第31卷, 第6期
2011年6月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 31, No. 6, pp1633-1638
June, 2011

罗布泊遥感影像"耳纹"特征分析及其环境意义

蔡爱民[1,2], 邵　芸[1*], 宫华泽[1], 王国军[1,2], 谢　酬[1]

1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所, 北京　100101
2. 中国科学院研究生院, 北京　100049

摘　要　研究典型干旱区的罗布泊, 对揭示区域环境演变特征和全球变化具有重要意义。从遥感影像上的"耳纹"特征入手, 通过光谱、土壤和地表参数等分析, 认为: 地表全盐含量和结构差异是形成罗布泊遥感影像"耳纹"特征的直接原因; 光谱、全盐含量和土壤粒径的分析结果具有很好的一致性。"耳纹"记录下了罗布泊地区的环境演变特征, 这些特征表明: 受全球环境影响, 湖水在气候不断干旱的过程中逐渐干涸, 干涸过程的气候调整, 使罗布泊地区经历了两次相对湿润的气候环境, 前一次较长, 后一次很短。

关键词　罗布泊; "耳纹"特征; 光谱; 环境演变; 全球变化
中图分类号: P951　　文献标识码: A　　DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)06-1633-06

引　言

干旱地区是全球环境的组成之一, 具有对全球变化响应的高度敏感性, 研究这些区域的环境演变特征对揭示全球变化特征具有重要意义。罗布泊作为中国最大的内陆河流——塔里木河的尾闾湖, 水域面积最大时曾达到5 000 km^2[1], 大约在20世纪30年代末或40年代初干涸[2]。1972年美国地球资源卫星发回的影像首次显示出干涸后的罗布泊在空间形态上酷似一只"大耳朵"[3], 从而引发了大量对于罗布泊现象的研究, 很多新型技术也被纷纷应用进来[2, 4-8]。

罗布泊的变迁乃至干涸不仅反映了干旱区湖泊变化的一般规律, 也记录了干旱区环境变化的历程, 蕴含着丰富的第四纪地质学、古气候学、古生物学等信息。已有研究表明罗布泊的变迁与环境变化息息相关, 罗超认为罗布泊地区的气候变化在全球气候变化的背景下产生的[5]; 谢连文发现罗布泊地区与北半球1000年以来的气候变化具有一定的对应性[6]; 王富葆的研究则表明湖面的扩张与收缩受到全球气候变化因素的驱动, 而变化幅度的强弱和区域环境因素有关[9]。

本文选用的遥感影像是2001年5月6日过境的Landsat ETM影像, 影像上分布着明暗相间、近似平行展布的环状结构, 每一环带内还有一些与大环带平行排列的细环状线条, 它们共同组成形似人耳状的环带"耳纹"特征(图1)。这种特征可能来自罗布泊地表物质上的差异, 也可能来自其他方面的间接影响。已有研究表明, 基于雷达遥感获取的影像, 同样存在类似的"耳纹"特征, 只是在细节上存在差异[10]。

本文将在罗布泊实地考察的基础上, 从实测光谱数据出发, 结合土壤粒度、地表全盐含量、地表粗糙度、地下水深度等分析, 尝试对罗布泊"耳纹"特征的形成原因进行探讨, 并分析其可能包含的环境意义, 以期为研究干旱区的环境变化提供借鉴。

1　研究区概况

罗布泊位于亚欧大陆腹地、塔里木盆地的最东端, "耳纹"区平均海拔约780 m, 远离四大洋, 湿润气流很难到达这里, 有地球"旱极"之称, 年降水量不足10 mm, 年蒸发量超过3 000 mm, 空气湿度0~20%。冬季极端最低气温-33 ℃, 夏季极端最高气温45 ℃, 地表温度可达71 ℃[11]。

在罗布泊逐渐干涸的过程中, 湖水不断浓缩, 历经淡水、半咸水、咸水过程, 最终盐类物质结晶[12], 形成了如今不同地貌类型的地表盐壳。湖底十分平坦, 从罗布泊镇到湖心近50 km的范围里, 最大高程不到5 m, 坡度东北大, 西南小[2]。在遥感影像上, 各环带的色调和宽窄各不相同, 比较明显的两个浅色耳廓条带宽度为4~5 km。各环带以湖心岛东北端为中心形成向东北突出的耳廓形状, 但时有迭置或

