

DOI: 10.11766/trxb201702080579

# 基于多源数据的土壤水分反演及空间分异格局研究\*

蔡亮红<sup>1, 2</sup> 丁建丽<sup>1, 2†</sup> 魏阳<sup>1, 2</sup>

(1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

(2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要** 温度植被干旱指数 (TVDI) 是一种通过反演土壤水分来反映土壤干旱状况的重要方法。在TVDI的基础上引入数字高程模型 (DEM) 数据对地表温度进行校正, 能够减少地形起伏对能量二次分配的影响。用阈值将研究区分割成不同土地利用类型, 结合野外同步实测数据, 用分段反演模型反演渭-库绿洲土壤水分分布图, 并对渭-库绿洲土壤水分的空间格局和分异规律进行分析。结果表明: (1) 地形校正后的TVDI能够更好地反映土壤水分状况; (2) 土壤水分总体上从西至东, 由北向南降低, 在绿洲内部较为稳定, 在交错带变化较为剧烈, 土壤水分垂直变异系数呈现幂函数递减的整体变化趋势; (3) 针对研究区不同土地利用类型用分段反演模型进行反演, 有效地实现优势互补, 总体上提高了土壤水分的反演精度, 在区域土壤水分研究中值得关注和应用。

**关键词** 温度植被干旱指数 (TVDI); 地形校正; 土壤水分; 空间格局

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤水分是土壤—植被一大气连接的关键因子, 是土壤系统中物质和能量循环的载体, 对土壤特性、植被生长分布以及区域生态系统有着重要的影响<sup>[1-2]</sup>。同时随着全球气候变暖、干旱发生频繁, 土壤水分短缺已成为干旱区限制植物生长发育与分布的关键因素<sup>[3]</sup>。传统的土壤水分信息获取主要利用地面观测站进行监测, 常见的方法有称重烘干法、中子法、电磁技术、时域反射计 (TDR) 法等<sup>[4-5]</sup>, 其主要优点是精度高、取样灵活, 但是由于采样点数目有限, 很难实现大范围、连续的观测, 并且人力、物力投入较大, 为了获取大范围空间连续的土壤水分信息, 多分辨率、多时相、近实时的遥感技术成为解决该问题的手段之一。但是土壤水分遥感监测一直是国内外遥感应用研究领域的热点和难题之一<sup>[6-8]</sup>。自20世纪60年代来, 国内外对遥感监测土壤水分方法进行了大量

的研究, 取得了许多成果。主要方法包括热惯量法<sup>[9]</sup>、蒸散量计算法<sup>[10]</sup>、基于可见光与热红外波段的特征空间方法<sup>[11]</sup>和微波遥感方法<sup>[12]</sup>, 其中可见光与热红外波段的特征空间监测土壤干湿状况是具有一定研究基础的土壤水分估算模型<sup>[13]</sup>。目前利用地表温度—植被覆盖指数 (Ts-NDVI) 特征空间进行旱情监测已取得一定的进展, 但对于覆盖较好的天然植被和农作物, 使用NDVI造成的红光饱和问题比较严重, 背景的土壤噪声也在一定程度上损害了NDVI的空间一致性<sup>[14]</sup>, Qi等<sup>[15]</sup>在此基础上采用土壤调节植被指数 (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index, MSAVI) 对其进行改进, 取得了较好的效果; 伍漫春等<sup>[16]</sup>的研究也表明Ts-MSAVI能够更好地反映区域土壤水分状况, 是一种更有效的土壤水分监测方法。此外, 冉琼等<sup>[17]</sup>用数字高程模型 (DEM) 对全国地表温度进

\* 国家自然科学基金项目 (U1303381, 41261090) 和自治区重点实验室专项基金 (2016D03001) Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.U1303381, 41261090) and the Xinjiang Uygur Autonomous Region Key Laboratory Special Fund (No.2016D03001)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: watarid@xju.edu.cn

作者简介: 蔡亮红 (1991—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事干旱区遥感应用方面的研究。E-mail: 1173716776@qq.com

收稿日期: 2017-02-08; 收到修改稿日期: 2017-04-18; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-06-16

行订正，结果表明经过DEM校正获取的温度植被干旱指数能更好地反映土壤湿度；刘海隆等<sup>[18]</sup>和柯灵红等<sup>[19]</sup>通过研究西北地区不同的遥感数据均得出了地表温度随海拔高度的增高而降低，随坡度的增加而减小，随地势起伏度的增加而降低的结论。因此在Ts-MSAVI的基础上引入DEM进行校正能否提高土壤水分反演精度值得研究的。

