

宫华泽, 邵芸, 王国军等. 罗布泊湖相沉积物极化散射特性及其环境意义. 地球物理学报, 2013, 56(2): 431-440, doi:10.6038/cjg20130207.

Gong H Z, Shao Y, Wang G J, et al. Polarimetric and scattering properties of subsurface saline lacustrine deposits in Lop Nur Lake Basin, China using Synthetic Aperture Radar data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(2): 431-440, doi:10.6038/cjg20130207.

罗布泊湖相沉积物极化散射特性及其环境意义

宫华泽¹, 邵芸¹, 王国军^{1,2}, 蔡爱民^{1,2}, 张婷婷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 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 通过对罗布泊古湖盆区域(“大耳朵”)湖相沉积物含水量与含盐量、介电性质、地表微地貌等理化参数的分析, 本文提出了罗布泊古湖盆区域的散射过程与次地表散射结构; 利用全极化测量技术(PolSAR, Polarimetric Synthetic Aperture Radar), 本文对不同纹理区域进行了物理散射机制的定量化剖析, 同极化相关分析与极化度推算结果表明整个“大耳朵”区域后向散射强烈, 亮条带比暗条带的散射机制更为复杂, 地表微地貌状态是造成“大耳朵”特征的表现原因. 在此基础上, 本文利用极化分解技术进一步分离不同散射机制分量, 通过定量比较各部分贡献对于“大耳朵”特征的代表能力, 提出次地表介质性质(如含盐量)是“大耳朵”特征的根本性成因, 相关性可达 0.784, 同时分析了次地表高含水含盐湖相沉积物在 SAR 响应中的重要性及其与地表形态之间的动力学形成机制. 最后, 本文论证了合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)在罗布泊地区的穿透能力, 预示着 SAR 遥感技术在干旱区环境研究中的应用潜力.

关键词 罗布泊, PolSAR, 极化参数, 极化分解, 穿透性, 湖盆演化

doi:10.6038/cjg20130207

中图分类号 P228, P631

收稿日期 2012-02-14, 2012-12-14 收修定稿

Polarimetric and scattering properties of subsurface saline lacustrine deposits in Lop Nur Lake Basin, China using Synthetic Aperture Radar data

GONG Hua-Ze¹, SHAO Yun¹, WANG Guo-Jun^{1,2}, CAI Ai-Min^{1,2}, ZHANG Ting-Ting¹

¹ State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Analyses about physical and chemical parameters of lacustrine deposits such as moisture, salinity, dielectric property and surface micro-topography, were carried out to investigate the scattering mechanisms and subsurface scattering structure in Lop Nur Lake Basin (the “Ear” region). Using PolSAR (Polarimetric Synthetic Aperture Radar) technology, physical scattering mechanisms in different texture regions were analyzed quantitatively. The calculated results of the co-polarization correlation and degree of polarization reveal that the whole “Ear” region produced strong backscattering energy, and the scattering mechanism of bright strip is more complicated than that of grey strip. The formation of “Ear” feature is apparently due to

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-320)、国家自然科学基金项目(41201346)和国家 863 计划项目(2007AA12Z168)资助.

作者简介 宫华泽, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 现从事干旱区雷达遥感技术、罗布泊环境演变过程、雷达遥感基础理论与实验等方面的研究. E-mail: gonghz@irsa.ac.cn

the status of surface micro-topography. Then, this paper further extracted the contributions of different scattering mechanisms using polarimetric decomposition algorithm. Based on quantitative comparison among the three parts, subsurface characteristics (e. g. : salinity) are demonstrated to be fundamental cause of “Ear” feature, with R square of 0.784. Meanwhile, the results indicate that subsurface lacustrine sediments with high moisture and salinity are important for SAR response, which are also related with surface pattern. The penetrating capability of SAR is proposed to be effective in Lop Nur Lake Basin, which means its significant potential for arid environment study.

Keywords Lop Nur, PolSAR, Polarimetric parameter, Polarimetric decomposition, Penetration, Lake basin evolution

1 引言

罗布泊是我国干旱区著名的湖泊,地处古代沟通东西方文化的通道——丝绸之路的要冲,在我国古代史上享有盛名.然而,由于自然条件的变迁和社会经济等原因,致使此地成为人迹罕至的一片荒漠,变成了一个充满自然和文化之谜的神秘地区,堪称“死亡之海”.罗布泊及其临近地区,地处欧亚大陆干旱核心区,是亚洲乃至全球的旱极,其地理、生物、地质、环境演变等方面历来受到学术界的密切关注,特别是历史时期的急剧变化为干旱地区环境变化的一个缩影^[1].罗布泊是青藏高原北侧最大沉积盆地——塔里木盆地的沉积中心之一,其沉积历史不仅与气候变化有关,也与高原隆升密切相关,第四纪以来这里的沉积与构造演变历史是高原构造变动与气候变化因果关系的最真实反映,是解读青藏高原隆升对区域气候变化影响的一把钥匙^[2].近百年来,曾有一些中外学者来到这里进行了探险与考察,但围绕着罗布泊地区的许多科学问题,仍存在着诸多分歧与争论^[3-4].其中,罗布泊“大耳朵”特征至今仍然没有找到其根本性成因,很多专家从地质、地理、水文、古气候等角度均提出了各自的观点^[5-11],但缺乏观点间的相互支撑与多学科知识的兼顾,还没有找到“大耳朵”特征的根本性成因.

罗布泊古湖盆区域在光学和雷达遥感图像上均呈现出“大耳朵”特征,但雷达遥感图像所表现的纹理更加清晰与完整,尤其在湖盆边缘区域.基于湖相沉积物的理化性质分析,本文首先提出了罗布泊古湖盆区域次地表散射结构.其次,利用 PolSAR 技术对罗布泊“大耳朵”区域进行极化参数的推算,通过物理散射过程的分析,指出造成“大耳朵”纹理特征的表现原因;结合极化分解结果,探讨“大耳朵”特征

的根本性成因.最后,本文论证了 SAR 在罗布泊地区独特的穿透能力,从而展现 SAR 在干旱区地下目标探测与隐伏特征提取技术方面的应用潜力.

