

文章编号: 1000-0585(2001)02-0213-07

# 美国中西部沙山地区环境变化的遥感研究

赵英时

(中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 文章选择了典型半干旱地区——美国中西部的沙山为研究区, 利用陆地卫星 TM、MSS 图像数据, 采用线性光谱混合模型 (LSMM)、穗帽变换、指数提取等方法, 提取反映环境变化的沙地、湿地、水域、草地等信息, 并研究典型半干旱地区——Nebraska 近 20 年来的环境变化及其与气候变化的关系。

**关 键 词:** 环境变化; 线性光谱混合模型 (LSMM); 穗帽变换; 指数提取

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A

半干旱地区是生态环境敏感和脆弱的地区。半干旱地区气候因素和人类活动影响大多表现在植被盖度变化、土地沙化、水域变化、生态环境退化等方面。在立足国内研究的基础上, 研究国外典型半干旱地区的生态环境变化, 对研究全球环境变化是十分重要的。

## 1 研究区概况

美国中西部的沙山 (The Sand Hill in Nebraska), 是西半球最大的沙海 (面积约为  $51\ 800\text{km}^2$ ), 为典型、独特的半干旱地区。由于太平洋水汽被山脉阻隔, 而大西洋墨西哥湾的水汽又距离甚远, 这里半干旱气候明显。降水有限且分布不均, 年降水量  $250\text{mm}$ , 其中 75% 降水出现在 48 月植物生长季节, 尤其集中在夏季; 气温的变化梯度类似于降水变化梯度, 夏季高温、高蒸发速率, 使该区干燥度较大。加之, 多风且风速强、沙质土壤等, 塑造了区内大规模的沙丘、沙丘链。但同时, 沙质土壤的高渗透性, 又使这儿有限的降水却赋存较好, 地下水似“海绵”般地为湖泊、湿地、草地提供必要的水分。因此, 研究区既有被草类和稀疏植被覆盖的大沙丘, 构成干草地生态景观; 又有沙丘间的浅湖、沼泽构成的湿地生态景观, 且两者紧密相连, 形成独特的干湿交错景观结构。图 1 显示研究区三维景观图像, 由 TM 图像与数字高程模型 (DEM) 融合生成。

在这种典型半干旱区, 一方面, 虽然大规模的沙丘被草地封固, 但当降水量减少, 植被覆盖度降低时, 风的作用仍可使局部沙丘及沙丘陡坡的风蚀地、沙地发生变化; 另一方

感谢美国内布拉斯加州林肯大学 CALM II, Prof. Don Rundquist 在遥感等数据提供及研究工作中的支持。张熙川参加部分图像处理工作。

收稿日期: 2000-09-23; 修订日期: 2000-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49671057) 和王宽诚基金资助

作者简介: 赵英时 (1945-), 女, 江苏镇江人, 1981 年获南京大学理科硕士, 现为中国科学院研究生院教授, 博士生导师, 主要从事遥感应应用基础、遥感应应用分析与环境变化等方面研究。

面，气候变化引起的降水量和相关地下水补给量的变化，灵敏地反映到湿地的变化上。因此，气候、环境的变化集中地反映在沙地、湿地及植被盖度的变化上，是我们研究半干旱地区环境变化的又一种典型地区。本研究利用遥感数据，通过混合像元分解等图像处理方法，提取对该区有生态环境指示意义的沙地、湿地、植被盖度信息，并分析该区近 20 年来的环境变化及其与气候变化的关系。

研究区选择在 Sand Hill 的 Ellsworth- lakeside 一带 ( 约为  $34 \times 33 \text{ km}^2$  )。选用了 1972. 8. 19、1979. 8. 17、1987. 8. 11、1993. 8. 11 四个不同时间段的 TM、MSS 遥感图像数据。8 月上、中旬仍为植物生长季节，植被覆盖类型和密度的差异明显，尤其是沙丘间植被盖度高、绿度强的湿地植被，与沙丘上植被盖度、绿度相对弱的干草地景观形成鲜明的对比，且对环境变化较敏感，利于分析研究。该处主要土地覆盖类型有裸露沙地、湿地、湖泊、大牧草地、少量圆形喷灌农田等。