渭一库绿洲位于干旱与极端干旱地区，土壤水分是绿洲—荒漠生态系统稳定性的重要指标<sup>[20]</sup>，全面揭示绿洲—荒漠土壤水分的运移规律显得十分重要。为了更好地提高TVDI模型反演土壤水分的精度，本研究以Landsat8数据为基础，利用DEM数据对地表温度数据进行地形校正，采用基于MSAVI的温度植被干旱指数方法分段反演研究区2015年7月土壤表层水分状况，来反映其土壤干湿状况，同时采用同步采样获取的土壤表层水含量实测数据验证该方法的可行性，并应用实测数据进一步分析渭一库绿洲地区土壤水分的空间分布格局。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

渭一库绿洲位于新疆南部塔里木盆地中北部，属阿克苏地区，辖新和、库车、沙雅3县，地理坐标 $41^{\circ}06' \sim 41^{\circ}38'N$ 、 $81^{\circ}26' \sim 83^{\circ}17'E$ ，地势北高南低，自西北向东南倾斜，沟壑相间，是一个典型而完整的山前冲积扇平原（图1）。气温日较差大，年平均气温 $10.5 \sim 14.4^{\circ}C$ ，极端最高气温 $41.5^{\circ}C$ ，潜在蒸发量 $2420mm$ ，多年平均降水量为 $43mm$ ，蒸降比约 $54:1$ ，降水较少，属于干旱与极端干旱地区。土壤主要为潮土和草甸土<sup>[21]</sup>。天然植被以芦苇（*Phragmites australis*）、骆驼刺（*Allagris parifolia*）、花花柴（*Karelinia caspica*）等为主。

### 1.2 实测样品数据与影像数据

2015年7月10日至23日采集38个采样点的野

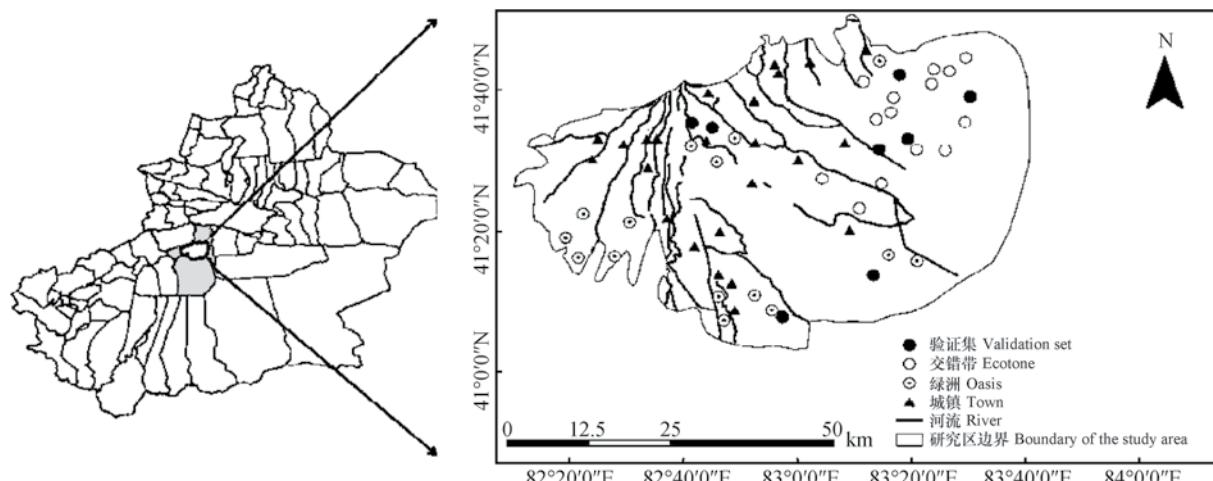


图1 研究区样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study area

外实测数据，每个采样点采集 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100cm$ 共六层土壤样本，共采集到228个土壤样本。其中绿洲内采样点18个，交错带内的采样点20个，采用烘干法测定土壤含水量，温度控制在 $105^{\circ}C$ 。为了与野外实测数据相结合，选择的影像数据为野外采样时间段内的Landsat8遥感数据，获取时间为2015年7月15日，DEM数据的来源为中国科学院数据中心的ASTER GDEM数据，分辨率为 $30m$ 。