2 材料与方 法

2.1 研究区背景

罗布泊位于新疆塔里木盆地东隅、欧亚大陆腹地,年降水量不足 20 mm,而蒸发量却超过 3000 mm,这里是孤立于四大洋的神秘地带,海洋的湿润气流很难到达,是欧亚大陆的干旱核心区,也是青藏高原北侧最大沉降盆地的沉积中心之一^[12].夏训诚等人^[1]指出罗布泊历史时期的水域面积可达 5350 km².发达的水系分布是造成罗布泊现象的驱动力,而最低的地理位置,使得大量的矿物盐分无法向外排泄,最终形成了罗布泊地区高盐的特点.另一方面,极端干旱的气候使发达的水系日渐衰退,导致河水断流.大量的蒸发与极少的水源补给使罗布泊逐渐干涸,期间可能由于短暂湿润气流的到达而经历了反复多次的水面扩大与缩小,最终留下了世人为之着迷的“大耳朵”湖盆.

罗布泊的演化是在内外营力驱动下,历经形成、变化、发展与消逝等阶段的综合结果,不单单是气候环境或地质条件变化的产物.“大耳朵”形状的构成原因可以从其地理位置与周边地势的分析中得到满意的答复,而其奇特之处在于卫星影像上所表现的遍布古湖盆内部的复杂且有规律的纹理特征(图 1).利用雷达遥感技术探明纹理特征所代表的环境意义,这对于查明历史极端气候事件及其对全球变化、青藏高原隆升的响应过程及机理具有重要参考价值 and 科学意义.

2.2 野外调查与测量

为了寻找“大耳朵”特征的根本性成因,2006年

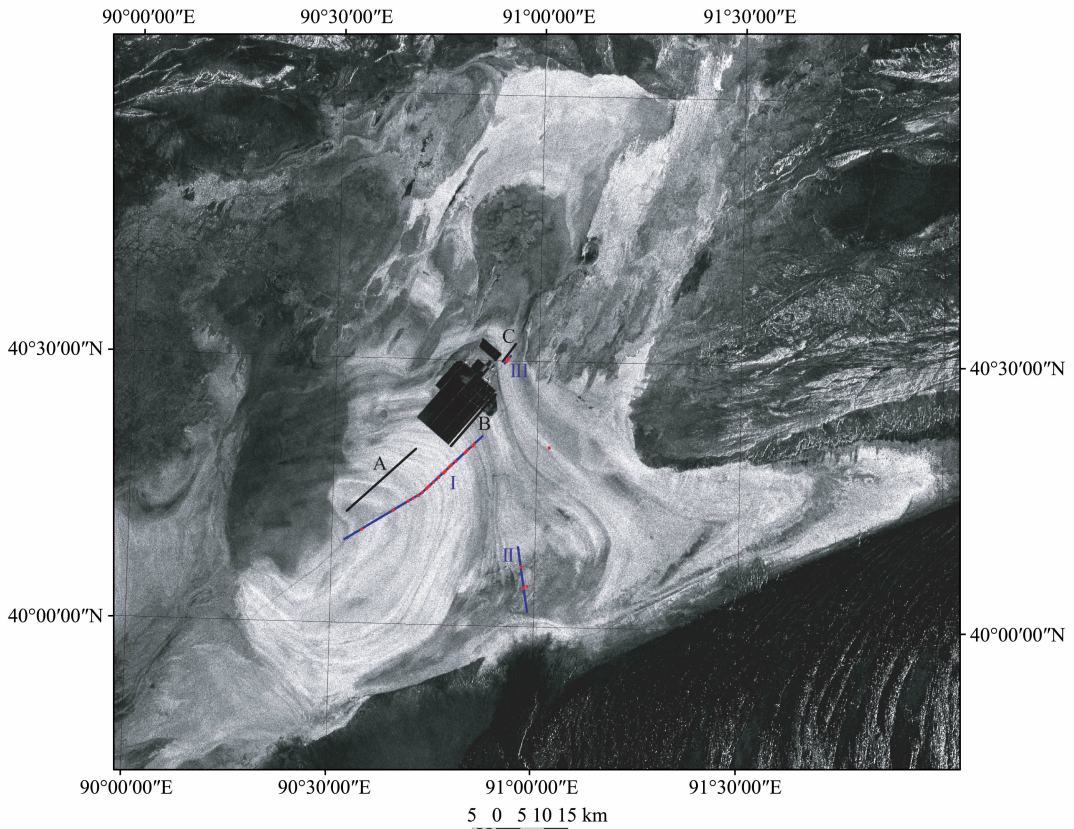


图1 两次罗布泊遥感野外调查路线与观测点位置
以 ALOS-PALSAR(HH 极化 ScanSAR 模式, 2011 年)为背景图, 路线 A、B 和 C 表示 2006 年调查路线,
路线 I、II 和 III 表示 2008 年调查路线, 红色标记表示用于本文分析的观测点。

Fig. 1 Field investigation routes and sampling site locations

A, B, and C are field routes in 2006 (black line); I, II, and III are field routes in 2008 (blue line). Red points represent sampling sites used in this paper. ALOS-PALSAR image (HH polarization, ScanSAR mode) obtained in 2011 was used as a base map.

11月中国科学院遥感应应用研究所开展了首次罗布泊遥感野外调查活动,对罗布泊水源入口(楼兰地区)和古湖盆区域(“大耳朵”)进行了详细的考察,并在罗布泊古湖盆区域选择了东北方向的剖面作为重点研究区域(图1中的A、B和C),全长41 km,每隔2 km 选择一个观测点,利用自制仪器测量地表粗糙度,并采集地表与次地表样本,部分样点同时采集了结晶盐和卤水样本,共获取80份样本,12份结晶盐和卤水样本。在2006年调查基础上,研究人员于2008年11月对罗布泊古湖盆中的重点区域进行了第二次野外调查,首次引入了探地雷达测量(GPR, Ground Penetrating Radar)手段,以期得到罗布泊次地表的结构信息。第二次调查共选择了3条路线(图1中的I、II和III),4个重点研究区,78个观测点(图1),全长62 km,观测点位置根据经过精确几何纠正的SAR图像纹理进行选择,采用高精度GPS终端进行样点定位,使样本在水平方向上具有“大耳朵”纹理的代表性信息。每个观测点沿垂直方

