

文章编号: 1007-4619 (2002) 06-0430-05

干旱-半干旱地区地表特征探测的成像雷达干涉测量方法与模型

廖静娟¹, 郭华东¹, 邵芸¹, 李新武¹, N. Veneziani²

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

2. 意大利国家研究理事会 信号与图像处理研究所, Bari 70126)

摘要: 从估测干涉测量雷达数据相关性出发, 通过利用欧洲资源卫星 1 号和 2 号获取的重轨干涉测量雷达数据, 开展新疆喀什试验区地表土地类型的识别与分类, 区分和识别出裸土、盐碱地、灌丛、裸岩/戈壁、沼泽和水体 6 类土地类型。并对不同土地类型的后向散射特性和相关性进行定量分析, 探讨干涉测量数据相关性与干旱-半干旱地区地表特征的关系, 从而建立了干旱-半干旱地区地表变化的干涉测量时相去相关模型, 为干旱-半干旱地区利用干涉测量数据进行地表变化监测提供理论依据。

关键词: 干涉测量; 干旱-半干旱地区; 地表特征; 监测

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

随着经济的发展和人口的增长, 地球的水资源和植被覆盖面积急剧减少, 土壤流失、土地沙漠化和盐碱化的状况愈来愈严重, 这种情况在干旱-半干旱地区更显突出。这些地区由于地域辽阔, 自然条件恶劣, 人烟稀少, 很难用人工的方法对其地表状况进行实地的调查和监测。遥感技术具有大面积快速获取地表信息的能力, 无疑将为这些地区的地表状况监测提供有用的信息。近几年来发展起来的成像雷达干涉测量技术, 由于具有全天时、全天候获取数据的能力, 并能充分利用雷达信号的振幅和相位信息, 生成地表数字地形高程模型 (DEM) 和进行地表变化监测^[1-3], 已成为了一种获取多种资源环境信息的先进遥感技术。目前世界范围内在卫星平台上进行的干涉测量主要是采用重轨干涉测量技术 (repeat-pass interferometry), 即利用同一雷达天线在相同地区重复轨道获取数据来实现。这种技术的实现要求获取的相同地区数据, 必须具有一定的相关性, 才能

提取有效的信息开展进一步的分析应用。

在干旱-半干旱地区, 由于地表植被覆盖稀疏, 土壤含水量较低, 因而在雷达图像表现为地表散射为主。重轨干涉测量技术获取的雷达数据, 即使相隔时间较长, 也可具有较好的相关性。同时, 这些地区由于时间演变也可带来地表地物几何特征的变化, 如植被的生长, 以风为主要营力的地表风化剥蚀作用, 都会在一定程度上引起地表特征的改变。这样, 重轨干涉测量数据的去相关性又可为地表特征的变化监测提供依据。

本文的研究首先给出干涉测量数据相关性估测的方法, 然后以新疆喀什地区为例, 通过对干旱-半干旱地区土地类型识别与分类的了解, 探讨地表特征与干涉测量数据相关性的关系, 从而建立干旱-半干旱地区时相去相关模型, 为干旱-半干旱地区地表特征变化监测提供理论支持。

2 重轨干涉测量数据相关性估测方法

为了对重轨干涉测量数据的相关性进行描述,

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家 863 计划项目: “多模式全极化干涉雷达信息处理与分析技术 (编号: 2001AA132040)、国家自然科学基金重点项目“新型成像雷达对地观测机理及地物识别技术”(编号: 49989001) 和中国科学院遥感应用研究所创新课题 (编号: CX0100001) 联合资助。

作者简介: 廖静娟 (1966—), 女, 1993 年获中国科学院地球物理研究所固体地球物理专业博士学位。现任中国科学院遥感应用研究所副研究员, 主要从事雷达遥感地物散射特性、信息提取及应用研究, 已发表论文 20 余篇。

引入了相关度(degree of coherence)这个参数。重轨干涉测量雷达数据一般以复数形式记录,假定 g_1 , g_2 分别表示利用重轨干涉测量获取的数据,则相关度可用下式给出

$$\gamma = \frac{|\langle g_1 \cdot g_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle g_1 \cdot g_1^* \rangle \langle g_2 \cdot g_2^* \rangle}} \quad (1)$$

这里 $\langle \cdot \rangle$ 表示期望值, $*$ 表示复数共轭,并且

$$\langle g \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \quad (2)$$

表示 N 个像元窗口的期望值。据此,可以计算出两数据相应像元点的相关度。一般情况下, N 取 25 (方位向) \times 5 (距离向) 的窗口比较合适^[4]。相关度值的范围在 0—1 之间,0 表示不相关,1 表示完全相关。