收稿日期: 2010-08-19, 修订日期: 2010-11-19
基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-313-2)和国家(863计划)项目(2007AA12Z168)资助
作者简介: 蔡爱民, 1978年生, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生　e-mail: caiam@irsa.ac.cn
* 通讯联系人　e-mail: yunshao@irsa.ac.cn
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

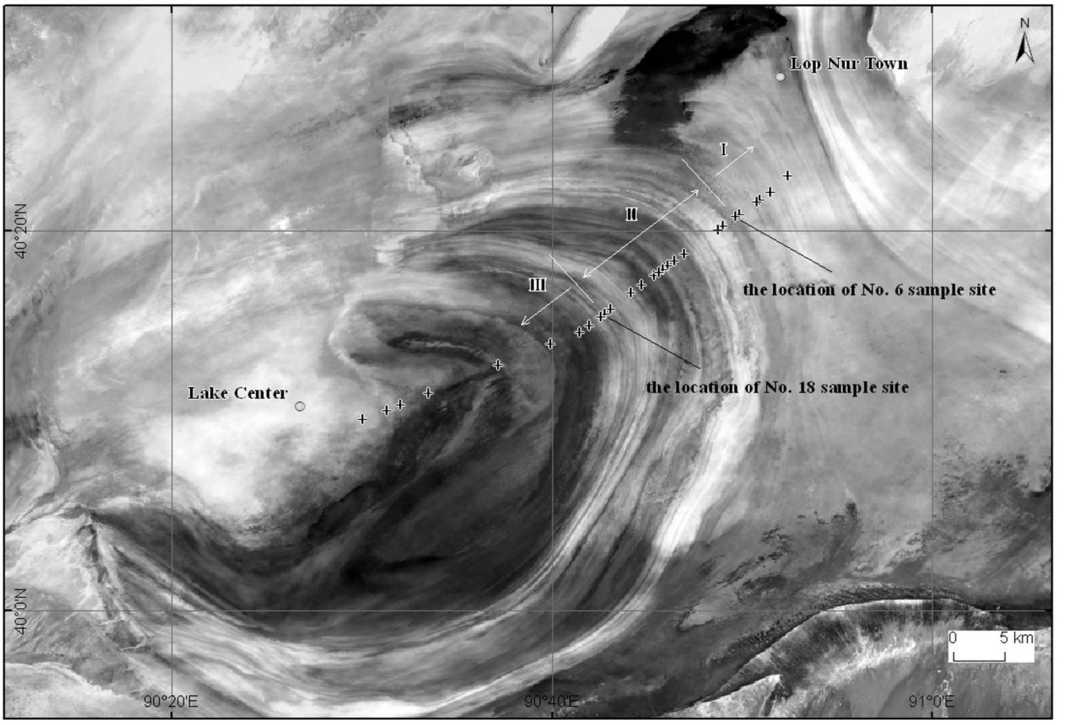

Fig 1 Lop Nur remote sensing image and the distribution of sample sites

合并。

2 技术方法

这种环状分布的"耳纹", 多数观点认为是湖水在干涸、退缩过程中不同阶段的湖相沉积物形成的[2, 11], 与湖水在快速退缩时水位停滞的时间长短有关, 诱因是气候冷暖交替变化导致的湖水扩展和收缩[12], 这些结论多是基于逻辑推论, 缺乏直接证据。本研究以实地观测光谱与遥感影像对应波段的分析为出发点, 以期找到在遥感影像上出现"纹理"的直接原因。选作参考的 ETM 影像具有较好的空间分辨率和较多的波段, 其波段分布特征见表 1。

Table 1 The characters and range of ETM bands

波段号	类型	波谱范围/μm	地面分辨率/m
Band 1	Blue Green	0.450~0.515	30
Band 2	Green	0.525~0.605	30
Band 3	Red	0.630~0.690	30
Band 4	Near IR	0.775~0.900	30
Band 5	SWIR	1.550~1.750	30
Band 6	LWIR	10.400~12.500	60
Band 7	SWIR	2.090~2.350	30
Band 8	Pan	0.520~0.900	15