图 1 美国内布拉斯加沙山地区三维景观图像  
Fig. 1 3 D Landscape of The Sand Hill in Nebraska

2 沙地信息提取

遥感影像上的像元是地表一定范围内地物光谱特征的综合反映。这种地物光谱的综合往往以混合像元的形式表现。考虑到该区内的裸露沙地多呈小块风蚀地，零星地分散在被草地封固的沙丘陡坡一侧，多属混合像元。为了能够准确提取沙地信息，有必要进行混合像元的分离，我们选用线性光谱混合分析方法——线性光谱混合模型。

2.1 线性光谱混合模型 (LSMM)

线性光谱混合模型指像元的光谱亮度值，是由构成像元的基本组分 (Endmember) 的光谱亮度值以其占像元面积的比例为权重系数的线性组合。可表示为<sup>[2]</sup>：

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda}$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 \quad (k= 1, 2, 3 \dots n) \tag{1}$$

式中， $R_{i\lambda}$ 为第  $\lambda$  波段第  $i$  像元的光谱反射率。(已知)； $f_{ki}$  为对应于  $i$  像元的第  $k$  个基本组分所占的比例 (分量值)，(待求)； $C_{k\lambda}$ 为第  $k$  个基本组分在第  $\lambda$  波段的光谱反射率； $\varepsilon_{i\lambda}$ 为残余误差值，(即光谱的非模型化部分)； $n$  为基本组分的数目； $m$  为可用波段数，需满足  $n \leq m + 1$ ，以便利用最小二乘法求解。

评价模型用残差  $\varepsilon_k$ 或均方根误差 RMS 表示为:

$$RMS = \left[ \sum_{k=1}^{\lambda} (\varepsilon_{k\lambda})^2 / n \right]^{1/2} \tag{2}$$

在 LSMM 方法中，Endmember 的类型、数量、取值是至关重要的。通常以残余误差 RMS 尽可能的小，像元分解后的分量值  $f$  满足  $0 \leq f \leq 1$ ，以及 Endmember 具有代表性，来衡量和评价 Endmember 选择的好坏。

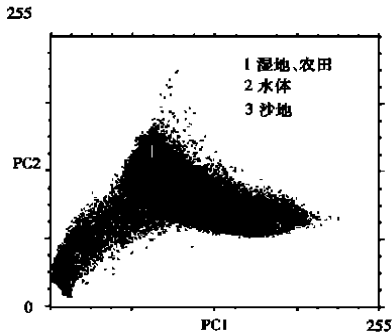


图 2 PC1 和 PC2 的散点图  
Fig. 2 Scattergrams  
of PC1 & PC2

研究区 Endmember 类型、数量的确定，是根据区内特点、结合地面调查和先验知识，通过图像分析，采用能压缩数据维数、集中有用信息的主成分分析法 (PCA)，在遥感图像上圈定出沙地、植被、水体 3 个典型土地覆盖类型 (即 Endmember 类型) 及样本区域。图 2 为 1993 年 TM 图像经主成分变换后，由第一 (PC1)、第二 (PC2) 分量构成的散点图，显示不同土地覆盖类型在主成分特征空间中的分布。

Endmember 的取值是以每个 Endmember 样区内样点的均值确定的。为了提高 Endmember 样区圈定和取值的精度，将选取的 Endmember 的样点在不同波段所组成的多维空间中旋转和筛选，确定 Endmember 集中分布的区域，剔除在多维图像空间分布中离散度大的样点，进行样本的优化处理。

经 LSMM 分解后的结果，包括沙地、植被 (湿地、农田)、水体 3 个 Endmember 的分量图像和残余误差图像。经验证表明分解结果可靠。图 3 为 1987 年遥感影像 LSMM 分解生成的沙地分量图像。

经 LSMM 求解后，混合像元被分解为具不同分量的亚像元，即每个 Endmember 在混合像元中所占的面积比例。在此基础上，需要结合先验知识 (实地检验样本或专题地图等)，用“阈值法”对图像进行识别、分割，以进行专题特征信息的识别与提取。即根据直方图上特征峰的形状和位置并对照图像、大比例尺土壤图等进行阈值的选择。应该说，混合像元分解对于提取嵌入植被覆盖之中的沙地来说，要比不进行混合像元分解效果更好。考虑混合像元内各组分并非都是简单线性关系，且“沙地”中混入的少量矮小植被有可能影响分解结果，因此有必要同时用其它遥感方法——穗帽变换法加以验证。

