

# 新疆尉犁—喀什地区土壤含水信息的提取方法和效果

张振德 方洪宾 张佩民 王毅

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要:** 利用 Landsat-7 的 ETM 和 Radarsat1 号卫星 SAR 数据, 通过主成分分析、ETM 与 SAR 数据的融合处理和混合波段比值等多种方法, 在塔里木盆地北缘尉犁—喀什地区提取浅表地层土壤中的含水信息, 图像上高含水率区、中等含水率区、低含水率区和第四系风积层覆盖下面的含水部位等分别显示出不同的色彩特征。经实地验证, 圈定了新的含水地段, 取得了明显的信息提取效果。

**关键词:** 信息提取; 含水率; 色彩特征

## 引言

塔里木盆地是我国西部土地资源和石油、天然气、钾盐等矿产资源战略开发基地。尽快查清该地区的地下水资源, 对塔里木盆地的综合开发, 推动西部地区经济快速发展, 缩小东西部经济发展的差距, 是当前西部大开发战略中的一项紧迫任务。近年来, 笔者在完成中国地质调查局第一批国土资源大调查项目——“塔里木盆地地下水勘查”工作中, 利用 1999 年的 ETM 数据和 1996 年 Radarsat1 号卫星 SAR 数据, 通过主成分分析、ETM 与 SAR 数据的融合处理以及混合波段比值等多种方法, 提取盆地周边地区浅表地层土壤中的含水信息, 为该地开展水资源调查提供了快速准确的遥感依据。

## 1 浅层地下水出露形式及赋存的土壤岩性

塔里木盆地地处亚欧大陆腹地, 属于典型的内陆干旱荒漠区。由于气候干燥, 地表蒸发强烈, 使得浅层地下水(潜水埋深 < 5m)在地表的出露范围具有很大的局限性。据实地调查, 区内浅层地下水在地表的出露形式主要有五种:(1)沼泽地和积水洼地;(2)地下水溢出带;(3)泉点及泉集河;(4)冲积平原区及沙漠平原区内的湿地、潮土、半潮土;(5)研究区北部和南部基岩出露区中的断层泉和山间盆地内的盐碱滩。区内赋存浅层地下水的土壤岩性除山区基岩和早更新世冰水沉积的泥质胶结砾岩等碎屑岩以外, 绝大部分为山前倾斜平原区、冲积平原区和沙漠平原区内的砂砾质棕漠土、粉砂壤土、砂土、粘土、沼泽土、草甸盐土及绿洲潮土等。这些土壤中由于含水率不同, 使得含水地段和不含水地段, 含水率较高与含水率较低的地段在 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上表现出深浅不同的色调特征。但由于彩色图像上对色彩深浅的区分能力不如黑白图像, 因此, 对低含水率和中等含水率分布区及风积沙覆盖层下面浅埋区的含水部位从 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上准确地进行解译识别, 最大程度地划分出最小的解译单元, 则比较困难。为了增加浅层地下

水在 ETM 图像上的色彩层次信息,突出不同含水率的土壤在图像上的色差效果,最大程度地区分出高含水率区、中等含水率区、低含水率区和风积沙覆盖层下面浅埋区含水地段的分布范围,检验遥感技术方法在地下水资源调查中的应用效果,我们选择阿克苏地区、喀什地区和尉犁地区进行浅表地层土壤含水信息的提取方法研究。

## 2 浅表地层土壤含水信息的提取方法

### 2.1 基于线性变换的主成分分析

#### 2.1.1 阿克苏地区水文地质概况

阿克苏地区为全新世和更新世的冲积平原,呈一大型洪积扇。地貌上以温宿县城—多浪渠水库为界,分为南西侧的全新世早期—晚期 ( $Q_4^{al}$ ) 的冲积平原低地和北东侧的上更新统洪积 ( $Q_3^{pl}$ ) 台地两种截然不同的地貌类型。南西侧冲积平原低地几乎全部为农垦区,地势低缓,大部已垦植为耕地,由于含水率较高,农作物普遍长势较好。在 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上,农作物呈现深绿—绿色色彩,其中的矩形格状纹形图案特征非常清晰。