以 ETM 影像上的纹理为参考, 从罗布泊镇往湖心方向, 即"耳纹"由外至里, 依次在纹理的明暗处选择了 27 个样点, 样点分布见图 1。

2.1 光谱测量

光谱测量仪器使用的是美国分析光谱设备(ASD)公司主要的野外用高光谱测量设备 Field Spec Pro 型光谱仪 ASD2000, 该光谱仪可获取 350~2 500 nm 波长范围内目标的光谱曲线, 基本涵盖 ETM 的多光谱波段(热红外波段除外), 采集光谱角为 10°。以土壤采样点半径 30 m 为范围, 每个样点共采集 12 组数据, 以均值作为该样点的光谱反射值。

2.2 土壤参数

土壤参数测量了土壤含水量、土壤全盐含量、土壤粒度, 并采用开挖的方法, 量算了地下水深度。土壤含水量采用烘干法。全盐含量的测算方法为: 将土壤样本过筛后, 配置土壤溶液过滤, 将过滤液放在加热板上加热至水分较少后, 烘干称重。

粒径分析采用 Malvern Mastersizer 2000 型粒度分析仪, 该仪器可一次性得到粒度分布曲线, 为分析简单起见, 结果分析时, 把粒径分成了两类: > 50 μm 的粗粒径物质和 < 50 μm 的细粒径物质。

2.3 地表粗糙度

湖盆区土壤含盐量、地下水深度差异会引起夏季的热胀冷缩作用和冬季浅层地下水冻胀作用的差异, 最终导致地表结构发生差异变化。为了刻画地表结构上的差异, 对地表进行了粗糙度测量。粗糙度是对地表微地貌起伏状况的一种刻画[13], 以均方根高度(s)表示地表垂直方向上的离散程度, 相关长度(l)表示水平方向上的相关性, s 越大或 l 越小, 则地表越粗糙。地表粗糙度采用针式剖面仪法。

3 结果分析

3.1 光谱特征

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

野外光谱观测操作，复杂的地表环境会对其产生很大影响[14]，使获取的光谱曲线产生抖动。为去除光谱噪音，对大气吸收带外的光谱曲线进行了平滑处理，平滑窗口取 9 nm，平滑后的光谱曲线见图 2。

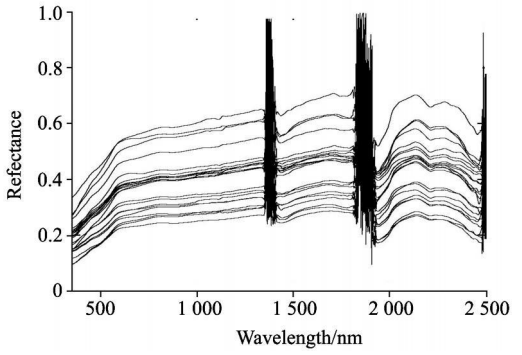

Fig 2　Spectral curves of different sample sites

可以看出样点的光谱曲线具有土壤光谱的典型特征，在 350~ 650 nm 区域，光谱曲线迅速上升，只是斜率有所不同，在 1 450，1 940 和 2 210 nm 处是水分产生的吸收谷[15]，三个水分吸收带的深度有些差异。罗布泊地表的含盐量很高，其固着水的能力较强，故而有明显的吸收谷。

不同样点的光谱形状基本相似，样点间光谱曲线平行展布的特征说明了在不同样点处反射率存在差异。将观测光谱和 ETM 的多波段光谱统一到相同的量纲上，然后对比分析。将经过大气校正的 ETM 影像的 DN 值转化为反射率[16]

$$L_\lambda = \mathrm{Gain} \cdot \mathrm{DN} + \mathrm{Bias} \tag{1}$$

式中，L_λ 为对应波段的辐射亮度；Gain 为增益；Bias 为偏置。再将 L_λ 转化为反射率

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{\mathrm{ESUN}_\lambda \cdot \cos\theta_s} \tag{2}$$

式中，ρ_λ 为反射率；d 为日地距离；ESUN_λ 为大气外界的平均太阳辐射亮度；θ 为太阳高度角。

将观测光谱曲线与 ETM 的光谱响应函数进行加权处理[17]，即可得到观测光谱在 ETM 对应波段上的光谱反射率。比较结果见图 3，其中 9，10，11 和 24 号样点在观测时临近傍晚，太阳高度角太低，没有在图中列出。