地形校正法是目前应用最为广泛的C校正模型，前期数据处理包括几何精校正和COST模型大气校正，几何精校正误差（RMS）小于0.5，然后用矢量边界进行裁剪。利用DEM数据在ENVI软件中计算得到坡度、坡向数据，同时为了消除大气散射和地表相邻点反射光折射造成的像元亮度值（DN值）和太阳入射角 $\alpha$ 之间的余弦关系，本研究在二阶校正模型的基础上利用IDL（Interactive Data Language）语言进行改进，并经过二次校正

才能得到校正结果。MSAVI是在ENVI软件中采用波段运算计算得到。

### 1.3 TVDI原理

地表温度是地球表面能量平衡和温室效应的一个很好的指示指标, 它能反映土壤水分状况, 是区域和全球尺度地表物理过程中一个关键因子。植被指数(VI)是由传感器可见光和近红外通道探测数据的线性或非线性组合计算而来, 能够提供绿色植被生长状况和分布信息。利用Ts-VI反演土壤水分的原理, 是基于水分蒸发和植被蒸腾对地表温度的降低作用。Sandholt等<sup>[22]</sup>因此发展了温度植被干旱指数(TVDI)的土壤水分监测方法, 其表达式如下所示:

$$\text{TVDI} = \frac{\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_{s\min}}{\mathbf{T}_{s\max} - \mathbf{T}_{s\min}} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}_s$ 为任意像元的地表温度, 本研究中用Landsat8数据, 其中以Band10波段获取辐射亮温;  $\mathbf{T}_{s\max} = a_1 + b_1 \times \text{VI}$ 为某一VI值对应的最高地表温度, 即特征空间干边,  $a_1$ 、 $b_1$ 为干边拟合方程的系数;  $\mathbf{T}_{s\min} = a_2 + b_2 \times \text{VI}$ 为某一VI对应的最低地表温度, 对应于图中Ts-VI空间的湿边,  $a_2$ 、 $b_2$ 为湿边拟合方程的系数。干边上像元干旱指数为1, 湿边上像元干旱指数为0, 计算得到任何一点TVDI值介于0和1之间。TVDI越大, 土壤水分越低, 干旱程度越高; 反之干旱程度越轻。

### 1.4 灰度直方图分割

基于直方图的灰度图像分割是一种简单有效的

分割方法, 对图像内容简单、目标与背景灰度差较大的影像能取得较好地分割效果, 其思路是利用影像生成灰度直方图, 统计直方图的分布特性, 针对直方图的波峰或波谷运用不同的准则来获取最佳阈值<sup>[23-24]</sup>。由于阈值分割对噪声比较敏感, 为准确获取研究区的二值化图像, 本文在分割前先对影像进行平滑处理, 去除干扰噪声。常用的图像平滑方法主要有均值平滑、中值滤波和高斯模糊滤波。考虑到中值滤波在抑制噪声的同时能够有效保留边缘信息, 故本文采用中值滤波方法对图像进行平滑处理。通过计算目标图像直方图的峰值个数, 进一步判断图像直方图的类型(单峰直方图、双峰直方图和多峰直方图), 然后针对不同类型的直方图选取有效的阈值分割方法。

## 2 结 果

### 2.1 地表温度的地形校正

图2为研究区的数字高程图, 由于研究区地势北高南低, 自西北向东南倾斜, 沟壑相间的特点决定了局部微地形是影响研究区植被、土壤、气候等各方面地域分异的主要控制因素。由图3可知, 经过地形校正后的Ts-MSAVI值与38个实测土壤表层含水量数据的决定系数高于地形校正前,  $R^2$ 从0.44提高至0.53, 均达到0.01的显著水平, 拟合结果表明, 利用地形校正后的Ts-MSAVI反映土壤水分的效果较DEM校正前的好。

