑像元对应的散点位置, C 处为石灰岩纯净像元的位置。值得注意的是,除部分农田外,各种植被类型组成线状分布 (直线 AD), 并且植被类型依次为: 针叶林、阔叶林、灌木、草地。在直线 AD 的端点 A 对应像元为阴影区域; 而另外一个端点 D 对应平坦均一的草地。因而笔者认为, 直线 AD 是植被叶面与阴影两个终端单元不同配比的结果, 从针叶林到草地, 像元内阴影比例逐渐降低, 靠近 A 的植被类型可以称为“暗植被”, 相应靠近 D 的植被类型可以称为“亮植被”。另外, 在图 2 没有发现明显的土壤顶点, 这主要是由于图像成像于 5 月, 当地水热条件很好, 土壤是植被生长的主要限制因子, 因此自然状况下土壤皆有植被覆盖。只有在谷地冲积形成的肥厚土层有人为耕作, 而形成植被与土壤的混合光谱, 这些地方形成在图 2 中与直线 AD 偏离的农田的散点。在此情况下, 由于石漠化地区

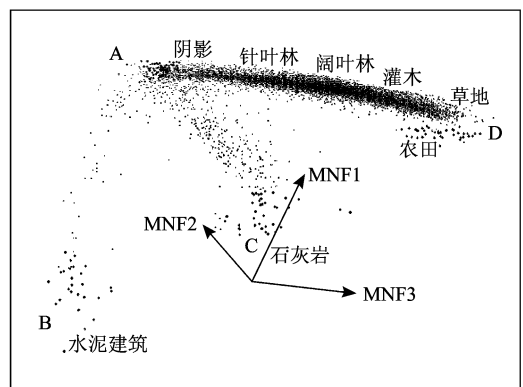


图 2 “纯净”像元在 MNF 前三维空间里的分布

Fig 2 Location of “pure pixels” in the 3 D MNF space

没有明显的土壤信号, 石漠化像元可以认为是植被与石灰岩光谱的混合像元。反映在图 2 中, 石漠化像元分布在四面体的侧面 ACD 上, 并且距离 C 端点越近石漠化程度越高, 距离直线 AD 越近, 石漠化程度越低。

5 信息提取方法

从以上的分析中可以看到, 不同的终端单元有不同的几何位置, 同样作为混合光谱的石漠化像元也随着石漠化程度的不同有不同的几何位置。可以使用前述单形体理论进行石漠化程度提取, 但植被与其他各终端单元不同, 它的“纯净”像元并非 SMA 模型所设想的“点”, 而是线, 本文称为“植被线”, 而植被线恰好组成了单形体的一条边。

植被线的存在使得使用 SMA 模型分解石漠化程度信息遇到找不到终端单元点的困难, 因此本文提出使用混合像元到植被线的距离进行信息提取, 从而得到石漠化几何指数 (GRI) 的方法。由于石漠化像元分布在石灰岩终端单元和植被线组成的三角形上, 因此需要首先剔除三角形外与石漠化无关的其他终端单元信息, 如水泥质建筑。对于这些终端单元使用传统的分类算法可以比较容易地提取出来。需要说明的是, 图 2 中农田为山谷冲积土壤的肥沃农田, 多为基本农田保护区, 不存在石漠化问题, 也可以通过传统的监督分类区分出来。下面是对石漠化几何指数 (GRI) 的计算方法和相关定义。

设一种暗植被 (如针叶林) 的三维光谱信号:

$$V_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$$

一种亮植被 (如平坦均匀草地) 的三维光谱信号:

$$V_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$$

可得“植被线”方程为:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$$

设石漠化像元三维光谱信号为:

$$V' = \{x', y', z'\}$$

计算它到植被线的距离

$$d = \frac{\| \{x_1 - x', y_1 - y', z_1 - z'\} \times \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\} \|}{\| \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\} \|}$$

设完全石漠化像元终端单元为:

$$V_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$$

同样可以计算它到植被线的距离:

$$d_0 = \frac{\| \{x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0\} \times \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\} \|}{\| \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\} \|}$$

定义石漠化几何指数:

$$GRI = \frac{d}{d_0}$$

使用以上方法可以进行石漠化几何指数程度制图, 完全石漠化地区 GRI 值为 1, 没有石漠化地区为 0 石漠化地区值为 0 和 1 之间。图 3 显示了 5 类地物在 MNF 空间的各波段数值。因为信息被 MNF 压缩到靠前的波段, 因此取了前三个波段使用上述方法进行计算, 得到石漠化几何指数图 (图 4)。