向上的不同深度采集6个样本,密封保存,以便辅助探地雷达数据分析次地表散射结构。为了突出“大耳朵”纹理信息,后期在实验室中开展了样本的体积含水量、常见离子含量(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)、土壤粒度、pH值、复介电常数等理化参数的测试工作,所有测量项目均满足土壤样本测试标准与精度。根据实际采样与参量测量情况,随机在罗布泊古湖盆区域选择25个观测点用于本文的分析,其中前19号点为路线I(图1)沿湖心至湖岸方向的样点(表1)。

2.3 PolSAR 分析方法

PolSAR技术,其数据处理主要针对全极化SAR获取的、具有地物目标电磁散射特性的回波信号进行特定目的的分析,以提取更为丰富的有用信息。PolSAR可以充分利用地物回波的强度和相位数据,提供与地物特性直接相关的信息^[13]。通过国际合作与购买,本研究共获取了RADARSAT-2全极化数据8景,ALOS-PALSAR全极化数据3景,用于不同入射角、不同波段全极化特征及SAR穿透

表 1 罗布泊古湖盆区域观测点理化参量与极化分解结果

Table 1 Physical and chemical parameters of sampling sites selected in Lop Nur Lake Basin

点号	次地表含盐量(%)	ϵ' (L 波段)	ϵ'' (L 波段)	σ_{HV}° (dB)	ks(L 波段)	单次散射(dB)	二面角散射(dB)	多次散射(dB)
1†	87.00	23.89	69.33	-13.54	1.86	-2.34	-12.57	-14.40
2‡	90.25	25.29	76.98	-10.06	2.10	-0.35	-9.29	-10.75
3†	78.63	19.96	55.96	-13.28	1.27	-2.36	-12.16	-14.17
4‡	82.75	22.36	67.09	-10.80	1.91	-1.43	-9.96	-11.47
5†	73.75	16.94	65.58	-11.33	1.60	-1.54	-10.68	-12.20
6†	74.25	17.48	67.79	-10.97	1.46	-1.27	-10.23	-11.70
7‡	82.75	22.18	73.62	-10.38	1.70	-0.28	-9.57	-11.17
8†	81.25	ii) —	—	-11.99	1.10	-1.18	-11.15	-12.74
9†	84.25	—	—	-11.80	1.43	-1.23	-10.90	-12.62
10‡	89.50	—	—	-9.35	1.98	-0.60	-8.68	-10.17
11†	82.00	—	—	-10.96	1.48	-1.33	-10.18	-11.82
12‡	93.00	—	—	-9.93	2.17	-1.10	-9.39	-10.73
13‡	82.75	—	—	-10.17	1.85	-1.19	-9.92	-11.33
14†	80.00	18.41	49.27	-11.31	1.64	-1.59	-10.85	-12.32
15‡	87.00	23.85	92.12	-10.25	2.22	-0.78	-9.73	-11.19
16†	79.75	21.86	89.47	-17.37	1.74	-5.56	-16.65	-18.16
17‡	82.25	28.93	112.41	-16.51	1.81	-6.10	-15.83	-17.31
18†	51.25	15.05	66.01	-18.70	1.37	-7.40	-18.01	-19.51
19‡	52.20	17.31	68.67	-17.80	1.50	-6.84	-17.34	-18.78
20†	49.30	6.76	6.64	-20.03	1.53	-8.01	-18.80	-20.23
21‡	63.25	9.05	8.57	-18.38	1.57	-7.09	-18.03	-19.38
22†	51.25	—	—	-19.94	0.96	-6.78	-19.02	-20.60
23†	38.40	—	—	-25.11	0.38	-10.23	-23.11	-26.06
24‡	64.25	—	—	-19.08	0.53	-6.89	-18.22	-19.67
25‡	55.08	7.85	6.37	-18.84	1.23	-7.44	-18.36	-19.85

注:i) 标题行包括次地表样本含盐量和复介电常数(L 波段),归一化均方根高度(L 波段)及后向散射系数(σ_{HV}°);虚线表示 1—19 号样点是沿着 Line I(图 1)从湖心到湖岸方向横穿不同亮暗条带,而各样点的 SAR 图像纹理特征(亮条带或暗条带)标注于表 1 的第一列. ii) 表示由于样本水分流失未进行该项目测试. † 表示 SAR 图暗条带特征. ‡ 表示 SAR 图亮条带特征.

能力的分析. 2.2 节将以 ALOS-PALSAR 数据(L 波段)为基础,推算不同纹理区域的同极化相关参数与极化度,通过物理散射机制的解释,指出造成“大耳朵”纹理特征的表现原因. 另外,极化分解技术可以分离出物理散射机制相互独立的分量,从而突出主要影响因素,通过各分量物理意义的分析,探讨“大耳朵”特征的根本性成因,提出 SAR 隐伏特征提取技术的可行性,以此来支撑与论证 SAR 在干旱区的穿透能力.

3 研究结果与讨论

3.1 罗布泊古湖盆区域理化性质分析

(1)含水量与含盐量:罗布泊古湖盆区域的地表

是十分干燥的,几乎没有水分,并广泛分布着各种形态的盐壳. 随着垂直方向上深度的增加,含水量将有所增大. 随机在路线 I 上选取若干观测点,图 2 为每个观测点从地表至次地表湖相沉积物的含水量变化图,可以发现罗布泊古湖盆区域次地表存在一含水量阶跃界面,并不是逐渐增大的趋势. 另一方面,由于罗布泊原地沉积的特点,每个观测点随着次地表深度的增加,含盐量变化不大,具有较好的一致性.