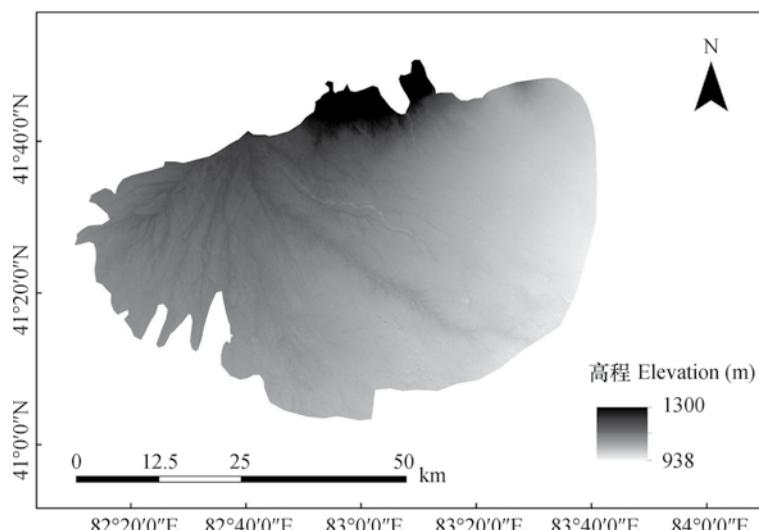


图2 研究区数字高程图

Fig. 2 DEM of the study area

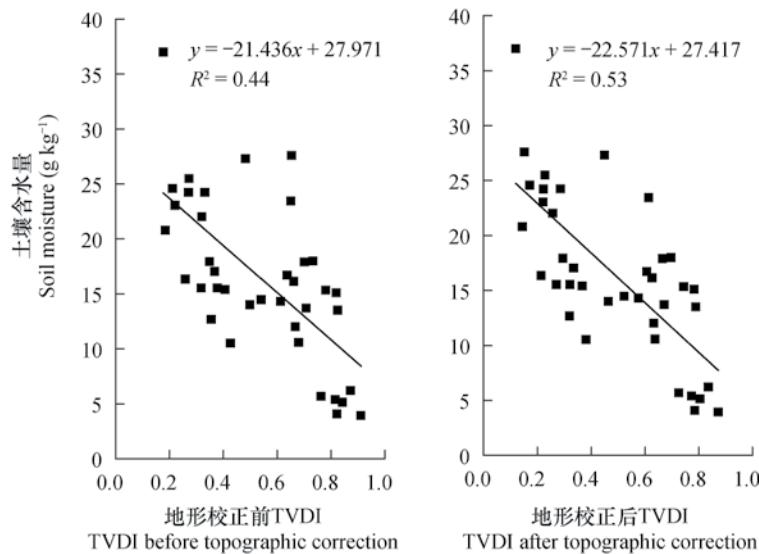


图3 土壤含水量实测值和地形校正前后TVDI的拟合效果对比

Fig. 3 Relationships between soil moisture content and TVDI before and after topographic correction

## 2.2 特征空间干、湿边的确定

根据式1可知，本研究中VI为植被指数， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为干边和湿边线性拟合方程的系数，提取干湿边的方法如下：VI值从0至1，以0.01为步长，提取具有相同植被指数（值域，如0.01~0.02）所有像元对应 $T_s$ 值的最大值和最小值，分别与其对应的VI值组成点对，然后采用最小二乘法进行线性方程拟合，形成干边和湿边。此过程利用IDL语言编程实现，自动提取干湿边。这种干湿边提取方法将特征空间上下边缘的点对均加入到拟合过程中，可以在一定程度上克服噪声点的影响，能更好地接近真实的干湿边。拟合得到的湿边方程为 $T_{s\min} = 28.3539x + 275.773$  ( $R^2=0.84$ )，干边拟合方程为 $T_{s\max} = -18.3282x + 312.373$  ( $R^2=0.92$ )。

## 2.3 土壤水分遥感监测结果的精度验证

利用38个土壤样本中的30个实测表层(0~10 cm)土壤含水量数据与相应的TVDI数据进行建模分析，建模集中位于绿洲内和交错带内的采样点各15个，剩余8个样点用于检验。基于遥感数据提取土壤干湿状况的时相与采样时间基本吻合，且本文旨在监测全区的土壤干湿空间分布及分异规律而不是获取土壤绝对湿度，因此采用采样点的实测数据验证TVDI反映的研究区土壤干湿状况是可行的<sup>[25]</sup>。

利用整个研究区采样点的实测土壤表层含水量

数据与相应TVDI数据进行相关性分析。从图4c可以看出，研究区30个采样点的实测土壤表层含水量数据与相应TVDI数据进行相关性分析，决定系数 $R^2$ 达到0.52，达到0.01的显著水平；从图4a和图4b可知，分别利用交错带和绿洲内的15个采样点的实测含水量数据与相应TVDI数据进行相关性分析，决定系数 $R^2$ 分别为0.55、0.59，均达到0.01显著水平。说明温度植被干旱指数能够反映土壤水分状况变化趋势，作为旱情评价指标有一定的合理性。随着土壤含水量增大，TVDI值呈现明显的减小趋势。

从图4可知，不同的土地利用类型的实测土壤表层含水量数据与相应TVDI值的决定系数 $R^2$ 是不同的，按大小排序为：绿洲>交错带>整体，总体而言，绿洲和交错带的土壤水分的反演精度均较整个研究区的反演精度高。由图1可知，河流和湖泊等在研究区西部的绿洲地区分布较广，而在研究区东部的交错带地区分布较为稀少，因此可知在绿洲内植被覆盖较好，相对于绿洲而言，交错带内植被稀少、裸地较多，一定程度上降低了反演精度，所以在绿洲内基于地形校正后的TVDI反演土壤表层水分的精度较交错带的反演精度高。