北东侧的洪积层台地地势较高,地表出露岩性主要为洪积亚砂土、粉砂及含砾砂互层,为阿克苏大型洪积扇的主体。洪积扇内,农田分布很少,只在洪积扇西北侧的台兰河出山口以南有小部分耕地分布。从该洪积扇所处的地貌位置来看,洪积扇西侧以北北西走向的阿克苏河为界,南侧为近东西走向的塔里木河上游河段,东侧为塔里木河上游的第一条北北东向支流,使得该洪积扇平面上总体呈 U 字形。洪积扇北侧有充足的地下水补给,除阿克苏河和塔里木河上游第一条北北东向的支流的侧向补给外,还有来自台兰河和喀拉玉尔滚河河水的入渗补给。由于该两条河流在出山口以南的中游河段水系发育,入渗补给的面积巨大,所以地下水的补给充足。此外,从洪积扇西北部的已有农作物长势和沿台兰河及喀拉玉尔滚河的干流和支流内生长的灌草丛可以判断,该洪积扇内地下水较为丰富。另据有关资料(孙晓明、陈冰等,2000),阿克苏冲积平原内的潜水埋深多为 5~50m,局部地段只有 1~4m。综合上述,认为该区具有丰富的地下水资源,浅表地层土壤中应该具有地下水的出露,含水率较高。为了提取该地区的浅表地层土壤中的含水信息,我们采用了主成分分析方法。

#### 2.1.2 多维变量组合的主成分分析方法

主成分分析方法是目前在专题信息提取中的一种较为常用且有效的方法,它是基于变量之间的相互关系,在尽量不丢失信息的前提下,利用线性变换的方法实现数据压缩,生成与参加线性变换的变量数相同的若干个主分量图像,最后再根据专题信息提取的目的不同,选取能突出所需信息的三个主分量图像进行合成,从而获得具有指示意义的最终图像。

在阿克苏地区,利用 2000 年 4 月 22 日的 147 - 31 景 Landsat-7ETM 数据,选取 ETM7、ETM4、ETM2、ETM4/ETM1、ETM3/ETM1 五个变量作主成分分析,生成了 Pc1、Pc2、Pc3、Pc4、Pc5 共五个主分量图像。在第一主分量 (Pc1) 上,集中了变换后的全部信息的 80% 左

右。同时，在第一主分量（Pc1）所包括的五个特征向量值中，ETM7 变量的特征向量值最大，说明第一主分量图像主要突出了 ETM7 波段信息，而 ETM7 对水体吸收较强。此外，据有关资料（P·H·斯韦恩，S·M·戴维，1984），在 ETM7 波段，粘土和砂土随着土壤中含水量的增加，其反射率逐渐降低。也就是说，ETM7 图像上砂土和粘土分布地段，深色调影像区比浅色调影像区的含水率高，因此，可以认为 ETM7 波段对土壤中的不同含水率分布地段区分效果较好，所以在合成选取主分量图像时，首先选择第一主分量（Pc1）。

在选择参加合成的第二个主分量和第三个主分量时，以能突出 ETM4/ETM1 和 ETM3/ETM1 变量的信息为原则。由于第五主分量（Pc5）所包括的五个特征向量值中，ETM4/ETM1 变量的特征向量值最大；第四主分量（Pc4）所包括的五个特征向量值中，ETM3/ETM1 变量的特征向量值最大，所以参加合成的第二个主分量和第三个主分量，我们选择了 Pc5 和 Pc4。通过对 Pc1、Pc5、Pc4 三个合成的主分量分别赋予 R、G、B 后，再作直方图均衡化增强处理，合成图像上浅表地层土壤中显示出多处含水信息。

## 2.2 ETM 数据与 SAR 数据的融合处理

### 2.2.1 雷达图像对土壤湿度监测的有效性

土壤湿度是指浅表地层疏松土壤的水分含量。雷达图像之所以对浅表地层土壤湿度反映敏感，主要是由于雷达图像记录的是土壤的后向散射强度。地物的后向散射强度决定了雷达图像的亮度。后向散射强度高的地物，图像上的亮度也高。后向散射强度又取决于地面的坡度、粗糙度和复介电常数等多种因素。在地形较为平坦，土壤成份较为均一的情况下，土壤的后向散射强度主要取决于土壤的复介电常数，而土壤的复介电常数又取决于土壤中水分的含量，即土壤的湿度。干燥土壤的复介电常数一般为 2~3，而水的复介电常数为 80，所以土壤水分含量的微小变化就能大大改变土壤的复介电常数，从而使雷达图像上的亮度值发生明显的改变。

雷达图像上显示浅表地层土壤中的湿度，总体显示的规律是：影像明亮，反映土壤潮湿，说明土壤中的水分含量较高；影像深暗，反映土壤干旱，说明土壤中水分含量低，而介于明亮和深暗色调之间的中间色调，则反映土壤中不同程度的含水量。在土壤水分含量较高的地下水溢出带或地下水浅埋区，图像上一般具有较高的亮度；而在沙漠区或风积沙等覆盖的贫水区或非含水区，图像上一般具有较暗的色调。这就是应用雷达图像在干旱—半干旱地区圈定浅层地下水不同含水程度分布区的基本依据。