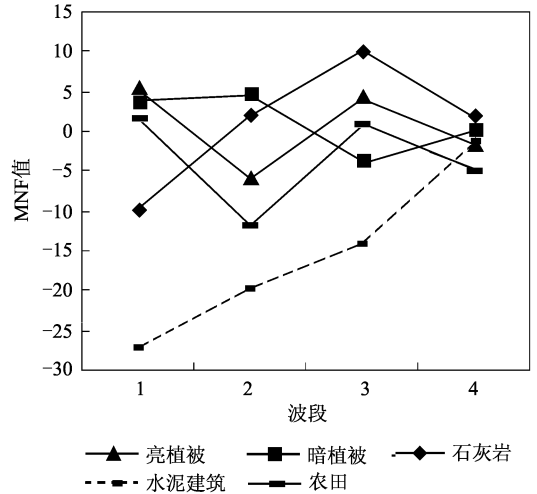


图 3 MNF 空间内 5 个终端单元各波段数值
Fig 3 5 Endmembers retrieved in MNF space

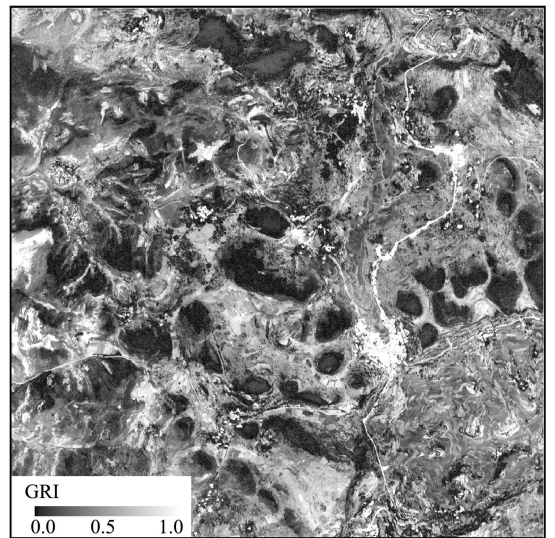


图 4 研究区石漠化几何指数图
Fig 4 GRI for the study area

6 结果验证

由于该研究使用了石漠化几何指数表示石漠化

程度的相对大小, 因此它可以定量和客观地用数值表示, 并且数值分布在 $[0, 1]$ 的连续区间。2004 年

8 月进行的实地调查证明, 现有石漠化等级与本文所得的 GR I 值存在很好的对应关系 (表 2)。

表 2 通过实地调查显示的石漠化程度与石漠化指数的关系

Table 2 Relationship between GR I and rock desertification degrees

石漠化程度	林地覆盖区	轻度石漠化	中等石漠化	高度石漠化	基岩裸露区
GR I 值的分布	0.0—0.15	0.15—0.5	0.5—0.7	0.7—0.9	0.9—1.1

7 结 论

本文在多维光谱向量空间分析的基础上, 发现遥感影像植被像元为线状分布, 定义为“植被线”, 并定义“石漠化几何指数”为像元到植被线的归一化距离。利用石漠化几何指数进行了研究区石漠化程度的信息提取。利用这种方法提取石漠化程度, 结果稳定可靠, 可以避免繁重的人工遥感影像解译工作, 用值域 $[0, 1]$ 定量表达石漠化的相对程度, 结果比人工解译更客观。

作者考察多种影像, 包括 ETM, SPOT, KONOS 等中高分辨率多光谱遥感影像, 均有类似的植被线存在。作者认为: 植被的表面是起伏不平的, 所以植被像元存在亮暗不同区域的配比, 一个极端情况是表面非常平的植被 (植被线的一端), 另一个是几乎被阴影遮盖的植被区域 (植被线的另一端)。而其他影响植被像元分布的因素 (如不同的植被类型), 相对阴影配比的影响相当小, 当然也有影响, 表现为, “植被线”具有一定的半径, 而这个半径对于其他非植被 (碳酸岩、水体) 相对植被的距离来讲, 可以忽略, 所以定义为“植被线”, 而不是“植被柱”。当然, “植被线”需要进一步的理论证明。它的存在有可能会在各种资源环境遥感信息提取中得到更广泛的应用。

文中所使用终端单元, 尤其完全石漠化像元最好能够在图像上提取到, 这样可以排除大气等干扰成像过程的影响, 得到比较客观稳定的石漠化几何指数, 使这一方法能够用来实现多时相数据进行石漠化变化的动态监测, 而排除不同时相间大气对影像的影响。但要求影像中具有稳定的完全石漠化像元, 或石灰石出露像元, 这需要工作者对研究区有一些了解, 多数情况下容易满足此条件。

参 考 文 献 (References)

[1] Xiong K N, Li B, Zhou Z F *et al*. Application of Remote Sensing and GIS on Study of Rock desertification: A Case in

Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 [熊康宁, 黎平, 周忠发等. 喀斯特石漠化的遥感——GIS 典型研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.]