在此需要说明的是,进行相关性估测时,两幅复数雷达图像必须进行精确的配准,配准的精度要求是误差必须在 0.1 个像元之内,这样才能得到有效的相关信息。

3 干旱-半干旱地区地表土地类型识别与分类

3.1 方法

为了进行干旱-半干旱地区地表特征的研究,利用雷达图像有效区分干旱-半干旱地区地表土地类型是必需的。在雷达干涉测量技术未问世之前,一般是利用雷达信号的强度信息来进行有关资源环境监测和应用的。但由于雷达主动成像的特点和对传感器技术的要求,目前已成功在轨运行的卫星雷达系统均为单波段、单极化模式,如欧洲空间局的遥感卫星 1 号和 2 号(ERS-1/2),日本的地球资源卫星 1 号(JERS-1)和加拿大的雷达卫星(RADARSAT)均如此,并不象卫星光学传感器系统那样有多个波段的图像可同时获得。直接获取的卫星雷达图像产品均为黑白图像,这对于应用研究在一定程度上受到了限制。为了充分利用干涉雷达数据的信息,我们在此从干涉雷达数据提取了相应的振幅信息,振幅强度(A)可用下式提取

$$A = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (3)$$

此处 R , I 分别为复数像元值的实部和虚部。根据雷达图像的定标结果,振幅强度可转化为后向散射系数^[5]。

如果将获取的相关度转化为干涉相干图像,并将两幅振幅图像相减求出振幅强度变化,然后将相

关图像、振幅图像和振幅强度变化进行彩色合成,从而生成假彩色的合成图像,利用合成图像颜色及纹理的差别,可以开展地表类型的识别和分类,以下我们将以新疆喀什地区为试验区,欧洲遥感卫星 1 号和 2 号(ERS-1/2)携带的合成孔径雷达获取的重复轨道串接式(Tandem)单视复数(SLC)图像数据为数据源进行说明。

3.2 试验区概况及数据源

试验区地理位置为北纬 39.4—40.7°,东经 76.3—77.8°。这里地处天山以南,昆仑山以北,塔里木盆地西北缘。平均海拔高度 1288.7m,年平均降水量小于 60mm,年平均气温 11.9℃,最高温度 35.2℃,最低温度 -15.3℃,年蒸发量 2000—3400mm,无霜期 190—220 天,属大陆性干旱-半干旱气候。区内主要土地类型有灌丛、盐湖、沼泽、戈壁、盐碱地、裸岩、裸土、草甸等。由于降水稀少、植被稀疏,故区内地表的侵蚀主要以风蚀作用为特征。

欧洲资源卫星 1 号和 2 号在该区获取的干涉测量雷达数据的成像时间相差一天,分别为 1999-06-03 和 4 日。成像波段为 C 波段(5.67cm),天线发射和接收均为垂直(VV)极化方式,雷达波在图像中心的入射角为 23.275°和 23.271°,图像的幅照宽度为 39km,空间像元大小距离向为 7.904m,方位向为 3.978m,距离向和方位向的分辨率为分别为 10m 和 5m,平行和垂直于斜距方向的基线长度分别 45m 和 85m。

除此而外,还收集了试验区的 1:100 万土地利用图^[6],并以此作为地表覆盖类型和土地类型识别与分类的参考和依据。

3.3 地表土地类型识别与分类的结果

在喀什试验区,如果只利用雷达图像的强度信息进行研究,我们发现,仅地表不同地物的识别和区分的效果都不甚理想(图版 I 图 1)。如果将相关图像(图版 I 图 2)、振幅强度图像和振幅强度变化图像进行彩色合成,得到的假彩色合成图像(图版 I 图 3)与单一的强度图像(图版 I 图 1)对比可见,合成图像对地物的探测能力已远远高于强度图像,使识别与区分不同地物的效果大为提高。

为此,参照 1:100 万土地利用图^[6],在假彩色合成图像上选择 5—8 个不同地表土地类型的训练样区,利用最大似然法对相关图像、ERS-1/2 振幅图像及振幅强度变化图像进行监督分类,可得到相应分

类结果图(图版 I 图 4)。从分类结果图可见,综合应用干涉雷达数据的相关信息和振幅信息,可以有效地识别和区分出试验区的 6 类土地类型,分别为裸土、盐碱地、灌丛、裸岩/戈壁、沼泽和水体。对分类结果进行样区统计及精度分析,可得出分类结果的混淆矩阵(表 1),从表 1 可见,水体和沼泽的分类