### 2.2.2 喀什地区的水文地质概况

喀什地区位于研究区西部喀什市—英吉沙县一带，地貌上为西南天山与西昆仑山所夹持的喀什三角洲。其中有喀什噶尔河和叶尔羌河从三角洲流过，为区内两条主要河流。西南部为西昆仑山北麓的山地高原。

喀什三角洲是由西昆仑山脉和西南天山山脉的山前断裂带与叶尔羌河围限的冲积平

原。平原内由西昆仑山脉和西南天山山脉的融雪做为转化补给源的地下水补给非常充足。据有关资料(孙晓明、陈冰等,2000),喀什三角洲平原区在150m以上有2~3层承压水。潜水埋深一般<5m。在喀什市至英吉沙县城以西地区,由山麓到扇缘,潜水含水层变薄,水量减少。在疏附县城东西长2~5km范围内,为单一潜水含水层,潜水层厚200~300m,单井出水量>5000m<sup>3</sup>/d。其余地段单井出水量在1000~5000m<sup>3</sup>/d,矿化度<1.0g/L。

### 2.2.3 融合处理方法

融合处理使用1999年9月25日接收的149-33景ETM数据和1996年11月24日接收,29日处理的Radarsat1号卫星SAR数据。由于卫星携带的合成孔径雷达传感器(SAR)的波束模式因其幅宽和分辨率的不同有七种,融合使用的波束模式为窄幅扫描的SNA模式,雷达波束的入射角为20°~39°,幅宽300km,分辨率为50m×50m,比ETM1-ETM7(ETM6除外)的空间分辨率低近1倍,因此在融合处理之前,首先采用三次立方卷积功能对SAR数据的空间分辨率调整到30m,与ETM数据的空间分辨率一致。

融合处理的技术步骤分为:

(1)对ETM7 ETM4 ETM3波段组合作彩色空间变换,将红绿蓝系统变换成IHS系统(亮度,颜色和饱和度)。

(2)用SAR数据替代亮度分量(I),做IHS反变换,生成三个新的红(R')、绿(G')、蓝(B')分量。

(3)再选择ETM1、ETM4、ETM5和SAR四个因子作主成分分析,生成Pc1、Pc2、Pc3、Pc4四个主分量图像。

(4)最后选择IHS反变换后的绿分量(G')、ETM4和第一主分量(Pc1)三个图像分别赋予R、G、B进行彩色合成,生成ETM数据与SAR数据融合的最终图像。

## 2.3 混合波段比值

### 2.3.1 尉犁地区水文地质概况

采用混合波段比值方法提取浅表地层土壤中的含水信息,分别在尉犁和阿克苏两个重点找水地区进行。尉犁地区位于库如克塔格山南麓山前倾斜平原与塔里木河冲积平原的过渡带。南部有塔里木河,中部有孔雀河两条河流流过。南部的艾沙米尔水库和中部的阿克苏甫水库分别起到了拦蓄塔里木河和孔雀河河水灌溉农田的作用。加之两条主干河流的支流水系发育,以及北部库如克塔格山在丰水季节的山间河流流向山前倾斜平原区的侧向补给,该地区地下水的补给条件非常有利。区内地表出露主要为全新世早期冲积(Q<sub>4-1</sub><sup>al</sup>)的亚砂土、亚粘土和含砾粉细砂。全新世中期冲积物(Q<sub>4-2</sub><sup>al</sup>)分布较少。在塔里木河和孔雀河的现代河道内,分布有全新世晚期冲积的粉砂、粗砂及含砾砂等混杂堆积物(Q<sub>4-3</sub><sup>al</sup>),但出露面积较小。据有关资料(孙晓明,陈冰等,2000),库尔勒市—尉犁一带的山前倾斜平原区潜水

埋深 20~100m, 含水层为卵砾石、砂砾石, 水量丰富, 单井出水量 1000m<sup>3</sup>/d, 矿化度 0.5~2.0g/L。孔雀河冲洪积扇扇缘的西南部和尉犁县城以东一带, 矿化度 5~30g/L 或 >30g/L。