贯穿“大耳朵”剖面方向(水平方向),同一层次介质的含水量变化不大,但其含盐量却可以体现出盐湖演化的基本规律. 鉴于罗布泊古湖盆区域次地表介质所含盐分主要为石盐(NaCl),并有石膏(CaSO_4)和芒硝(Na_2SO_4)伴生,这里采用次地表样本的 Na^+ 和 Cl^- 含量作为分析对象. 基于图 3 可以

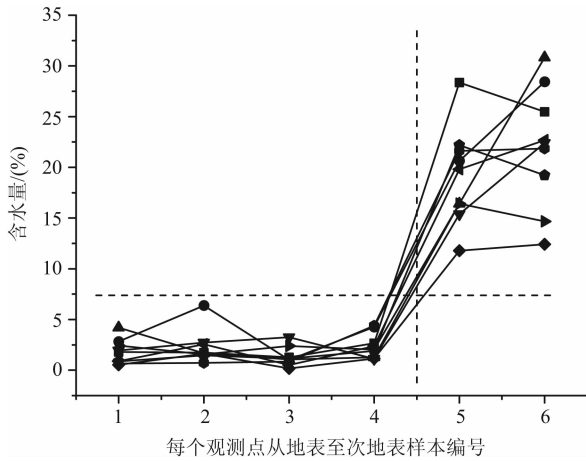


图2 罗布泊古湖盆区域随机选取的观测点
从地表至次地表样本含水量变化图

可以看到次地表含水量从第4号样本到第5号样本中间产生了一次阶跃,而不是逐渐地增大;1~4号样本的平均含水量为2%,而第5号样本含水量将至少增大至10%;其中横纵虚线表征次地表含水量阶跃界面的存在。

Fig. 2 Moisture variation from surface to bottom of the lacustrine deposits at selected sampling sites

It can be seen that the moisture increased abruptly rather than gradually from the fourth sample to the fifth sample counted from surface to bottom in each sampling site. The average moisture of the first four samples is about 2%, and moisture of the fifth sample will increase to 10% at least. The dash line in the figure stands for the significant difference.

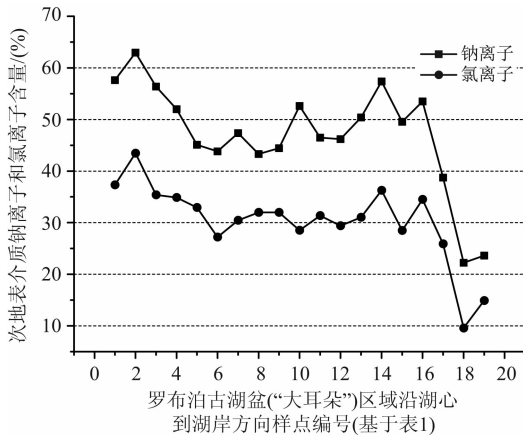


图3 罗布泊古湖盆区域次地表样本 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量沿湖心至湖岸剖面变化图

Fig. 3 Na⁺ and Cl⁻ contents of subsurface lacustrine deposits in Lop Nur Lake Basin

发现,从湖心到湖岸,Na⁺ 和 Cl⁻ 含量呈现逐渐递减的规律.从盐分汇集过程分析,盐分是由地势较高的外围区域向中心区域汇聚的,而中心区由于地势最低,大量盐分会在盐湖干涸的最后阶段全部析出.在湖盆演化过程中,中间部分区域可能受到暂时性洪水或短暂暖湿气流的影响而被淋溶,这直接导致了

这些区域的含盐量存在一定的波动性。

一般来说,罗布泊古湖盆区域地表下 50 cm 处即可到达含水量阶跃界面,其下甚至可以出现上涌卤水,因此由电磁波能量衰减规律可以判断 SAR 信号最多只能到达这里,不能继续向下传播,探地雷达也可以得到同样的结论.因此可以提出 SAR 探测的罗布泊古湖盆区域次地表散射结构,即上覆干燥的盐土混合层,下伏高含水含盐湖相沉积介质。

(2)次地表介质复介电常数:罗布泊古湖盆区域次地表蕴藏着大量的高含水含盐介质,目前在国际上利用 SAR 对含盐含水介质探测的研究还很少.试验表明含水量与含盐量是影响介质复介电常数的主要因素^[14].具有显著复介电常数虚部的介质对于 SAR 信号能量的衰减很大,因此对于 SAR 信号而言,可以将罗布泊次地表散射结构简化为双层介质,垂直方向上同样存在一介电性质差异界面.另一方面,由于 SAR 信号在上覆干燥盐土混合层中损耗小,除了地表散射贡献外,SAR 回波能量中还应包含次地表的散射贡献.图 4 为 HV 极化后向散射系数(基于 ALOS-PALSAR)与次地表介质复介电常数幅度值的比对图,可以得到较为一致的变化趋势关系,说明 SAR 回波信号会受到次地表介质的影响,即 L 波段 SAR 信号能够探测到次地表介质.这个观点在相近频率的 GPR 探测结果中同样得到了验证.此外,表 1 测量数据及含水含盐介质介电性质规律均表明含盐量是影响罗布泊次地表介质介电特性的主要因素,因此可以推测,造成“大耳朵”影像特征的原因与次地表介质性质有关。

(3)地表微地貌:地表微地貌是影响 SAR 回波能量的重要因素之一.基于实测的地表粗糙度数据,

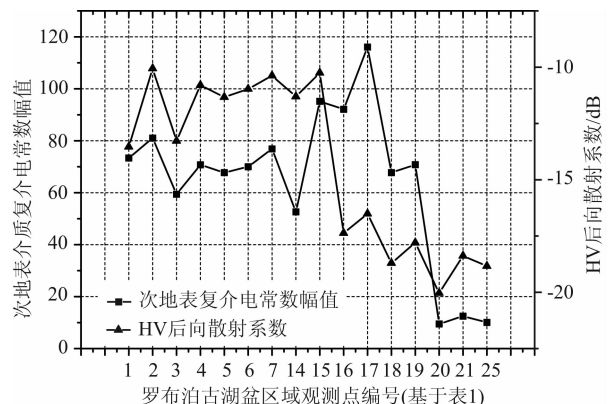


图4 后向散射系数(HV极化,ALOS-PALSAR数据)与次地表介质复介电常数幅度值比对图

Fig. 4 Comparison of σ_{HV}^0 (ALOS-PALSAR) and the amplitude of the complex permittivity of subsurface medium