效果最好,分别为 96.9% 和 91.2%,其次为裸土和盐碱地,分别为 87.9% 和 86.6%,而灌丛和裸岩/戈壁稍差,分别为 46.8% 和 43.4%,其中裸岩/戈壁由于地形影响产生阴影,分类时部分可能与盐碱地混淆。分类结果的平均精度为 77.3%,全局精度为 80.8%。

表 1 分类结果混淆矩阵

Table 1 The confusion matrix of classification results

	裸土	水体	裸岩/戈壁	盐碱地	灌丛	沼泽	样点数*
裸土	87.9	0.0	0.2	8.3	2.2	0.0	40951
水体	0.0	96.9	0.7	0.0	0.1	1.7	4140
裸岩/戈壁	0.9	0.2	43.4	32.7	14.3	2.4	22565
盐碱地	7.0	0.1	3.6	86.6	0.5	0.1	57801
灌丛	12.2	0.0	21.7	4.9	46.8	9.0	43002
沼泽	0.0	0.0	1.1	0.0	5.8	91.2	21474

注: * 表中的样点数为计算机统计的分类结果样点数。

4 干旱-半干旱地区地表特征与干涉测量数据的关系

为了更好地探讨干旱-半干旱地区地表特征与干涉测量数据的相关性及后向散射特征的关系,我们提取了上述识别出的几种地表类型的相关度及后向散射系数进行定量对比分析(表 2)。从表 2 可见,对于裸土和干盐碱地,相关度均大于 0.8,表现为较高的相关性。裸土在试验区主要来源于冲积扇,并由于风化作用使粒度变得较细,故其后向散射系数仅为 -14—-17dB,远小于后向散射系数为 -7—-9dB 的干盐碱地,表现为地表散射不如干盐碱地强。湿盐碱地的后向散射系数为 -12—-16dB,比较接近裸土,但相关度仅为 0.44,比干盐碱地大为降低,这是因为试验区气候干燥,即使两雷达数据的获

取时间仅相隔一天,但地表含水量的变化也是比较明显,从而降低了图像的相关程度。这样,水体和沼泽具有较低的相关度(0.11)也比较合理,并且水体由于镜面反射的原因后向散射系数也较低,但沼泽在 ERS-1 和 ERS-2 图像上后向散射有不同的表现,这可能在两图像获取间隙中,在沼泽区曾有明显的地表环境的改变。对于戈壁和裸岩这类地物,在图像上一般都具有较强的后向散射,但由于地形的去相关影响,相关度并不高,因而表现为高后向散射系数值(0—3dB)和中等程度的相关度(0.47)。虽然植被的几何形态变化一般会引起干涉数据的去相关,但对于试验区内的灌丛,由于数据获取的时间仅相隔一天,几何形态变化很小,使得图像能有一定的相关性。但由于其含水量低,分布较为稀疏,因而后向散射多来自于地表,所以后向散射系数为 -12—-15dB,比较接近于裸土。

表 2 ERS-1 和 ERS-2 干涉测量数据提取的地表土地类型的后向散射系数和相关度

Table 2 Backscatter coefficients and coherence of surface land types extracted from ERS-1 & 2 interferometric data

土地类型	ERS-1 后向散射系数/dB		ERS-2 后向散射系数/dB		相关度	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
裸土	-14.13	1.83	-16.18	1.07	0.87	0.03
水体	-22.00	0.01	-26.17	2.93	0.11	0.06
裸岩/戈壁	-0.67	0.11	-2.22	0.94	0.47	0.19
干盐碱地	-7.18	2.04	-8.98	1.13	0.81	0.05
湿盐碱地	-12.93	1.42	-15.03	1.57	0.44	0.14
灌丛	-12.26	1.75	-14.04	1.86	0.69	0.11
沼泽	-15.30	2.48	-29.0	0.00	0.11	0.06