### 2.3.2 比值方法的应用

根据塔里木盆地北缘地区的沼泽土、草甸盐土、风沙土、粉砂壤土、砂砾质棕漠土及绿洲潮土等土壤在 ETM4、ETM3 和 ETM1 波段上反射率的差别(中国科学院空间科学技术中心, 1986), 我们先作 ETM4/ETM1 和 ETM3/ETM1 两个波段比值处理, 获得了两种单比值图像。这种单比值图像上, 上述土壤的灰度值比 ETM4 和 ETM3 单波段图像上的灰度值更高, 所以土壤呈现的色调比单波段图像上呈现的色调更浅。也就是说比值图像上各种土壤的色调差别进一步拉大, 中间色调的层次进一步增多。

基于单比值图像比单波段组合图像具有色彩深浅差异更大, 色彩层次更多的特点, 在尉犁地区和阿克苏地区浅表地层土壤的含水信息提取过程中分别使用了 2000 年 3 月 25 日接收的 143-31 景和 2000 年 4 月 22 日接收的 147-31 景 ETM 数据, 进行了[ETM5、ETM4/ETM1、ETM3/ETM1]混合波段比值处理, 再对处理图像进行了直方图均衡化增强。

## 3 3 种方法的处理图像上含水信息显示效果

### 3.1 主成分分析图像上含水信息显示及对比

#### 3.1.1 上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 内含水信息的色彩显示

阿克苏地区出露较大面积的上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ), 地表岩性以亚砂土、亚粘土、砂和含砾砂互层, 具典型的多层结构, 厚度约为 50~100 多米。由于该区具有良好的地下水补给条件, 地下水资源丰富, 因此推断浅表地层土壤中应具有地下水的出露, 甚至在部分亚砂土、亚粘土、含砾砂覆盖层之下的浅埋区, 也应有地下水的分布。

阿克苏地区大面积出露的上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 内含水信息的提取, 通过 PCA[ETM7、ETM4、ETM2、ETM4/ETM1、ETM3/ETM1], 选择 Pc1、Pc5、Pc4 三个主分量分别赋予 R、G、B 进行彩色合成, 再对合成图像作直方图均衡化增强, 增强图像上显示出多处含水信息。在新大锯架西, 阿克苏洪积扇的东前缘, 显示出一处面积 200km<sup>2</sup> 的高含水率分布区, 含水部位呈大小不等的团块状图斑, 蓝黑色色彩, 与洪积层背景显示的浅褐红带粉色色彩截然不同。值得注意的是, 这种团块状图斑的长轴方向与洪积扇的水系方向完全一致, 也呈近东西向展布。因此, 认为这种蓝黑色色彩和图斑的方向性以及图斑所处的洪积扇前缘的部位, 说明是图像上含水信息的显示。实地验证, 这种蓝黑色色彩部位均是亚砂土、亚粘土及含砾砂等混杂土壤中的高含水率区。

阿克苏地区主成分分析图像上显示的这种蓝黑色色彩, 大小不等的团块状图斑指示的含水信息, 在阿克苏洪积扇的南前缘, 多浪渠水库的东侧和北西侧上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ )

中均有显示,而这些部位在 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上则毫无色彩异常显示。两种图像的对比结果,有力地说明采用主成分分析方法提取第四系松散沉积物中的含水信息是有效的。

### 3.1.2 水体及沼泽地和地下水溢出带的色彩信息显示

在阿克苏地区主成分分析图像上,塔里木河及其次级支流内的水体呈均匀的深蓝色色彩,沼泽地和湿地呈蓝色—深蓝色色彩,不规则面状形态,均显示的很清晰。

位于阿克苏市北温宿县城—拱塔格山一带的山前倾斜平原区前缘的地下水溢出带,则显示为鲜明的色彩界面,界面呈不规则的曲线形,总体走向近东西。界面南侧大部为绿洲,影像上呈绿色—青绿色;界面北侧为山前倾斜带的砾石、含砾砂、粗砂和细砂土等混杂的冲洪积物,影像上呈均匀的褐黄、褐红及褐青色等不同的色彩,这些不同的色彩是由于山前倾斜带北侧的基岩山区岩性不同所致。这种界面的位置正是山前倾斜带前缘地下水溢出带的所在部位,详见图 1。

## 3.2 融合处理图像上土壤含水信息的显示特征

在喀什地区 ETM 与 SAR 数据的融合处理图像上,喀什噶尔河河漫滩等含水率较高的潮湿地段呈不均匀的灰白—浅灰色色彩。河流两侧或积水洼地周边部的细砂土、含砾砂土及粘土等冲洪积物,呈不均匀的粉红略带白色色彩,实地验证为中等含水率区。以砂土、亚砂土和含砾砂等组成的上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 和全新世风积层 ( $Q_4^{eol}$ ) 呈大面积的深蓝灰色色彩,反映表层土壤干燥,为非含水区。此外,水田呈暗褐红色,有农作物生长的旱田呈浅黄色。暗褐红色代表积水的涝洼地,浅黄色为棉田、黍类等耕地,也反映了农田中的含水率较高。