本文将对方根高度进行分析. 贯穿罗布泊古湖盆剖面, L 波段平均归一化均方根高度(normalized RMS height, ks)为 1.54(表 1), 这表明整个罗布泊古湖盆区域具有较为粗糙的地表状态. 图 5 表明地表微地貌与 SAR 后向散射响应之间存在变化趋势一致的对应关系, 初步可以判断罗布泊“大耳朵”特征与地表微地貌状态具有一定的相关性. 然而, 地表形态的起伏程度还会受到气候、淋溶、风蚀等作用的影响, 不宜作为根本性证据来解释“大耳朵”的成因. 罗布泊古湖盆地表下存在着大量的干燥或潮湿的盐壳与沉积碎屑, 次地表的高含水含盐湖相沉积介质会因毛细作用上升至浅地表, 并因极端干旱的气候环境而产生大量的结晶盐; 这种盐结晶的表聚与盐胀作用将使地表隆起与干裂, 同时风蚀等外营力的影响将进一步改造地表形态. 这也说明了地表起伏

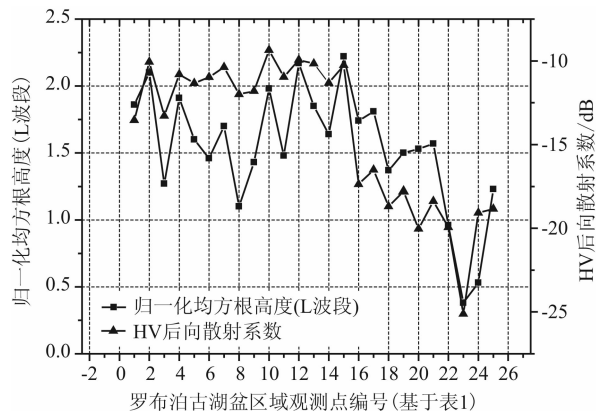


图 5 后向散射系数(HV 极化, ALOS-PALSAR 数据)与地表归一化均方根高度对比图

Fig. 5 Comparison of σ_{HV}^0 (ALOS-PALSAR) and surface root mean square height ks

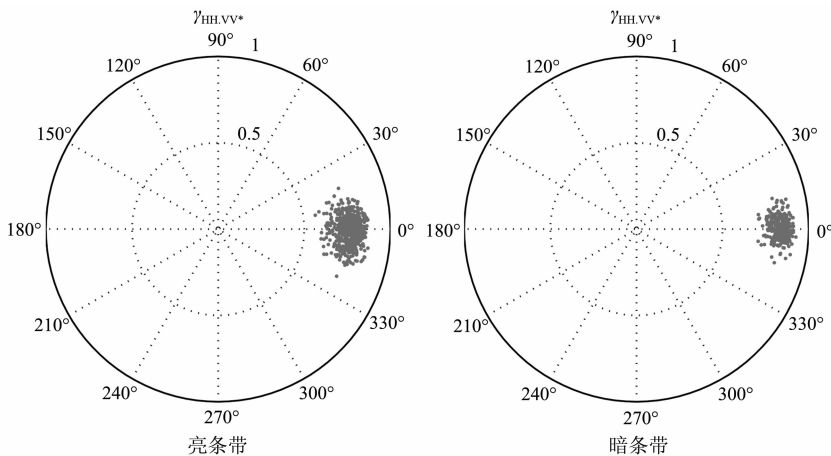


图 6 罗布泊“大耳朵”亮暗纹理区域同极化相关分析

其中半径方向的长度表示同极化相关系数, 圆周散角表示相位差分布.

Fig. 6 Co-polarization correlation analysis for bright and grey strips

Length of radius is co-polarization correlation coefficient; scattered angle of circumference stands for phase differences.

形态与次地表含水含盐介质有关, 而次地表特征由于位于下伏层, 从而避免了诸多外营力的改造作用, 使得其对“大耳朵”的指示性关系更加明确与具体.

3.2 PolSAR 特征分析

3.2.1 极化参数与物理散射机制

同极化相关分析: 不同极化正交基对应的同极化相关特征是极化数据能够提供的反映地物特征的重要参数之一, 其绝对值为同极化相关系数, 其幅角为相位差. 利用加拿大遥感中心 PWSR2 软件对 ALOS-PALSAR 全极化数据进行同极化相关分析(图 6), 可以发现, 无论亮条带还是暗条带(“大耳朵”不同纹理区域), 同极化相关系数均大于 0.5, 较大, 整个“大耳朵”区域后向散射十分强烈, 而暗条带的相关系数大于亮条带, 说明暗条带的散射机制比亮条带单纯, 使得 HH 和 VV 的响应差异变小. 另一方面, 亮暗条带的相位差均值均为 0° , 只是分布的离散程度不同, 这种差异的直接原因在于地物散射机制的复杂性与随机性.

极化度: 极化度可以直接反映地物去极化的程度, 罗布泊地表分布着多形态的剧烈起伏的盐壳, 对 SAR 信号会造成不同程度的去极化作用. 表 2 是罗布泊“大耳朵”不同纹理区域的极化度统计结果. 可以发现, 亮条带的 P_{Max} 和 P_{Min} 均比暗条带的小, 说明亮条带的散射机制更为复杂, 散射回波的不完全极化程度比暗条带要大.

极化度极值的动态范围可以定义为: $p = P_{Max} - P_{Min}$, 通常认为该动态范围与由于地物空间分布造成的散射机制复杂性有直接关系, 它可以衡量极化度随着入射波极化方式不同而变化的敏感程度^[15].