## 2.4 绿洲和交错带分割阈值的确定

整个研究区内不同的土地利用类型（绿洲和绿洲—荒漠交错带）的土壤水分的补给来源是不一样，在相同的气象条件下，同一地区的不同区域由于人类活动的影响和土层结构的不同导致土壤含水

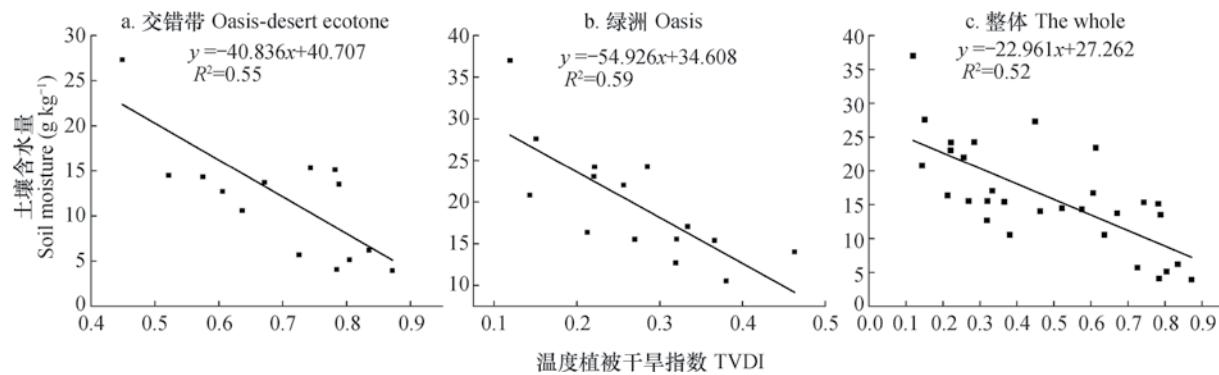


图4 实测土壤含水量与地形校正后TVDI的关系

Fig. 4 Relationship between measured soil moisture content and TVDI after topographic correction

量与温度植被干旱指数 (TVDI) 呈现出不同的相关性。因此在研究区采用同一个模型反演土壤水分状况是不符合实际情况的。由图4可知, 整体的反演精度最低, 绿洲的反演精度最高, 由于整个研究区内同时存在绿洲和绿洲—荒漠交错带, 导致整体上TVDI直方图不是一个标准的正态分布, 而是呈双峰直方图分布, 在两个波峰之间存在一个波谷。为了更好地提高温度植被干旱指数 (TVDI) 模型反演整个研究区土壤水分的精度, 将研究区按分割阈值分为绿洲和交错带, 并且用分段函数来表示整个研究区土壤水分的反演模型。

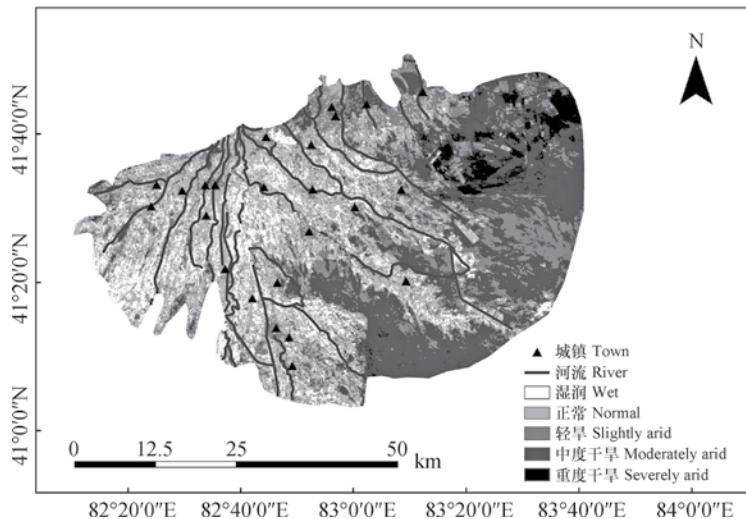
鄢雪英等<sup>[26]</sup>利用MODIS数据对中亚土库曼斯坦典型绿洲荒漠化进行研究, 研究中将  $TVDI=0.61$  作为绿洲和交错带的分割阈值, 而本研究利用Landsat8数据对渭—库绿洲进行分析, 并在Matlab12a中根据TVDI灰度直方图将研究区进行图像分割, 发现当  $TVDI=0.4856$  时分割效果最佳, 根据野外采样点及其野外实地考察可知, 图像分割结果与实地考察结果的一致性较好, 利用图4a和图4b中的回归方程及上述判定的阈值建立土壤水分 ( $Y$ ) 的反演模型, 即  $Y= -0.5493X + 0.3461$ ,  $TVDI < 0.4856$ ;  $Y= -0.4084X + 0.4071$ ,  $TVDI \geq 0.4856$ 。为了检验反演结果的精度, 将检验样点的TVDI代入上述反演模型, 计算出检验样点的预测土壤含水量, 然后对检验点的反演值和实测值进行相关性分析, 结果表明, 用分段模型反演的土壤含水量与实测值之间的决定系数  $R^2=0.72$ ,  $RMSE=0.03$ ; 用原始模型反演的土壤含水量与实测值之间的决定系数  $R^2=0.64$ ,  $RMSE=0.04$ , 以上两个模型均达到0.01显著水平。用阈值分割后的分段模型对整个研究区的反演精度较原始模型高。