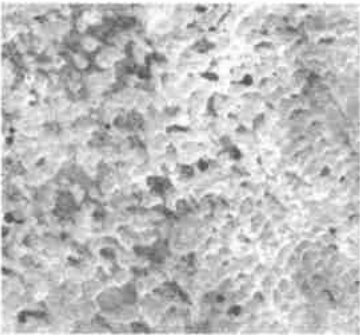


图 3 LSMM 沙地分量图  
Fig. 3 Fractal map of Sand  
land generated by LSMM

2. 2 穗帽变换 (TC)

穗帽变换是指在多维光谱空间中, 通过线性变换、光谱空间旋转使植被与土壤的光谱特征得以有效分离。变换后的第一分量 (TC1) 表征“土壤亮度”, 反映土壤光谱信息; 第二分量 (TC2) 表征“绿度”, 反映植被光谱信息。我们对由 TC1 所提取的沙地分量, 与 LSMM 分解的沙地分量进行了对比分析 (见图 4)。图中可见, LSMM 沙地分量图比 TC1 沙地分量图更清晰, 且对不同地类区分更好。最后, 运用本区的土壤图对两种方法的提取结果进行了评价。结果表明 LSMM 的沙地分量更符合区域实际。

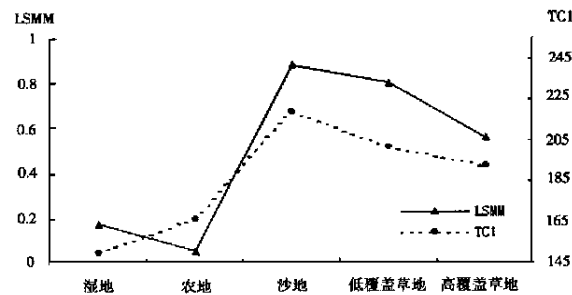


图 4 典型样区 LSMM 的沙地分量和 TC1 沙地分量的比较  
Fig. 4 Comparison of sand land fractal between LSMM and TC1

3 植被覆盖度信息提取

人为影响较小时, 植被覆盖度变化是气候、环境变化的灵敏标志。人们通常采用植被指数方法来提取和表达植物类型和状态信息。其中归一化植被指数 NDVI 与植被分布密度呈线性相关, 被认为是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指标。通过对不同时相植被指数 (NDVI) 图像的分割, 区分出不同覆盖度、绿度的植被类型——包括高覆盖度的湿地、农田和中覆盖度草地、低覆盖度草地等, 并获得它们的变化量。由于湿地植被与少量圆形喷灌农田的植被覆盖度、绿度相似, 两者难以区分, 尚需要在湿地信息提取中进一步研究。

4 湿地信息提取

湿地的变化是研究区域环境变化的又一关键因子。考虑到湿地与湖泊共生, 但两者在可见光绿波段 (G) 和近红外波段 (NIR) 有明显差异, 我们选用水体指数 (NDWI)<sup>[3]</sup>, 来区分湿地的内边界; 由于湿地植被与喷灌农田之间光谱特征相似, 但它们的土壤湿度还是有差异的, 而 TM5 波段 (1.55– 1.75 μm) 处于水的吸收带 (1.4μm, 1.9μm) 之间, 受水吸收带的影响, 对湿度、含水量信息尤为敏感, 故选用湿度指数 (NDMI) 来区分湿地的外边界, 即湿地植被与非湿地植被 (包括圆形喷灌农田)。归一化水体指数 (NDWI) 与湿度指数 (NDMI) 可根据水体、土壤湿度在不同波段的光谱响应特征, 分别表示为:

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$$
$$NDWI = \frac{G - TM_5}{G + TM_5} \tag{3}$$