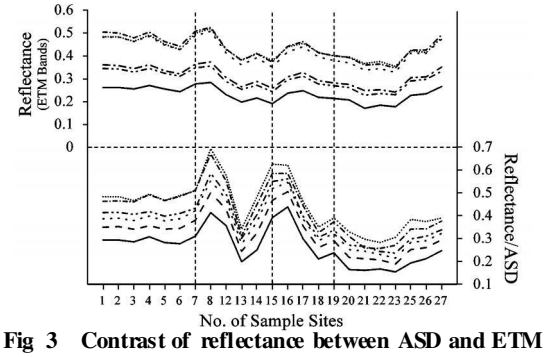

Fig 3　Contrast of reflectance between ASD and ETM

比较地面观测值与遥感影像上的值可以发现：

(1) 两者在不同样点间变化起伏基本一致，呈现出良好的同步波动。它们的峰值与谷值，即“耳纹”的明暗部分一一对应，说明地表反射率的差异导致了遥感影像上纹理的出现。

(2) 波动的幅度存在差异，其中，观测光谱在 7 号样点到 19 号样点间的变化幅度明显高于 ETM 对应波段，而 15 和 19 号样点甚至出现了比较明显的相反波动特征，说明星载数据获取的反射率还受到其他因素影响。

3 2　地表粗糙度

由于极端的气候环境，地表夏季经受的热胀冷缩，和浅层地下含水层冬季的冻涨顶托作用，使罗布泊湖盆区地表极其破碎。破碎程度会因为土壤含盐量、地下水深度、湖底暴露时间长短的不同而产生差异。

杂乱排布的竖立盐壳使太阳光的方向性反射增加，阴影也随之增加，从而使采用星下点获取太阳辐射反射信息的遥感影像的反射率降低。粗糙度越大，这种现象越明显。在 6—19 号样点间将地表粗糙度与 ETM 反射率进行对比分析，鉴于相关长度测量的不稳定性[18]，在此仅以均方根高度进行分析，结果见图 4。

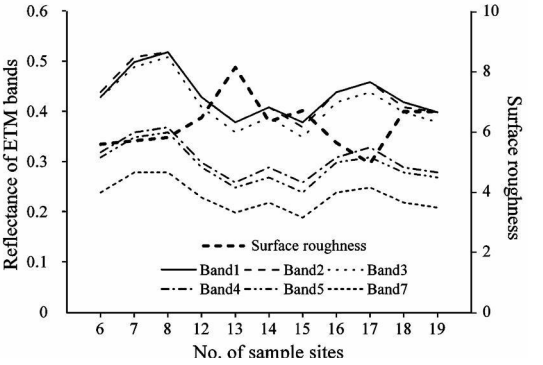

Fig 4　Contrast of surface roughness to the reflectance of ETM bands

图 4 显示，粗糙度和 ETM 的反射率呈现出几乎相反的波动特征。也即地表粗糙度越大，对应的反射率越低，即破碎地表产生的方向性反射和阴影效应，给星载数据的反射率带来了负面影响。地面观测由于尽量选择了平坦的地表，回避了方向性反射和阴影区，从而使采样光谱的波动幅度高于遥感数据。

3 3　全盐含量

土壤盐分来自于两部分：湖水干涸过程中固着在土壤里的部分和湖水干涸后地下水毛细上升的析出部分。其中，后期析出的盐分直接形成了结晶盐，通常与土壤独立存在，但研究区少量的季节性降雨会使结晶盐溶解，与土壤混合后固着到土壤里。全盐含量的分布与地下水位特征见图 5，图 5 为便于比较样点间的空间尺度，以双横坐标表示了样点间的距离，有些样点因为距离很近，为避免重叠，只标注了部分样点。

地下水位往湖心方向逐渐变浅，由于地表很破碎，给地下水位量算带来一定抖动。全盐含量由外围至湖心方向增大明显，且呈现出明显的两个区域：处于外围的 1—8 号样点间全盐含量较低，平均值为 26 22%。处于内围的 9- 27 号样点间全盐含量明显偏高，平均值高达 73. 76%，8 号到 9 号样

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点间是全盐含量的突变期。土壤全盐含量的明显不同，指示了不同的土壤含盐富集过程。也即，外围和内围经历过不同的湖水盐分浓缩阶段，湖水充盈时含盐量会降低，湖水干涸浓缩后含盐量会增加。在 18 号样点处，地表全盐突然降低，可能经历过水的浸泡，即湖水在退缩过程中可能经历了一次短暂的扩张过程。扩展的湖水到达 18 号样点处，使得土壤盐分溶解，短暂停留后又继续后退，直至干涸。使得该样点与邻近的 17 和 19 号样点间虽仅距 0 5 km 左右，含盐量却差异很大。地下水位在该处也很浅，可能是水位扩张后影响了地下水位所致。