值得注意的是,在喀什噶尔河中游的河流转弯处有三块耕地在融合处理图像上显示为规则的浅粉白色色彩,两块呈矩形,一块呈方形。此外还有一处呈深灰色,形态为方形。这四处深浅不同的色彩与周围大面积的农田显示的浅黄色色彩差异非常明显,实地验证,三块浅粉白色色彩分布范围为含水率较高的棉田,另一处呈方块形的深灰色色彩分布地段为非含水的弃耕地,表层土壤很干燥。验证的结果也说明 SAR 图像与其它航天遥感图像对土壤含水信息的显示特征是完全不同的,详见图 2。

需要指出,融合处理图像上这四处显示的与周围明显不同的色彩特征,在 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上几乎无色彩差别,四处全部显示为绿色色彩。两种图像对比的结果,说明融合处理图像能较好的显示浅表地层土壤中的含水信息,而 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像的显示效果则不如融合图像。即使是 ETM6 波段的热红外数据,由于白天阳光辐射升温的影响,也不能对由于浅表地层较小的含水异常所引起的较弱的热辐射异常有明显的显示效果。

## 3.3 混合波段比值图像上的土壤含水信息显示

### 3.3.1 尉犁地区不同含水率土壤的色彩特征

尉犁地区地处塔克拉玛干沙漠的东部北边缘，分布较大面积的全新世晚期风积层 ( $Q_{4-2}^{eol}$ )，地表出露主要是风积沙，大部含水率低或不含水。但在靠近水库边部风积沙，由于地形较低洼，来自塔里木河和孔雀河及其支流的入渗补给条件较好，仍然有部分地段含水率较高。例如，艾沙米尔水库北东侧和东侧的全新世晚期风积层内，在[ETM5 ETM4/ETM1 ETM3/ETM1]的混合波段比值图像上显示出多处较均匀的深青灰色图斑，呈不规则面状形态，实地调查，这种深青灰色图斑是风积层内高含水率的湿地所显示。

在混合波段比值图像上，塔里木河古河道及孔雀河古河道内多处地段显示出窄带状的浅灰绿色色彩，实地调查，这种色彩是古河道内中等含水率的潮土所致。在塔里木河和孔雀河两侧较大面积的全新世早期冲积层 ( $Q_{4-1}^{al}$ ) 显示出多处较均匀的浅灰色色彩，面状形态，是由低含水率的亚砂土、亚粘土等呈半潮湿状态所引起。

可以看出，尉犁地区混合波段比值图像上显示出的深青灰色、浅灰绿色和浅灰色三种色彩差异比较明显。这种色彩深浅的差异正是由于浅表地层土壤中高、中、低三种不同含水率所决定，详见图 3。

### 3.3.2 阿克苏地区上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 内的土壤含水信息显示

在阿克苏地区[ETM5 ETM4/1 ETM3/1]混合波段比值图像上，大面积分布的上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 总体呈不均匀的淡黄色夹杂大小不等的白色斑块和细条带状的浅粉红色等混合的杂色色彩。其中淡黄色色彩为冲积砂、细砂和粉砂等砂土、亚砂土的色彩，白色斑块为重度和严重盐渍化土壤的色彩，浅粉红色则是冲沟内生长的芦苇、芨芨草、麻黄草等显示的色彩。特别值得注意的是，在这种大面积的杂色色彩背景上，有三种不同程度的深色调分布于该背景上。一种是均匀的浅黑色色彩，呈不规则面状形态。第二种是古河道呈现的深灰色色彩，宽窄不一的蛇形带状形态。第三种是浅灰略带黄色色彩，不规则面状形态。三种色彩的差异较大，与淡黄色色调为主体的背景色彩形成鲜明的对比。