根据 Zebker 等人^[7]的研究认为,干涉测量的去相关主要有 3 方面来源,即

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_s + \gamma_t \quad (4)$$

这里 γ_n , γ_s 和 γ_t 分别为处理器及系统的热噪声去相关、空间去相关和时相去相关因子。当雷达信号的信噪比较高时, γ_n 可以忽略不计。对于较好质量的 ERS-1/2 图像,其信噪比相当高,因此可以忽略 γ_n 的去相关影响,空间去相关主要包括数据获取的基线和入射角去相关及地形和地物结构的去相关,对于 ERS Tandem 数据,基线的去相关可通过 Zebker 等人^[7]提出的理论模型进行归一化来弥补,而 Tandem 数据的入射角差别较小,可以忽略入射角去相关。时相去相关主要与气象条件和地表植被的改变有关,我们在此讨论影响干旱-半干旱地区干涉测量数据相关性的因素,实际上主要是地表土地类型的时相去相关。因此,利用重轨干涉测量数据的去相关性可为地表特征的变化监测提供一定的依据,并可以通过建立经验或理论模型来进行。

5 干旱-半干旱地区地表变化时相去相关理论模型

在干旱-半干旱地区,可以将图像分辨单元内的地物分解看成由稳定和不稳定两部分组成,在此分别用 A 和 B 表示,它们对应的后向散射系数分别为 σ_A^0 和 σ_B^0 , σ^0 为两部分后向散射之和,则对于复数图像数据有

$$\begin{aligned} \sigma^0 &= \langle (g_A + g_B)(g_A^* + g_B^*) \rangle \\ &= \langle g_A \cdot g_A^* \rangle + \langle g_B \cdot g_B^* \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

根据(1)式,两幅复数图像的相关度又可表达为

$$\gamma = \frac{|\langle g_{1A} \cdot g_{2A}^* \rangle + \langle g_{1B} \cdot g_{2B}^* \rangle|}{\sqrt{\langle g_1 \cdot g_1^* \rangle \langle g_2 \cdot g_2^* \rangle}} \quad (6)$$

由于

$$\sigma_A^0 = \langle g_A \cdot g_A^* \rangle \quad (7)$$

$$\sigma_B^0 = \langle g_B \cdot g_B^* \rangle \quad (8)$$

则

$$\gamma_A = \frac{|\langle g_{1A} \cdot g_{2A}^* \rangle|}{\sqrt{\langle g_{1A} \cdot g_{1A}^* \rangle \langle g_{2A} \cdot g_{2A}^* \rangle}} \quad (9)$$

$$\gamma_B = \frac{|\langle g_{1B} \cdot g_{2B}^* \rangle|}{\sqrt{\langle g_{1B} \cdot g_{1B}^* \rangle \langle g_{2B} \cdot g_{2B}^* \rangle}} \quad (10)$$

从而可得出

$$\gamma = \gamma_A \frac{\sqrt{\sigma_{1A}^0 \cdot \sigma_{2A}^0}}{\sqrt{\sigma_1^0 \cdot \sigma_2^0}} + \gamma_B \frac{\sqrt{\sigma_{1B}^0 \cdot \sigma_{2B}^0}}{\sqrt{\sigma_1^0 \cdot \sigma_2^0}} \quad (11)$$

对于干涉测量数据而言,无论是两种单独的组分,还是组合在一起的两种组分,可以假设它们的后向散射强度不变,即

$$\sigma_{1A}^0 = \sigma_{2A}^0 = \sigma_A^0 \quad (12)$$

$$\sigma_{1B}^0 = \sigma_{2B}^0 = \sigma_B^0 \quad (13)$$

$$\sigma_1^0 = \sigma_2^0 = \sigma^0 \quad (14)$$

则(11)式可简化为

$$\gamma = \gamma_A \frac{\sigma_A^0}{\sigma^0} + \gamma_B \frac{\sigma_B^0}{\sigma^0} \quad (15)$$

该模型可以容易地扩展成多种散射组分,并用来解释干旱-半干旱地区地表的特征变化,如植被密度变化、土地侵蚀状况等。其中 σ_A^0/σ^0 表示干涉测量数据获取期间没有发生变化的稳定散射组分在所有散射中所占的比例,而 σ_B^0/σ^0 则表示会变化的不稳定散射组分在所有散射中所占的比例。对于稳定的组分,相关度 $\gamma_A = 1$, 而 γ_B 则在 0 和 1 之间。如果能获取多时相的干涉测量数据对,则可利用该模型对干旱-半干旱地区地表的变化进行分析研究,从而得到地表特征变化图,如植被密度图、土地侵蚀状况图等。因此,该模型可以干旱-半干旱地区地表变化探测提供理论的参考。