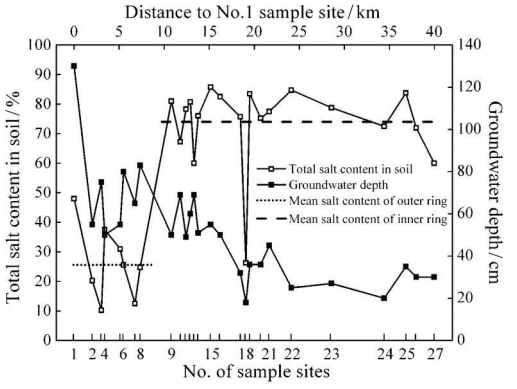

Fig 5 Total salt content in soil and groundwater depth

不同纹理处光谱反射率差异的主导原因应该是地表含盐量所致[14]。为分析含盐量可能引起的光谱差异，消除其他因素的影响，分别选取含盐量高低差异的 5 个样点，对比分析它们的平均光谱。结果表明：高含盐量的地表反射率明显高于低含盐量区(图 6)。ASD 观测光谱与 ETM 对应波段换算得到的反射率，也显示了观测光谱与土壤含盐量较好的同步波动关系(图 7)。图 7 仅比较了纹理比较明显的 6—19 号样点区域，个别样点间不同的波动关系(6—7 号和 15—16 号)可能出自于局部地区较高地下水位的返潮影响。实地考察中经常见到返潮的地表，早晨和上午观测时尤其明显。受此影响，个别土壤水含量可达到 4. 29%，在极端干旱的罗布泊地区，地表土壤水含量达到这种程度已经很高了。

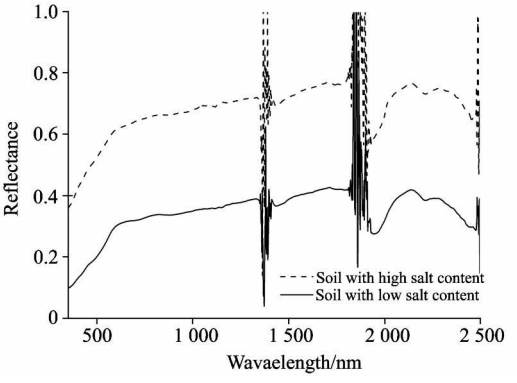

Fig 6 The difference of reflectance between soil with high and low salt content

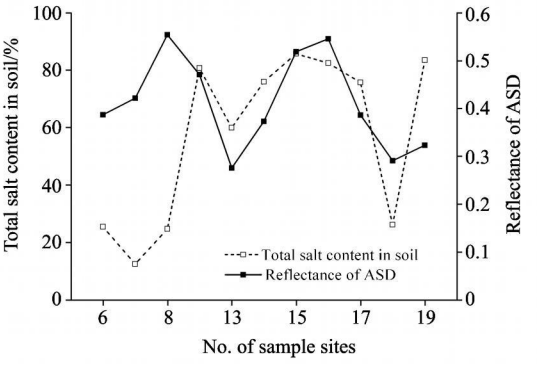

Fig 7 Contrast of observed spectral reflectance and soil salt content

3 4 土壤粒径

罗布泊从水位退缩至最后彻底干涸，经历的时间很短[1, 2, 11]，对于封闭式的短时间尺度湖泊研究，高组分的粗粒径沉积物指示了有强动力水流入湖[19]。粒径大指示降雨量较大的湿润年份，粒径小指示降雨量相对较小的干旱年份。即沉积物粒径能反映气候的湿润程度。粒径的变化趋势见图 8。