表 2 罗布泊“大耳朵”不同纹理区域的极化度统计结果

Table 2 Degree of polarization for bright and grey strips

区域	最大极化度 (P_{Max})	最小极化度 (P_{Min})	$\rho (p = P_{Max} - P_{Min})$
亮条带 I	0.74	0.46	0.28
暗条带 I	0.84	0.65	0.19
亮条带 II	0.75	0.48	0.27
暗条带 II	0.81	0.6	0.21
亮条带 III	0.71	0.41	0.3
暗条带 III	0.8	0.57	0.23

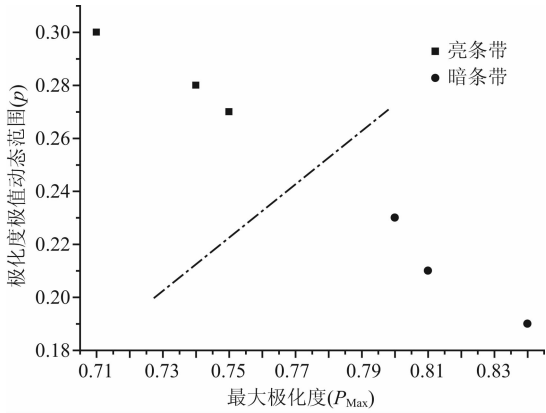


图 7 罗布泊“大耳朵”不同纹理区域 (P_{Max}, p) 分布图
图中点划线为随机的区域分割界限。

Fig. 7 (P_{Max}, p) of bright and grey strips

The dot and dash line means boundary of different regions randomly.

从表 2 中可以看出,亮条带的 p 较大,说明亮条带由于地表形态造成的散射机制比暗条带复杂. 将 (P_{Max}, p) 作为一个二维参量,用于分析地物的散射机制(图 7). 可以发现,“大耳朵”不同纹理区域能够得到较好地区分,而不同纹理区域的地表参数与 (P_{Max}, p) 之间的定量关系,甚至暗条带或亮条带等级的划分还需要开展大量的实验分析与实地调查工作.

由实测的地表粗糙度数据可以得到,亮条带的地表起伏程度更为剧烈,甚至有些区域的地表盐壳呈现破碎状态. 地表微地貌状态的不同在不同极化通道间的响应差异与去极化能力方面均有一致的表现. 这种关系在“大耳朵”区域更为鲜明,与实际的 SAR 图像响应一致,因此可以认为地表微地貌状态是造成“大耳朵”纹理特征的表现原因(图 5),而地表形态的形成与湖盆演化过程又有着密切的联系.

3.2.2 极化分解

极化分解可以将 SAR 后向散射能量根据物理散射机制的不同而进行分离,从而突出地物的某方面特征. 图 8 为 ALOS-PALSAR 全极化数据单次散射、二面角散射、多次散射贡献图(特征值-特征向量分解)和假彩色合成图^[16]. 可以发现它们对“大耳朵”特征的表现力依次增强.

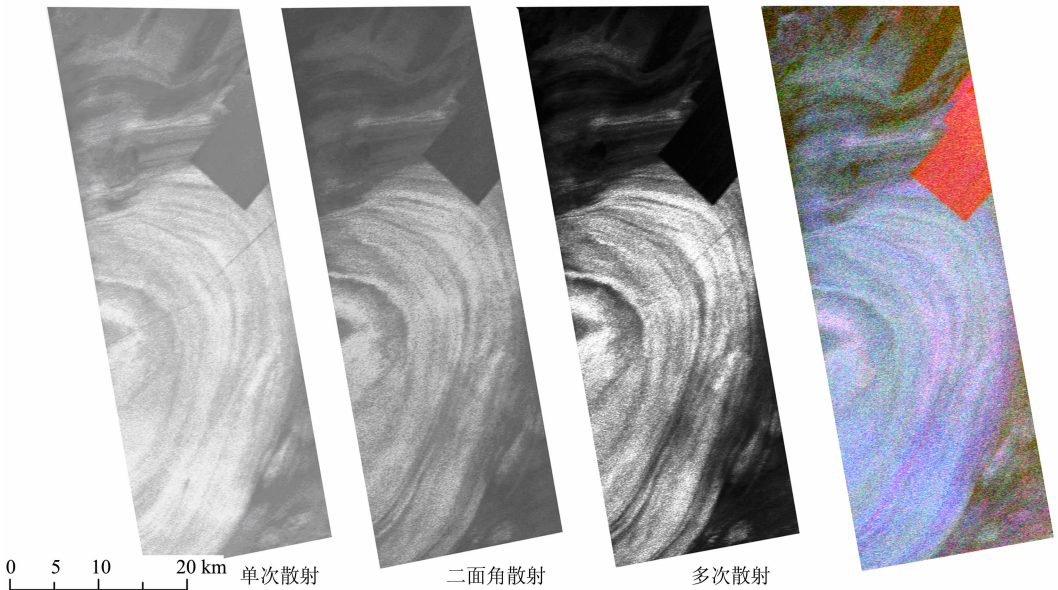


图 8 ALOS-PALSAR 全极化数据单次散射、二面角散射、多次散射贡献图(特征值-特征向量分解)和假彩色合成图(R—二面角散射;G—多次散射;B—单散射)

Fig. 8 Polarimetric decomposition results in single scattering, dihedral scattering and multiple scattering with eigenvector-eigenvalue based decomposition, based on ALOS-PALSAR data. And false color composite images are also shown (R-dihedral scattering, G-dihedral scattering and B-single scattering)

根据 3.1 节中对罗布泊次地表散射结构的分析, 单次散射贡献应包括地表与次地表介电性质差异界面的面散射. 由于罗布泊地表的剧烈起伏状态, 其后向散射能量很容易达到饱和, 即地表散射部分没有足够的动态范围去准确表征“大耳朵”不同纹理区域 SAR 的响应差异; 另外, 由于罗布泊古湖盆属于原地沉积, 次地表介电性质差异界面呈现微粗糙特征, 其面散射贡献是造成整个“大耳朵”区域高回波能量的原因, 对纹理特征的表达并不明显, 因此, 两者叠加的结果主要表现为高回波能量, 而对“大耳朵”特征的表现力不强.

二面角散射主要发生在地表, 是地表近似二面角结构的微地貌状态的信号响应, 因此其对“大耳朵”具有一定的表现能力. 多次散射主要发生在次地表干燥盐土混合层中, 其中包括体散射和体散射与面散射的相互作用. 以各散射机制后向散射系数的相对标准偏差来表征图像纹理信息的动态范围, 得到单次散射: 0.246; 二面角散射: 1.09; 多次散射: 1.146. 可见多次散射贡献对于“大耳朵”特征的表达最为清晰, 本文认为“大耳朵”特征的根本性成因在于次地表介质.