6 结论

(1)在干旱-半干旱地区,地表植被覆盖稀疏,土壤含水量低,在雷达图像主要以地表散射为主,因此重轨干涉测量雷达数据具有较好的相关性,可用来探测地表的特征变化。

(2)ERS-1/2 重轨干涉测量 Tandem 雷达数据应用于新疆喀什试验区进行地表土地类型的识别与分类,区分出裸土、盐碱地、灌丛、裸岩/戈壁、沼泽和水体 6 类土地类型,并通过对这些土地类型的散射特征和相关性的分析,探讨了干涉数据相关性与地表土地类型特征的关系。

(3)通过干旱-半干旱地区地表散射特性与干涉测量数据相关性的关系,建立干旱-半干旱地区地表变化时相去相关模型,为干旱-半干旱地区地表的变化探测提供理论的参考和依据。

致谢 本文的工作得到了联合国教科文组织 (UNESCO) 国际理论物理中心 (ICTP) TRIL 项目的支持。欧洲空间局 EO 开发项目提供了 ERS-1/2 数据,在此一并致以谢忱!

参 考 文 献 (References)

- [1] Dixon T H. SAR Interferometry and Surface Change Detection [R]. Report of Workshop Held in Boulder, Colorado, 1994.
- [2] Borgeaud M, Wegmueller U. On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of Geo-and Bio-physical Information [C]. Proceedings of 'Fringe 96' workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, Switzerland, 1996.
- [3] Rocca F, Prati C, Ferretti A. An Overview of ERS-SAR Interferometry [A]. Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of Our Environment [C]. Florence, Italy, 1997.
- [4] Askne J, Dammert P, Smith G. C-band Repeat-pass Interferometric SAR Observations of the Forest [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1997, 35(1): 25—35.
- [5] Laur H, Bally P, Meadows P, et al. ERS SAR Calibration: Derivation of the Backscattering Coefficient in ESA ERS SAR PRI Products [R]. ESA Document NO. ES-TN-RS-PM-HL09, Issue, 2.5b, 1998.
- [6] Editorial Committee of 1:1000000 Land-use Map of China. 1:1000000 Land-use Map of China [M]. Beijing: Science Press, 1987. [1:1000000 中国土地利用图编辑委员会. 1:1000000 中国土地利用图[M]. 北京:科学出版社,1987.]
- [7] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950—959.

Method and Model of Surface Feature Detection in Arid to Semi-arid Area Using SAR Interferometry

LIAO Jing-juan¹, GUO Hua-dong¹, SHAO Yun¹, LI Xin-wu¹, N. Veneziani²

(1. *Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. Institute for Signal and Image Processing, CNR, Bari 70126, Italy)

Abstract: The rapid development of economy and explosive growth of population have caused large decrease of water resources and vegetation coverage in the earth so that soil exhaustion, land desertification and salination become worse and worse, especially in arid to semi-arid area. It is very difficult to carry out the truth ground inventory and monitoring using the routine methods due to large and wide terrain and poor natural environments. Remote sensing technology has the ability of rapid information acquisition of large land expansion, and will supply useful information for monitoring the surface features in these regions. In recent years, imaging radar interferometric technique with its all weather, day and night capabilities, can generate the digital elevation model (DEM) and monitor surface change using amplitude and phase information from radar signal. So it has become a potential tool to acquire more resource and environmental information. The repeat-pass interferometry acquires two images by using one antenna for repeat passes over the same area at two different times. The two images can be used for further information extraction only while they have somewhat coherence.

Arid to semi-arid landscapes are characterized by its sparse vegetation cover and lower soil moisture, and make the scattering origination in the radar image mainly from the surface. The coherence of the radar data acquired by repeat-pass interferometry is generally high, even for a long acquisition time intervals. However, the geometric changes from the surface can be generated with the time. These changes may originate from vegetation growth and erosion caused by wind or water. Any change can be detected by the decrease of coherence, hence the decorrelation of interferometric data can supply the basis for surface change monitoring.

This paper presented the results of discrimination and classification of surface land types in Kashi test site, Xinjiang Province of northwestern China using the repeat-pass interferometric data, acquired by European Resource Satellite 1 and 2, based on the interferometric coherence estimation. Six types of land were discriminated and classified, including bare soil, salina, bush, bare rock/Gobi, marsh and water body. Then the backscatter and coherence characteristics of these land types were analyzed, and the relationship between coherence and surface features in arid and semi-arid area was also discussed. Finally, the temporal decorrelation model was made, and will supply the theoretical support for monitoring surface change in arid and semi-arid area using interferometric data.