## 2.5 土壤水分空间格局

**2.5.1 土壤水分整体状况** 根据Son等<sup>[27]</sup>的干旱分级标准, 将TVDI值按其大小分为5个类别以表示不同程度的干旱与土壤含水量的关系: 湿润 ( $0 \sim 0.2$ )、正常 ( $0.2 \sim 0.4$ )、轻度干旱 ( $0.4 \sim 0.6$ )、中度干旱 ( $0.6 \sim 0.8$ )、严重干旱 ( $0.8 \sim 1.0$ ), 利用ARCGIS制作了研究区2015年7月的旱情等级分布图, 并叠加上河流、城镇图(图5)。

从TVDI旱情等级分布图反映的渭—库绿洲土壤水分来看, 研究区土壤干湿存在明显的空间分异规律: 河流及其附近区域属于湿润地区, 干涸的河道属于中度干旱, 而规模较大的城镇由于建设用地较多属于轻度干旱。土壤水分总体上从西至东, 由北到南降低。湿润地区面积为  $1.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 主要集中在沙雅县、新和县和库车县河流附近的农田; 正常地区面积为  $2.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 分布在绿洲内离河流相对较远的农田; 轻度干旱地区面积为  $1.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 主要分布在城镇及其周边地区和研究区东南部的交错带内; 中度干旱地区面积为  $1.98 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 主要分布在研究区的东部及东南部交错带内, 在绿洲内部也有零星的分布, 主要为裸露的农田和干涸的河道; 严重干旱地区面积为  $2.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 主要分布在库车县墩阔坦乡东部地区的交错带内, 少数分布在研究区南部交错带内。

**2.5.2 土壤水分空间分异特征** 根据野外实地调查和上述灰度直方图分割结果, 大致将研究区的土地利用类型分为绿洲和绿洲—荒漠交错带, 土壤水分在水平方向上的分布与土地利用类型和地形保持着较好的一致性: 研究区地势由西北向东南倾斜, 在研究区东部的绿洲内主要为农田、草地、林



注：湿润、正常、轻度干旱、中度干旱、严重干旱对应的TVDI值分别为 $0\sim0.2$ ， $0.2\sim0.4$ ， $0.4\sim0.6$ ， $0.6\sim0.8$ ， $0.8\sim1.0$  Note: The corresponding TVDI value of Wet, Normal, Slightly arid, Moderately arid, Severely arid is  $0\sim0.2$ ,  $0.2\sim0.4$ ,  $0.4\sim0.6$ ,  $0.6\sim0.8$ ,  $0.8\sim1.0$ , respectively

图5 旱情等级分布图

Fig. 5 Distribution map of TVDI, River and Town

地，在西部的交错带内有少数的农田，大部分为裸地和稀疏植被。植被与地形之间的匹配关系在很大程度上与土壤水分状况有关，是对研究区自然环境条件长期相互适应的结果。

研究区内38个样点0~100 cm剖面6个土层平均土壤含水量的变异系数，土壤水分表现出明显的空间分异特征（整体、绿洲和交错带的变异系数分别为33%、28%和36%），这种土壤水分的空间分布格局可能与研究区的土地利用方式、植被类型、地形要素等有关。整体上，土壤水分分布格局是对不同尺度上的生命因素（植被类型、生长年限、人为活动等）和非生命因素（质地、地形、时间等）的综合响应，同时又决定着相应尺度上的一系列物理（如土壤侵蚀搬运、土壤结构涨缩）、化学（如可溶性物质的迁移、氮素的硝化/反硝化）和生物（如微生物活性、根系吸水）过程<sup>[28]</sup>。