图 1 示出草甸盐土、沼泽土、草甸土和湖水在可见光—近红外波段范围内的反射光谱曲线。可以看出，沼泽土由于水份含量较高，光谱反射率只有 8%—12%，在 ETM7 ETM4 ETM3 合成图像上呈浅黑色。湖水等水体的反射率只有 7%，所以研究区内博斯腾湖、多浪渠水库和上游水库等水体在混合波段比值图像上呈黑色色彩。据此可以判断，阿克苏地区混合波段比值图像上呈现出的均匀的浅黑色色彩，是高含水率的湿地的色彩显示。第二种深灰色色彩则是古河道内中等含水率的潮土的色彩显示。第三种浅灰略带黄色色彩则是低含水率的半潮土的色彩显示。实地验证的结果，证明三种不同的色彩均是由不同含水率的土壤所引起，大面积的淡黄色色彩分布范围则为上更新统洪积层 ( $Q_3^{pl}$ ) 表面非含水区。因此可以认为在阿

克苏地区采用的混合波段比值方法提取浅表地层土壤中的含水信息是有效的。

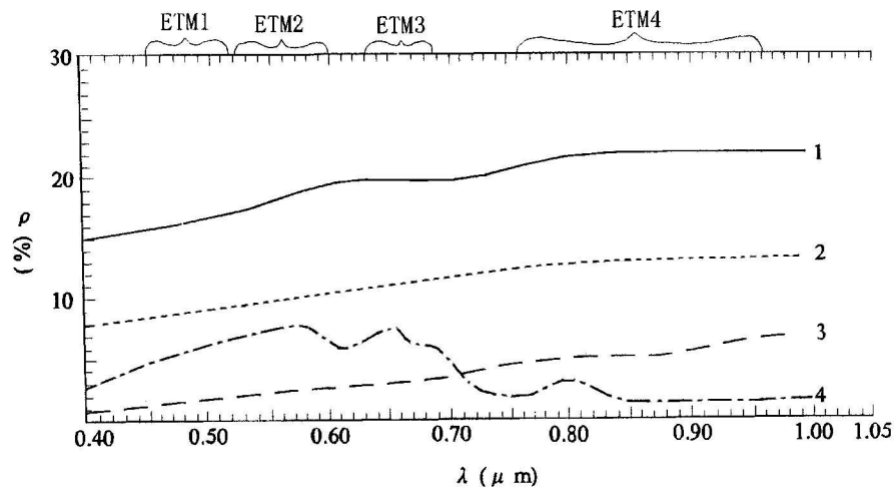


图4 新疆焉耆—博湖一带几种土壤及湖水反射光谱曲线

#### 图例

1. 草甸盐土(荒地), 和靖县, 1981年8月7日测量, 有机质含量2.01%, 土壤含水量17.6%
2. 沼泽土, 和靖县, 1976年4月2日测量。
3. 草甸土(荒地), 焉耆县, 1981年8月2日测量, 有机质含量4.29%, 土壤含水量29.3%
4. 湖水, 博湖县, 1981年8月5日测量, 湖水海拔高度969米, 泥沙含量491.0mg/l。

## 结论

基于线性变换的主成分分析、ETM与SAR数据的融合处理和混合波段比值三种方法, 在塔里木盆地周边地区提取浅表地层土壤中的含水信息, 均有一定效果。根据信息提取图像上不同含水率地段呈现的色彩特征, 配合部分实地验证, 可以发现和圈定含水区和非含水区, 区别高含水率区, 中等含水率区和低含水率区。从而为在类似的干旱—半干旱地区开展水资源调查提供了新的工作思路。

## 参考文献:

- 1 宋郁东、樊自立、雷志栋、张发旺. 中国塔里木河水资源与生态问题研究. 新疆:新疆人民出版社, 2000年2月。
- 2 朱述龙、张占睦. 遥感图像获取与分析. 北京:科学出版社, 2000年4月。
- 3 中国科学院空间科学技术中心. 中国地球资源光谱信息资料汇编. 北京:能源出版社, 1986年12月。