经水体指数 (NDWI) 与湿度指数 (NDMI) 提取后, 湿地、农田、水体 3 种信息都被有效地区分和提取了出来 (见图 5)。

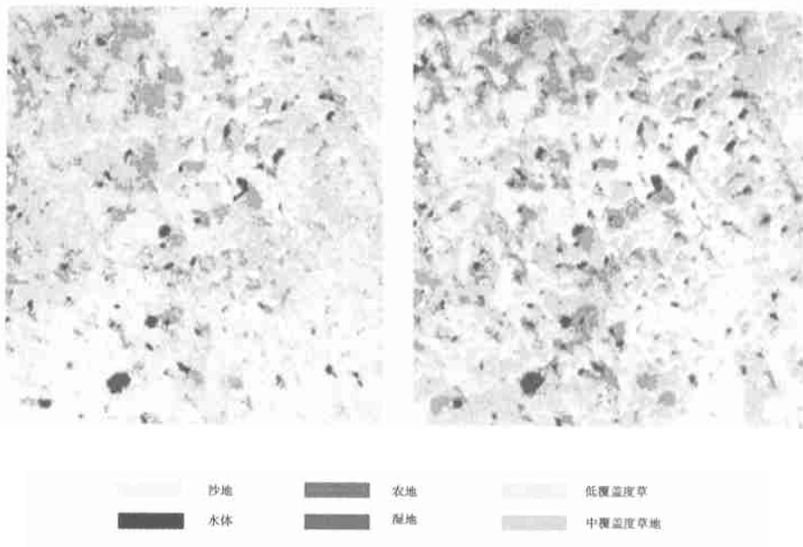


图 5 1972 年 (左)、1993 年 (右) 土地覆盖分类图

Fig. 5 Classification of land cover for 1972 (left) and 1993 (right)

5 环境变化分析与讨论

根据以上专题信息的提取，我们对 1972、1979、1987、1993 年 4 个不同年份的遥感图像进行了图像的识别与分类，并获得相应的图像、数据及变化量（表 1、图 5）。

表 1 主要土地覆盖类型的分类结果（单位：km<sup>2</sup>）

Tab. 1 Classification of major land cover types in different years

年份	水体	沙地	农地	湿地	中覆盖草地	低覆盖草地
1972	32.04	76.64	4.26	69.43	403.21	533.48
1979	38.67	81.09	8.07	80.18	401.68	509.66
1987	34.40	89.26	8.57	71.24	444.59	471.03
1993	36.50	92.86	7.65	75.31	436.23	470.69
1972-1993 变化量	4.46	16.22	3.39	5.88	33.02	-62.79
变化%	13.9	21.2	79.6	8.5	8.2	-11.8

从以上图表中可见，近 20 年来，研究区内各种典型土地覆盖类型面积均有不同程度的变化。其中，除了低覆盖度草地外其它各地类均有所增加。具体分析如下：

- (1) “沙地”逐年增加，1993 年比 1972 年面积增长了 16.22Km<sup>2</sup>，占 1972 年面积的 21.2 %，主要表现为被草地封固的沙丘陡坡一侧的风蚀地和沙地在增加；
- (2) “湿地与水体”的变化趋势基本一致，均比 1972 年面积增长约 8.513.5 %；且由于 19771979 年连续 3 年的丰水年（见图 6），故 1979 年水域与湿地面积均达最大值；而 1987 年虽年降水量超过 1979 年，但 19801986 年连续 7 年降水量均不大，故水域与湿地面积均未超过 1979 年；这说明水域、湿地的面积变化主要受年度降水量的控制；
- (3) “农田”增加了 3.39Km<sup>2</sup>，图 5 显示了区内圆形喷灌地的增加；

(4) 占全区面积 80 % 以上的“草地”面积约在 812% 范围内增减, 但总体显示出植被覆盖度、绿度的减少趋势。其中, 低覆盖度草地呈明显的减少趋势, 1993 年比 1972 年减少了约 62.79Km<sup>2</sup>, 约占 1972 年面积的 12 %, 且多被沙地等地类所取代。

图 6 为 1949-1991 年年平均气温和平均降水变化曲线图。图中显示近 40 多年来研究区气温和降水均存在较大波动, 气温和降水的总趋势均稍有下降; 但本地区夏季 (68 月) 降水集中 (约占全年降水的 50% 以上), 是控制该区生态环境变化的最重要的季节。分析该区夏季的气候资料可见, 气温呈上升趋势, 降水明显下降, 气候干燥度呈增加趋势 (图 7)。应该说, 这是该区沙地增加、植被盖度与绿度减少的主要原因。由于该区为“地广人稀”的大草原景观, 人为的干扰因素少, 尽管环境变化不十分明显, 但气候因子对环境变化的影响仍不能被忽视, 两者之间的关系有待进一步研究。

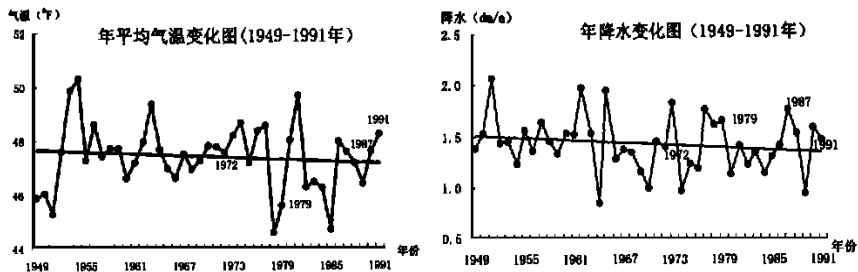


图 6 年平均气温和平均降水变化图 (据 Ellsworth 气象台站数据)