土壤水分的变异系数表明了各土层土壤水分运动的活跃程度。土壤水分变异系数越大，意味着该层土壤水分运动越活跃，土壤干、湿交替越频繁<sup>[29]</sup>。土壤含水量随降水量、蒸散发量大小而波动变化，越接近地表，这种波动越明显，同时土壤水分的剖面分布格局还受土地利用的显著影响。研究区内的采样点按土地利用类型分为绿洲内的采样点和交错带内的采样点，共38个采样点，根据各层土壤含水量变异系数的分布曲线可知，随土层

深度的加深，土壤水分变异系数呈现幂函数递减的整体变化趋势。表层（0~10cm）土壤水分变异系数最高，之后持续下降，而且下降的速率均较表层和次表层快。具体来看，由于采样季节是植被茂盛时期，植被覆盖度较高，加上人为对农田的有效管理，导致绿洲剖面土壤水分变异系数最低；在交错带由于植被稀少、温度较高，持续的高温不断消耗土壤水分，导致土壤水分蒸散发层范围内土壤水分变异系数较大。

### 3 讨 论

目前利用Ts-NDVI特征空间进行旱情监测已取得一定的进展，但对于覆盖较好的天然植被和农作物，使用NDVI造成的红光饱和问题比较严重，背景的土壤噪声也在一定程度上损害了NDVI的空间一致性<sup>[14]</sup>，而土壤调节植被指数MSAVI相对NDVI更能描述植被覆盖度和土壤背景的优势<sup>[15]</sup>，伍漫春等<sup>[16]</sup>研究也表明Ts-MSAVI能够更好地反映区域土壤水分状况，是一种更有效的土壤水分监测方法。本研究采用Landsat8数据对渭—库绿洲旱情进行研究，在Ts-MSAVI的基础上利用DEM数据对研究区的地表温度数据进行地形校正，消除地形起伏和覆被类型对地表温度的影响，校正后的TVDI与土壤含水量的 $R^2$ 达到0.53，

而刘立文等<sup>[30]</sup>利用MODIS产品数据和DEM数据对吉林省农业旱情进行研究，校正后的TVDI与土壤含水量的 $R^2$ 达到了0.55，这是由于数据源和研究区的不同，导致 $R^2$ 有所不同，但是总体上是较为接近的；绿洲内的植被盖度较高，多为农作物，如棉花、小麦等，但在交错带内地表覆被主要为天然盐生植被，如芦苇（*Phragmitesaustralis*）、骆驼刺（*Allhagisparisifolia*）、花花柴（*Karelinacaspica*）等，在影像上表现为枝叶稀疏，并且与裸露的土地交错分布，容易造成异物同谱现象。总体而言，交错带内植被稀少，甚至在荒漠化比较严重的地区全为裸地，容易造成像元的混分。由于研究区内同时存在不同的土地利用类型（绿洲和荒漠），本研究用灰度直方图对研究区分割后进行分段反演，结果表明，用分段模型反演的土壤含水量与实测值之间的决定系数 $R^2=0.72$ , RMSE=0.03；而用原始模型反演的土壤含水量与实测值之间的决定系数 $R^2=0.64$ , RMSE=0.04，分段模型的反演精度要高于原始模型，说明用统一的反演模型会将不同土地利用类型之间的差异平均化，导致用统一的反演模型的精度要小于分段模型的精度，因此，不同土地利用类型不能一起作Ts-MSAVI空间特征来计算TVDI指数，这与Smith和Choudhury<sup>[31]</sup>和陈艳华和张万昌<sup>[32]</sup>的研究结果一致。而用灰度直方图对研究区进行分割时，将绿洲内的少数城镇误分为交错带，降低了反演精度，但是研究区城镇面积较小对整体结果的影响不大，最终反演结果较好。用阈值分割后的分段模型对整个研究区的反演精度较原始模型高，所以选择合适的分割阈值进行分割是一种提高反演精度的手段。