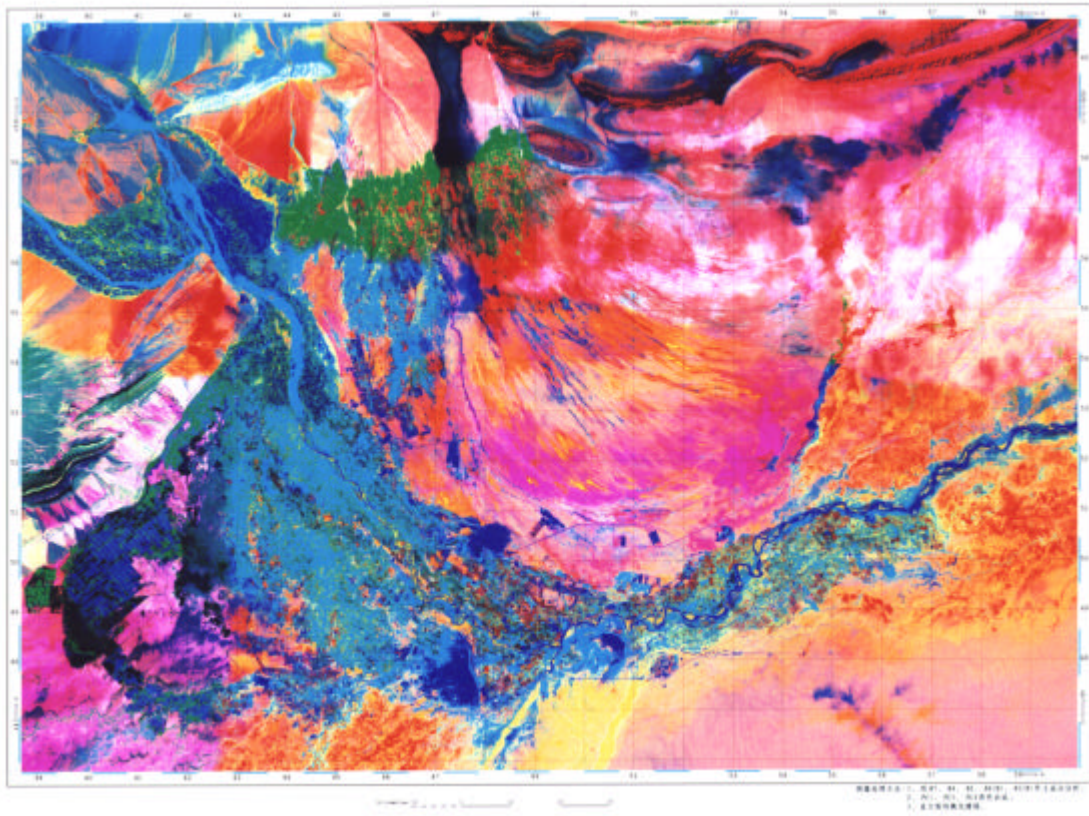


图 1. 新疆阿克苏地区 Landsat-7ETM 主成分分析图像

图像上不同的环带状颜色反映了冲洪积平原浅表地层含水性的差异。

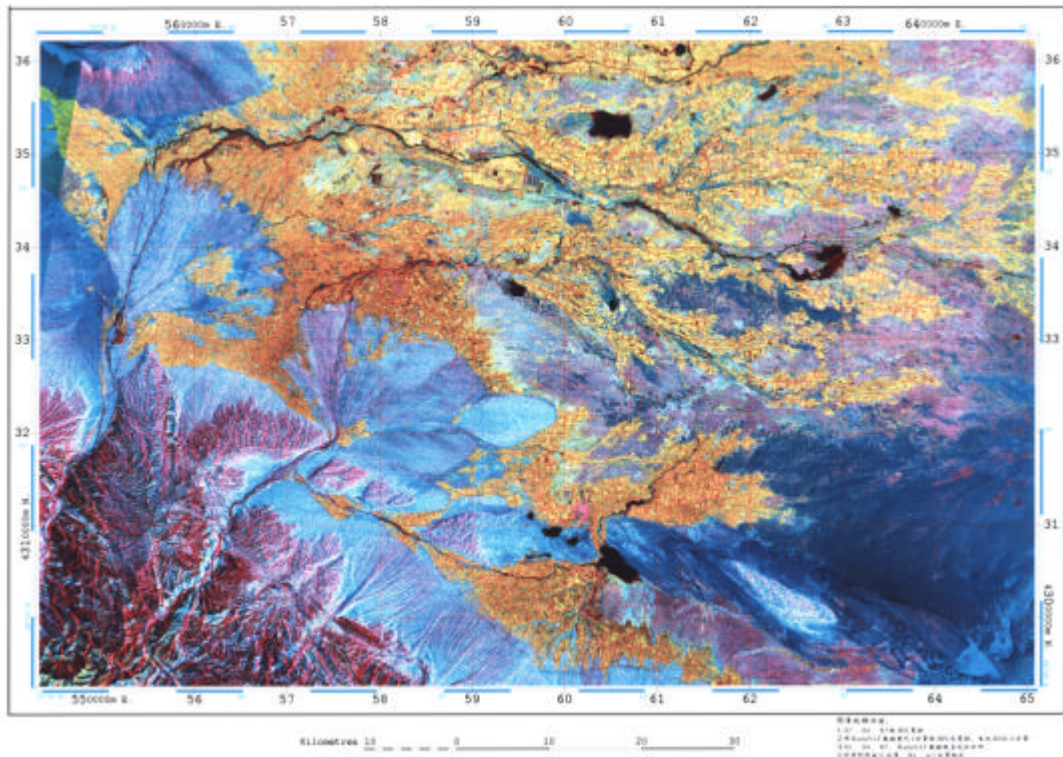