Fig. 6 Annual changes of average temperature and precipitation

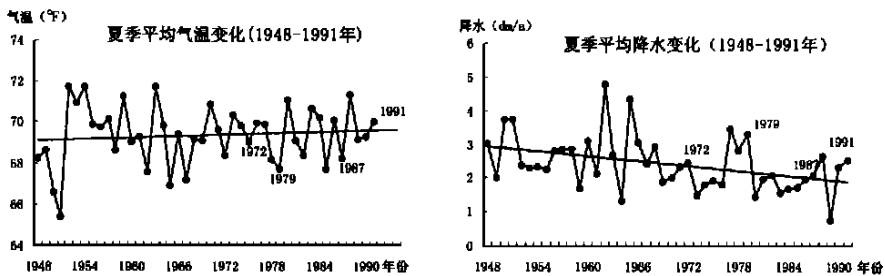


图 7 夏季平均气温和平均降水变化图 (据 Ellsworth 气象台站数据)

Fig. 7 Changes of summer temperature and precipitation

参考文献:

[ 1 ] Kuzila M, Rundquist D and Green J. Methods for estimating wetland loss: the Rainbasin region of Nebraska, 1927-1981[ J]. Journal of Soil and Water Conservation. 1991, 46( 6): 441-446.

[ 2 ] Zhou X T, Folving S. Application of spectral mixture modeling to the regional assessment of land degradation: A case study from Basilicata, Italy[ J]. Land Degradation & Rehabilitation, 1994, Vol. 5: 215-222.

[ 3 ] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[ J]. Int. J. Remote Sensing, 1996, 17( 7): 1425-1432.

[ 4 ] Zhao Yingshi. Integrated analysis of remote sensing data for natural environment changes [C]. Proceeding of the 11th Asian

Conference of remote Sensing, International Academic Publishers, 1990.

[ 5 ] 陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析[ M ]. 测绘出版社, 1990.

[ 6 ] 张熙川, 赵英时. 应用线性光谱混合模型快速评价土地退化的方法研究[ J ]. 中国科学院研究生院学报, 1999, 16 ( 2 ): 169176.

## A study on environmental change analysis in Sand Hill of Nebraska using remote sensing

ZHAO Ying-shi

( Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China )

**Abstract:** In this paper, the Sand Hill of Nebraska, a typical semi-arid area located in mid-west part of US and recognized as the largest 'sand sea' in the western hemisphere, is selected as the study area. The study is focused on extraction of thematic information referring to sands, wetlands, waters, and grassland, which relatively indicate environmental changes in the region. Four temporal Landsat TM and MSS data from 1972 to 1993 are collected for analysis. In the study, LSMM ( Linear Spectral Mixture Model ) is applied to pixel decomposition for classification of sands, and TC transformation is used for separation of vegetation and soil. Besides, thematic information on sands, wetlands, waters, and grassland with different coverages is extracted through synthetic analysis of NDVI ( Normalized Difference Vegetation Index ), NDWI ( Normalized Difference Water Index ) and NDMI ( Normalized Difference Moisture Index ). Remote sensing images in 1972, 1979, 1987 and 1993 are classified respectively and compared to obtain the changes in corresponding land types. The features of environmental changes for the last 20 years in the study area are finally discussed.

The result shows that there has been the trend towards increasing in the areal extent of sands and towards decreasing in coverage and green degree of grassland in the study area and that, changes of areal extent of wetlands and waters are controlled by annual precipitation. Through analysis on temperature and precipitation of summer for more than 40 years, which is understood as the most important season for energy exchange and changes of ecological environment in a year of this region, we can infer that the upwards trend of temperature, the downwards trend of precipitation and the desiccation trend of climate are the main causes for the increase of sandy area and decrease of vegetation coverage and green degree.

For the study area, which belongs to the sparsely populated prairie landscape, even there is less human interference and slight environmental change, the impact of climatic factor on environmental change should not be ignored. The relation between climate and environmental change will be further studied.

**Key words:** environmental change; LSMM; TC transformation; extraction of index