[2] Su W C. Controlling Model and Countermeasures for Rocky Desertification of Karst Mountainous Region and Its Preventing Strategy in Southwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 24—27. [苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 24—27.]

[3] Li W H, Yu D Q. A Study of The Technology for Remote Sensing Investigation of Rocky Desertification in Areas of Karst Stone Hills [J]. *Remote Sensing of Land & Resources*, 2002, (1): 34—37. [李文辉, 余德清. 岩溶石山地区石漠化遥感调查技术方法研究 [J]. 国土资源遥感, 2002, (1): 34—37.]

[4] Chen Q W, Lan A J, Xiong K N *et al*. Spectral Feature based Model for Extracting Karst Rock-desertification from Remote Sensing Image [J]. *Journal of Guizhou Normal University*, 2003, 11(4): 82—87 [陈起伟, 兰安军, 熊康宁等. 基于遥感光谱特征的喀斯特石漠化信息提取 [J]. 贵州师范大学学报 [J], 2003, 11(4): 82—87.]

[5] Tong L Q. A Method for Extracting Remote Sensing Information from Rocky Desertification Areas in Southwest China [J]. *Remote Sensing of Land & Resources*, 2003, (4): 33—35. [童立强. 西南岩溶石山地区石漠化信息自动提取技术研究 [J]. 国土资源遥感, 2003, (4): 33—35.]

[6] Xia X Q, Tian Q J, Du F L. Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Image Using a Simplex Methods [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(12): 1486—1490 [夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 高光谱遥感图像的单纯形体分析方法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(12): 1486—1490.]

[7] Boardman J W. Automating Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry Concepts in Summaries [A]. Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop [C]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, US, 1993. JPL Publication 26 (1): 11—14.

[8] Boardman J W, Kruse F A. Automated Spectral Analysis: A Geological Example using AVIRIS Data North Grapevine Mountains, Nevada [A]. Proceedings, ERM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing [C]. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, 1994.

[9] Boardman J W. Inversion of Imaging Spectrometry Data Using Singular Value Decomposition [A]. Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing [C]. 1989.

- [10] Adams J B. A Combined Atmospheric and Systems Calibration from Spectral Mixture Analysis [A]. Proceedings of Workshop on Atmospheric Correction of Landsat Imagery [C]. USA: Geodynamics Corp., Torrance CA, 1993
- [11] Smith M O, Ustin S L, Adams J B, *et al*. Vegetation in Deserts I. A Regional Measure of Abundance from Multispectral Images [J]. *Remote Sensing of Environment* 1990, **31**(1): 1—26
- [12] Smith M O, Ustin S L, Adams J B, *et al*. Vegetation in Deserts II. Environmental Influences on Regional Abundance [J]. *Remote Sensing of Environment* 1990, **31**(1): 27—52
- [13] Small C. The Landsat ETM+ spectral mixing space [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, **93**(1—2): 1—17
- [14] Wu G, Murray A T. Estimating Impervious Surface Distribution by Spectral Mixture Analysis [J]. *Remote Sensing of Environment* 2003, **84**(4): 493—505
- [15] Dennison P E, Roberts D A. The Effects of Vegetation Phenology on Endmember Selection and Species Mapping in Southern California Chaparral [J]. *Remote Sensing of Environment* 2003, **87**(2—3): 295—309
- [16] Green A A, Bernan M, Switzer B, *et al*. A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Images Quality with Implications for Noise Removal [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1988, **26**(1): 65—74
- [17] Boardman J W, Kruse F A, Green R O. Mapping Target Signatures via Partial Unmixing of AVIRIS Data in Summaries [A]. Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop [C]. Jet Propulsion Laboratory Pasadena CA, US. JPL Publication 1995, **95**1(1): 23—26
- [18] Lv C G, Wang Z W, Qian S M. A Review of Pixel Unmixing Models [J]. *Remote Sensing Information* 2003, (3): 55—58 [吕长春, 王忠武, 钱少猛. 混合像元分解模型综述 [J]. 遥感信息, 2003 (3): 55—58]