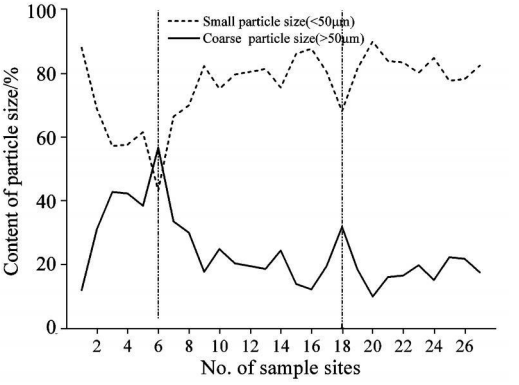

Fig 8 The change of particle size in different sample sites

可以看出，土壤粒径从外围至湖心有明显的波动变化，指示了湖水干涸退缩过程中气候湿润状况的波动特征，其中在 6 和 18 号样点处，粒径有明显的跳跃特征，粗粒径物质明显增多，说明在 6 和 18 号样点位置，罗布泊经历了两次丰水期。6 号样点比 18 号样点粒径偏大，样点周围的粒径也较大，说明 6 号样点位置经历的湖水扩张周期要长，气候更为湿润。18 号样点处只是经历一次湖水短暂的充盈过程。土壤粒径分析得到的气候特征与全盐含量分析得出的结果一致。粒径与含盐量分析样点的相互错位，应该缘于沉积过程和析盐过程分属于湖岸线的不同侧所致。

4 环境响应分析

罗布泊的“耳纹”特征是湖水在逐渐干涸过程中产生的，气候环境演变经历了多个干湿交替期，干旱是主导趋势[12]，

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而湖岸退缩时留下的“耳纹”特征，反应的是最后一次湿润期向干旱期转变时的调整历程。6 号点对应调整的开始，18 号点对应气候调整的结束，从而分别在 6 号点内和 18 号点外出现了两个比较宽的纹理条带，两个宽条带间出现了一些更细的条带。当干旱的环境占据主导趋势后，湖水迅速退缩，直至干涸。

以 6 号和 18 号样点为界线可以将“耳纹”分为三个区域(图 1)：6 号样点以外的为Ⅰ区；6—18 号样点之间的为Ⅱ区，18 号样点以内的为Ⅲ区。

Ⅰ区：属于“耳纹”外围区，对应罗布泊进入干旱环境前较长的气候湿润期。从图 3 可以看出，无论是对于观测光谱还是遥感数据，该区域的反射率波动都很小。该地区的含盐量较小，土壤粒径较大。

Ⅱ区：对应气候由湿润向干旱转变的调整期。气候的调整在 6—18 号样点间留下了明显的纹理特征，光谱在这个区域的波动最为明显。实地考察中，发现该地区的地表析盐程度跳跃很大，15 号样点的地表析盐覆盖度一度达到 85%，地表析盐的差异，是湖水浓缩过程中受影响的地下水在后期的湖盆演化中产生的印记。

Ⅲ区：湖水迅速退缩区，干旱的气候环境占据主导地位。当水位经历最后一次短暂扩张到达 18 号样点后，干旱的气候特征主导了这个区域。罗布泊残留的湖水在周边极端干旱的环境下迅速干涸。18 号样点到湖心 20 多公里的范围上高差不到 1 m[2]，较浅的水位加上缺乏水源补给，使湖岸后退很快，留下的纹理宽度很大。

罗布泊地区不是一直干旱的，历史上曾一度很湿润[8]，并孕育了楼兰文明。只是在全球环境变化的大背景下，由原来的淡水湖向微咸水湖泊、咸水湖、盐水湖慢慢演变[12]，直至最后彻底干涸。“耳纹”的结构特征记录下了罗布泊的环境演变历程。

5　结论与讨论

遥感能够客观、宏观地反应地表特征，自罗布泊的“耳纹”特征被遥感揭露后，对其研究引起了极大兴趣。引起对其兴趣的不仅仅是其形态特征，更是由于处于极端环境下的罗布泊对环境响应具有敏感性，研究其变迁特征易于揭示环境的演变规律，这对于当前全球变化引起的众多环境问题，研究罗布泊无疑更具有重要意义。

本文通过“耳纹”特征的分析，发现地表土壤的全盐含量和微地貌特征是形成罗布泊“耳纹”的直接原因。“耳纹”的特征与气候环境的演变历程相对应，在罗布泊最后彻底干涸的过程中，罗布泊地区经历了两次短暂的丰水期，前一次较长，后一次很短。

罗布泊“耳纹”的形成有着复杂的机制，可以肯定的是其形成是环境演变的产物，要对其深刻了解，需要多个学科开展广泛、深入的联合研究，从而挖掘出其包含的丰富信息。受制于野外光谱观测影响因素的复杂性，本文没有针对光谱曲线进行定量分析，而是仅从光谱特征出发，结合其他观测数据对罗布泊地表的纹理特征进行了定性分析，但定性分析并不影响环境意义上的诊断。定量分析是否有助于分析罗布泊地区土壤的组成，并揭示出其他信息，有待于后续土壤样本的室内观测后进行分析。

References

[1] Xia X C, Mu G J, Lei J Q. Science in China Series D-Earth Sciences, 2002, 45(Supp.): 148.