图 8 中的假彩色合成图也表明单次散射贡献在总体后向散射能量中占主导, 却不能分辨出不同纹理区域; 而在边缘区域会由于地表粗糙度的减小使得次地表的多次散射贡献得以突显. 图 9 是特征值-特征向量分解的多次散射贡献与次地表介质含盐量比对图, 可以得到两者较强的相关关系, 经过线性拟

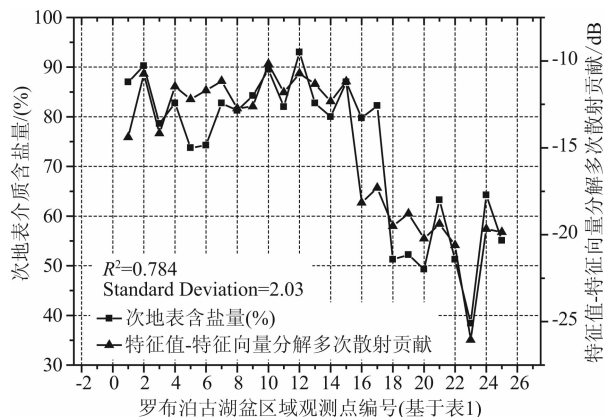


图 9 特征值-特征向量分解的多次散射贡献与次地表介质含盐量比对图, 经过线性拟合, 两者可决系数为 0.784, 标准偏差为 2.03

Fig. 9 Comparison of multiple scattering component of eigenvalue-eigenvector based decomposition and salinity of subsurface medium, where R square and standard deviation are also shown

合, 两者可决系数为 0.784, 标准偏差为 2.03.

通过图 9 的比对可以发现次地表的含盐量能够在一定程度上对“大耳朵”的特征进行解释. 我们认为, 次地表介质的性质 (如含盐量) 是“大耳朵”特征的根本性成因. 以往的研究基本集中在地表光谱特征、盐壳的形态与色调、地形特征等方面^[5-11], 虽然各方观点均有自己的依据, 但缺乏互相的支撑与兼顾, 仅仅停留于地表性质是无法建立起相互之间的联系. 对于罗布泊古湖盆而言, 其是一个相对封闭的、浅平的湖泊, 除气候影响因素外其它外界的干扰较小, 在干涸过程中, 地表微地貌状态是次地表介质性质最直接的表现. 如罗布泊次地表高矿化度的卤水会通过盐土混合介质的毛管上升至浅地表, 含盐量越大, 则由极端干旱的气候造成的盐分结晶时发生的表聚与盐胀作用就越强烈, 进而产生十分显著的地表形态改变; 另一方面, 由于盐分结晶阶段易受气候条件的影响, 使得盐分的析出类别与比例产生差异, 这直接表现在地表盐壳的色调与盐分组成上 (光谱特征差异). 而罗布泊常年强劲的东北风, 使隆起的盐壳掀起并互相堆叠, 最终形成了现代罗布泊复杂多样的地表状态, 期间还可能受到暂时性洪水或短暂暖湿气流的影响而经历反复多次的淋溶与干燥结晶过程, 更增加了对地表微地貌形态的理解难度. 正是由于地表特征较容易受到外营力的改造, 次地表介质的性质才更适合作为“大耳朵”特征的根本性成因. 引入地质、地貌及盐湖演化方面的知识, 重建罗布泊古湖盆区域地貌的动力学机制, 剥离出更具环境意义的特征量将是未来工作的重点, 从而促进对“大耳朵”特征的全面解译.

3.3 罗布泊古湖盆区域雷达穿透性

罗布泊古湖盆区域后向散射强烈, “大耳朵”中心区 HH 极化后向散射系数平均值约为 -1 dB (ALOS-PALSAR 数据), 利用积分方程模型 (IEM, Integral Equation Method) 模拟地表 HH 极化后向散射系数约为 -4 dB, 说明单纯的干燥粗糙地表面散射贡献是难以形成如此强烈的回波信号的. 而古湖区的次地表层则孕育着丰富的浅水位卤水资源, 形成的含水含盐介质层其介电常数很高, 根据 3.1 节的理化性质分析及次地表散射结构, 我们认为, SAR 信号 (至少 L 波段) 可以探测至“大耳朵”区域次地表物质, 整体高亮的后向散射能量是地表面散射与次地表散射的叠加结果. SAR 信号到达地表后, 将发生空气-干燥地表界面处的面散射作用, 其后部分能量进入到次地表, 在不断传播的过程中, 将

发生体散射和体散射与面散射之间的相互作用,最终信号到达次地表介电性质差异界面,并发生次地表散射。另一方面,3.2节中极化分解结果与次地表湖相沉积样本含盐量的比对可以直接印证罗布泊古湖盆区域 SAR 的穿透能力。

SAR 在干旱区的穿透性已有诸多报道,其中最著名的就是:美国地质调查局的 McCauley 等人通过 SIR-A 图像分析,发现了撒哈拉大沙漠东部沙层覆盖下的古河道和古人类遗迹,在遥感界、气象学界和地学界引起了轰动^[17]。罗布泊古湖盆区域的环境与构造情况满足 SAR 穿透的条件,通过定量或半定量的分析与比对也可以寻找到证据。借助于 SAR 独特的穿透能力,建立罗布泊地区地下目标信息与隐伏特征提取技术流程,这对于全面解析罗布泊现象是十分有利的。

3.4 罗布泊古湖盆区域环境学意义

罗布泊是地质学、环境学研究的典型区域。罗布泊古湖盆区域高程变化小,微地貌则较为粗糙,这意味着历史时期湖水面积的大小很大程度上依赖于上游水源的补给,因此古湖盆区域湖相沉积物所记录下来的环境信息可以反映历史时期上游区域的气候变化。另外,当罗布泊进入到干涸阶段,沉积盐分的种类与比例也受控于当时的沉积环境,表现形式为盐分的组成、盐壳颜色、携带泥沙量等。最终,罗布泊古湖盆区域以“大耳朵”的空间特征展现,记录下了区域、甚至全球的历史环境信息。