Key words: interferometry; arid to semi-arid area; surface features; monitoring

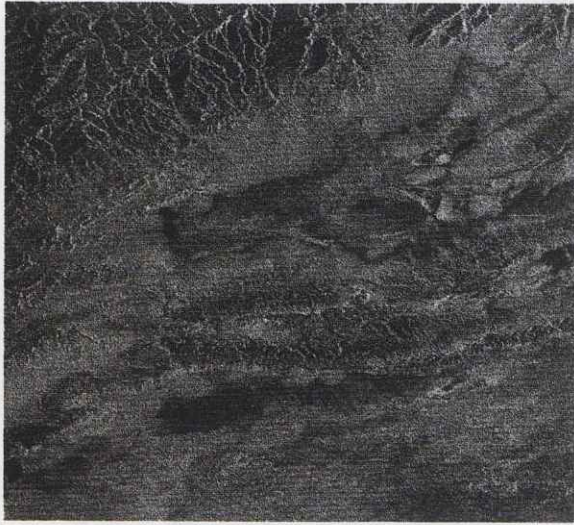


图 1 ERS-1 单视复数雷达振幅强度图像
 (图像已进行过增强处理,并对方向进行了采样)

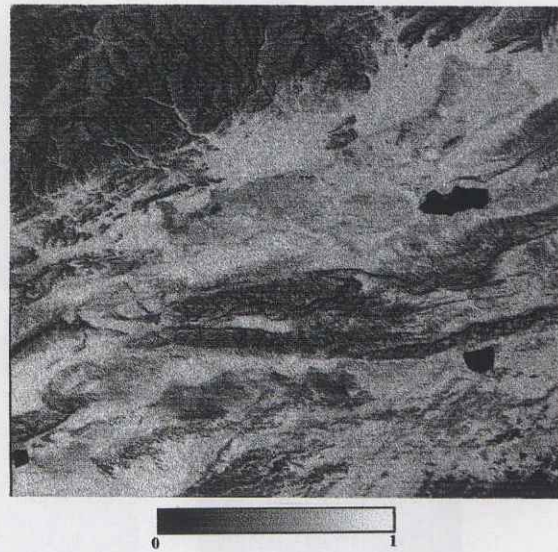


图 2 ERS-1 和 ERS-2 单视复数
 雷达数据生成的干涉相干图像

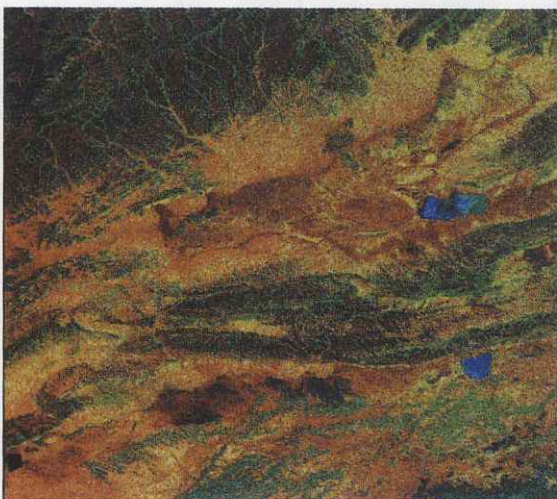


图 3 ERS-1 和 ERS-2 单视复数干涉雷达数据提取
 的相关信息 and 振幅信息合成的彩色图像
 (红色: 相关度; 绿色: ERS-1 和 ERS-2 振幅强度平均值;
 蓝色: ERS-1 和 ERS-2 振幅强度变化值)

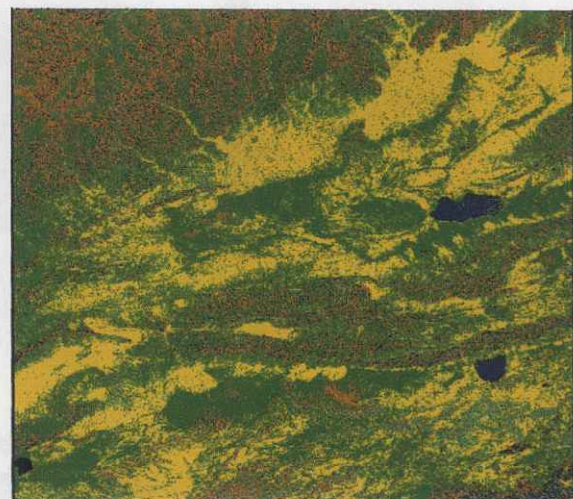


图 4 基于 ERS-1 和 ERS-2 单视干涉雷达数据
 进行的喀什试验区地表土地分类结果图

裸土	盐碱地	灌丛	裸岩 或戈壁	沼泽	水体