[2] LI Bao-guo, MA Li-chun, JIANG Ping-an, et al(李保国, 马黎春, 蒋平安, 等). Chinese Science Bulletin(科学通报), 2008, 53(3): 327.

[3] Short, N M. NASA, Mission to Earth: Landsat Views the World. Washington D.C., USA: U.S. Government Printing Office, Secondary Education, 1976.

[4] ZHONG Jun-ping, MA Li-chun, LI Bao-guo, et al(钟骏平, 马黎春, 李保国, 等). Arid Land Geography(干旱区地理), 2008, 31(1): 10.

[5] Luo C, Peng Z C, Yang D, et al. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(1): 38.

[6] XIE Lian-wen, LI Feng, LI Bing-hai, et al(谢连文, 李　锋, 李兵海, 等). Sedimentary Geology and Tethyan Geology(沉积与特提斯地质), 2004, 24(4): 76.

[7] MA Li-chun, LI Bao-guo, JIANG Ping-an, et al(马黎春, 李保国, 蒋平安, 等). Chinese Journal of Geophysics(地球物理学报), 2007, 50(2): 651.

[8] Ma C M, Wang F B, Cao Q Y, et al., Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19): 3016.

[9] WANG Fu-bao, MA Chun-mei, XIA Xun-cheng, et al(王富葆, 马春梅, 夏训诚, 等). Quaternary Sciences(第四纪研究), 2008, 28(1): 150.

[10] GONG Hua-ze(宫华泽). SAR Remote Sensing Research on Subsurface Targets Detection and Environmental Evolution in Lop Nur Palaeo-lacustrine basin[D]. Intitute of Remote Sensing Application, Chiese Academy of Sciences(中国科学院遥感应用研究所). PhD Thesis., 2010.

[11] XIA Xun-cheng, WANG Fu-bao, ZHAO Yuan-jie(夏训诚, 王富葆, 赵元杰). Lop Nur in China(中国罗布泊). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2007.

[12] Wang M L, Pu Q Y, Liu C L, et al. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2000, 74(2): 273.

[13] Mattia F, Davidson M W J, Le Toan T, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003. 41(7): 1659.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[14] Howari F M. Annali Di Chimica, 2004, 94(4): 315.
[15] LU Peng, WEI Zhi-qiang, NIU Zheng(路 鹏, 魏志强, 牛 铮). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(3): 716.
[16] Chander G, Markham B L, Helder D L. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893.
[17] Landsat Handbook. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter8.
[18] Oh Y, Kay Y C. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998. 36(2): 691.
[19] CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, ZHANG Feng, et al(陈敬安, 万国江, 张 峰, 等). Science in China, Ser. D(中国科学: D 辑), 2003, 33(6): 563.

Analysis of Lop Nur "Ear" Features in Remote Sensing Image and Its Environmental Meaning

CAI Ai-min[1,2], SHAO Yun[1*], GONG Hua-ze[1], WANG Guo-jun[1,2], XIE Chou[1]
1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract There is a great significance of revealing the characteristics of regional environment evolution and global change to the research on arid Lop Nur areas. By the "Ear" features of Lop Nur in remote sensing image, the spectrum, soil and surface parameters were analyzed. The differences in total salt content in soil and the surface structure bring are cause directly for the "Ear" features in remote sensing image; The results of the analysis of spectrum, total salt content and particle size are in good agreement. "Ear" features recorded the process of environmental change. The process implys that Lop Nur dried up gradually under the impact of global change. The adjustment during the process of drying up let Lop Nur experience two relatively humid climates, with the previous a little longer, the later very short.

Keywords Lop Nur; "Ear" feature; Spectrum; Environmental change; Global change

(Received Aug. 19, 2010; accepted Nov. 19, 2010)

* Corresponding author

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net