图 2 新疆喀什地区 ETM 数据与 SAR 数据融合处理图像

图像上暗褐红色、浅黄色和蓝灰色等颜色都反映了浅表地层含水率的差异。

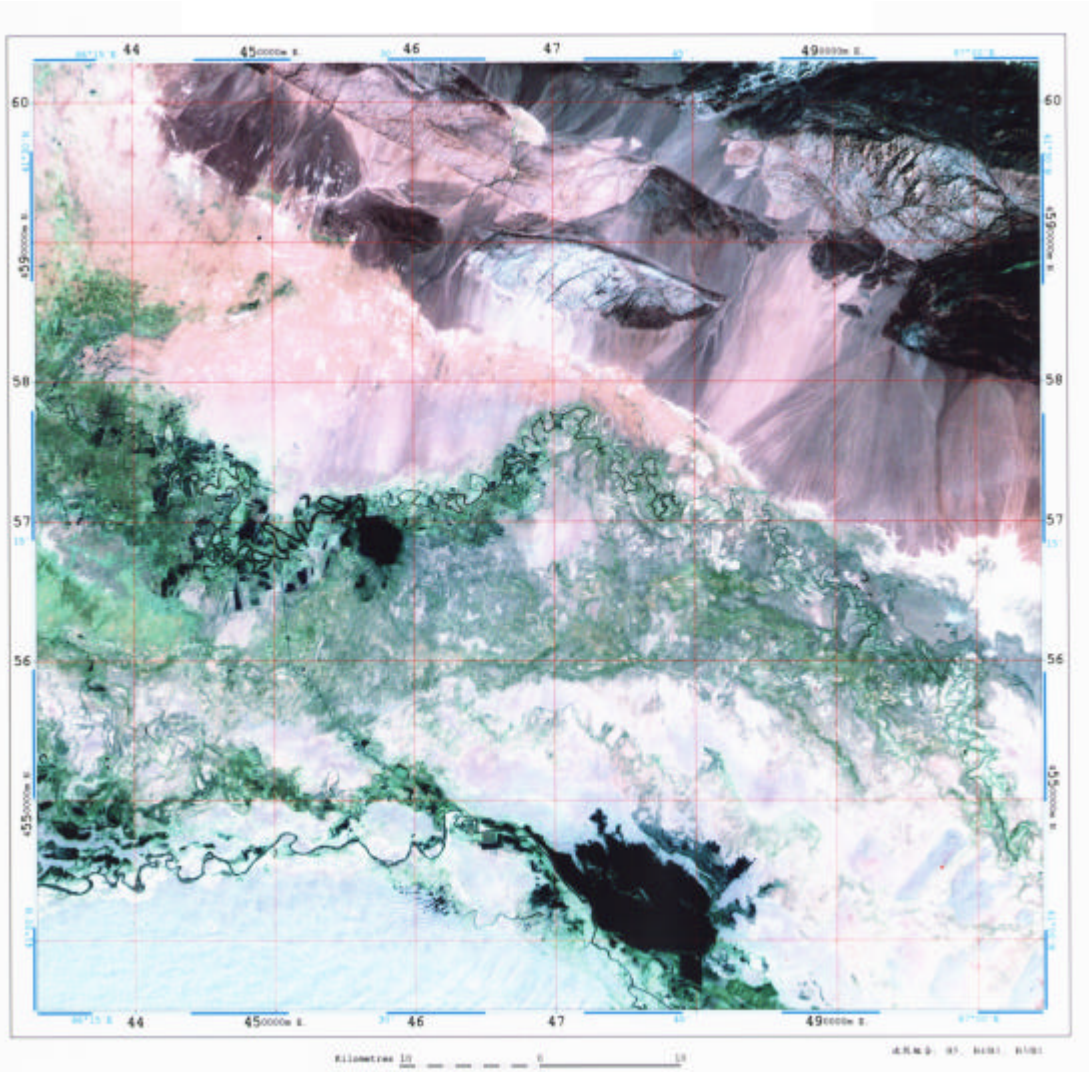


图3 新疆尉犁地区 Landsat-7ETM 混合波段比值图像

图像上的青灰色、浅灰绿色、浅灰色等颜色分别显示了浅表地层由高到低的不同含水率。