对于如此广袤的湖盆区域,其干涸阶段不是一个单一、连续的过程。在漫长的湖盆演化时期,可能会因为短暂暖湿气流或者上游洪水的到来,使得湖水面积再次扩大,这就会洗刷掉之前干涸过程中所沉积下来环境信息,当重新进入到另一次干涸阶段后,则会有更新的环境信息被湖相沉积物所记录。虽然过程不存在连续性,卫星图像上“大耳朵”特征的水平剖面也可能无法重建出整个罗布泊干涸过程,但是一旦可以确定出间断点,就可以发现历史时期的一个或多个极端气候事件,这对于研究过去全球变化是极为重要的参考依据。未来的研究重点将集中在对罗布泊古湖盆区域不同纹理特征区域(亮暗条带)的定年方面,建立标准的时间轴坐标;结合雷达遥感技术对于干旱区独特的穿透能力,有望提取多维度环境信息,从而更为深入地解读罗布泊现象。

4 结 论

(1)基于野外调查样本理化性质的分析,提出罗

布泊古湖盆区域次地表散射结构,即上覆干燥的盐土混合层,下伏高含水含盐介质,进而论证 SAR 在罗布泊地区的穿透能力,确定地下目标探测的可能性,为后续的隐伏特征提取奠定基础。

(2)基于雷达极化参数(同极化相关分析与极化度),本文对罗布泊“大耳朵”不同纹理区域进行了物理散射机制的分析,结果表明整个“大耳朵”区域后向散射强烈,亮条带比暗条带的散射机制更为复杂,同时指出地表微地貌状态是造成罗布泊“大耳朵”特征的表现原因。利用极化分解技术(特征值-特征向量分解)分离出表现“大耳朵”特征更为清晰的多次散射贡献,通过其与次地表含盐量的比对,提出次地表介质的性质(如含盐量)是罗布泊“大耳朵”特征的根本性成因。同时,多次散射贡献与次地表含盐量之间的强相关关系也预示着隐伏目标特征提取的可行性。

(3)罗布泊是地质学、环境学研究的典型区域。基于雷达遥感对于干旱区独特的穿透能力,及相关学科(水文学、沉积学、古气候学等)知识,有望提取多维度环境信息,更为深入地解读罗布泊现象。

致 谢 感谢北京大学、北京农林科学院和电子科技大学协助完成罗布泊介质样本的理化参量测试工作,以及匿名审稿专家给予的中肯意见;加拿大遥感中心(CCRS)提供 PWSR2 全极化分析软件,以及 SOAR 国际合作计划提供全极化 SAR 数据,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 夏训诚,王富葆,赵元杰. 中国罗布泊. 北京:科学出版社,2007.
Xia X C, Wang F B, Zhao Y J. Lop Nur in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007.
- [2] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122.
- [3] 斯文·赫定. 游牧的湖. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2010.
Hedin S. The Wandering Lake (in Chinese). Urumqi: Xin Jiang People's Publishing House, 2010.
- [4] 夏训诚. 罗布泊科学考察与研究. 北京:科学出版社,1987.
Xia X C. Investigation and Research of Lop Nur (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987.
- [5] 高志宏,邵芸,宫华泽等. 罗布泊“大耳朵”成因的体散射特性模拟与分析. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 906-913.
Gao Z H, Shao Y, Gong H Z, et al. Analyzing the genesis of Lop Nur “Ear” feature based on volume scattering characteristic simulation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 906-913.
- [6] 马黎春,李保国,蒋平安等. 罗布泊干盐湖电磁感应电导率

- 与“耳纹”成因关系探讨. 地球物理学报, 2007, 50(2): 651-654.
- Ma L C, Li B G, Jiang P A, et al. The correlation between the electromagnetic induction measurements and pixel values associated with the “Great Ear” rings in Lop Nur. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(2): 651-654.
- [7] Li B G, Ma L C, Jiang P A, et al. High precision topographic data on Lop Nur basin's Lake “Great Ear” and the timing of its becoming a dry salt lake. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 905-914.
- [8] 赵元杰, 夏训诚, 王富葆等. 罗布泊现代盐壳地貌特征与成因初步研究. 干旱区地理, 2005, 28(6): 795-799.
- Zhao Y J, Xia X C, Wang F B, et al. Preliminary study on the geomorphical characteristic and formation cause of modern salt crust type in Lop Nur Region. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2005, 28(6): 795-799.
- [9] 赵元杰, 夏训诚, 王富葆等. 新疆罗布泊环状盐壳的特征与成因. 干旱区地理, 2006, 29(6): 779-783.
- Zhao Y J, Xia X C, Wang F B, et al. Features and causes of formation on ring-shaped salt crust in Lop Nur region of Xinjiang, China. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2006, 29(6): 779-783.
- [10] 谢连文, 李锋, 李兵海等. 罗布泊盐湖环状影像成因解释. 沉积与特提斯地质, 2004, 4(4): 76-80.
- Xie L W, Li F, Li B H, et al. The genesis of the ring salt crust images of the Lop Nur salt lake, Xinjiang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* (in Chinese), 2004, 4(4): 76-80.
- [11] 谢连文. 罗布泊现代盐湖沉积与近两千年气候变化遥感研究 [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- Xie L W. Remote sensing research of the modern saline sediment and past climatic change in Luobupo during past 2000 years [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [12] 张新时. 走向新楼兰. 科学世界, 2006, (12): 88-94.
- Zhang X S. Towards a new Loulan. *Science World* (in Chinese), 2006, (12): 88-94.
- [13] Shao Y, Gong H Z, Xie C, et al. Detection subsurface hypersaline soil in Lop Nur using full polarimetric SAR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009, 3: III 550- III 553.
- [14] Gong H Z, Shao Y, Liu J H, et al. Improved model for dielectric behavior of moist saline soil. // Maltre H, Sun H, Liu J G eds. *Proceedings of 5th International Symposium on Multispectral Image Processing & Pattern Recognition*. Wuhan: SPIE Press, 2007, 15: 67871T.
- [15] Touzi R, Goze S, Toan T L, et al. Polarimetric discriminators for SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 973-980.
- [16] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498-518.
- [17] McCauley J F, Schaber G G, Breed C S, et al. Subsurface valleys and geoarcheology of the Eastern Sahara revealed by shuttle radar. *Science*, 1982, 218(4576): 1004-1020.

(本文编辑 何 燕)