渭一库绿洲地势北高南低，自西北向东南倾斜，沟壑相间，属于干旱与极端干旱地区<sup>[21]</sup>。结合图2和图5可知，研究区土壤干湿存在明显的空间分异规律，总体上从西到东，由北到南土壤含水量逐渐降低，在这种总体趋势上叠加局部地形影响的土壤干湿变化，这与张喆等<sup>[33]</sup>的研究结果一致；土壤水分的变异系数表明了土壤水分运动的活跃程度。土壤水分变异系数越大，意味着土壤水分运动越活跃，土壤干、湿交替越频繁，根据研究区内各样点剖面6个土层平均土壤含水量的变异系数可知，土壤水分表现出明显的空间分异特征，土壤水分在绿洲内部较为稳定，在交错带变化较为剧烈（整体、绿洲和交错带的变异系数分别为33%、

28%和36%），这种土壤水分的空间分布格局可能与研究区的土地利用方式、植被类型、地形要素等有关；根据各层土壤水分变异系数分布可知，越接近地表，土壤水分的变异系数越大，同时不同土地利用类型中相同土层的土壤水分垂直变异系数的大小不一样，但是总体趋势是相同的，即随着土层深度的加深，土壤水分变异系数呈现幂函数递减的整体变化趋势，这与宁婷和郭忠升<sup>[29]</sup>的研究结果一致。

总体而言，遥感即使在反演土壤水分上表现出较好的优势，但是在监测土壤水分到监测干旱之间仍然存在一个较难过渡的过程，因为干旱的发生有着极其复杂的机理，在受到各种自然因素如降水、温度、地形等影响的同时也受到人为灌溉等因素的影响。单纯的遥感方法无法达到反映干旱特征的目的。综合多源数据的干旱综合监测模型是研究复杂的干旱监测问题的新途径，在解决干旱监测的复杂问题中有着较大的应用潜力。本研究尚属可行性研究，在单期影像的Ts-MSAVI的基础上引入DEM数据进行地表温度的校正，并且进一步用灰度直方图对研究区进行分割，用分段函数来反演土壤水分空间分布。根据野外实地采样和考察发现，研究区土壤水分反演结果与实地情况较为一致。但单期的影像不能说明研究结果的普遍性，在后续的研究中将会进一步考虑采用多期遥感数据做动态分析。

## 4 结 论

本研究利用DEM数据对地表温度进行校正，提取TVDI反映渭一库绿洲土壤水分状况，用分段模型反演渭一库绿洲土壤水分，并基于同步时间内的实地采集数据进行验证，取得了较好结果。并进一步分析渭一库绿洲土壤水分的空间格局和分异特征：利用DEM校正后的Ts-MSAVI反映土壤水分的效果较未采用DEM的好；总体上从西到东，由北到南土壤含水量降低，在这种总体趋势上叠加局部地形影响的土壤干湿变化；土壤水分在绿洲内部较为稳定，在交错带变化较为剧烈；土壤含水量垂直变异系数呈现幂函数递减的整体变化趋势；利用Landsat8遥感数据，以灰度直方图分割阈值进行分割，针对研究区不同土地利用类型用分段反演模型进行反演，有效地实现优势互补，总体上提高了土壤水分的反演精度，在区域土壤水分研究中值得关注和应用。

## 参考文献

- [ 1 ] 李萍, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演. 土壤学报, 2015, 52 ( 6 ) : 1262—1272  
Li P, Zhao G X, Gao M X, et al. Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 6 ) : 1262—1272
- [ 2 ] 张静, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素. 土壤学报, 2016, 53 ( 6 ) : 1421—1432  
Zhang J, Wang L, Han X, et al. Evapotranspiration of farmland on loess table and its major influencing factors ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 6 ) : 1421—1432
- [ 3 ] 李林芝, 张德罡, 辛晓平, 等. 呼伦贝尔草甸草原不同土壤水分梯度下羊草的光合特性. 生态学报, 2009, 29 ( 10 ) : 5271—5279  
Li L Z, Zhang D G, Xin X P, et al. Photosynthetic characteristics of *Leymus chinensis* under different soil moisture grades in Hulunbeir prairie ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 ( 10 ) : 5271—5279
- [ 4 ] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999, 10 ( 3 ) : 251—259  
Liu C M, Sun R. Ecological aspects of water cycle: Advances in soil-vegetation-atmosphere of energy and water fluxes ( In Chinese ). *Advances in Water Science*, 1999, 10 ( 3 ) : 251—259
- [ 5 ] 邓辉, 周清波. 土壤水分遥感监测方法进展. 中国农业资源与区划, 2004, 25 ( 3 ) : 46—49  
Deng H, Zhou Q B. Advances in remote sensing monitoring of soil moisture ( In Chinese ). *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2004, 25 ( 3 ) : 46—49
- [ 6 ] 邵晓梅, 严昌荣, 徐振剑. 土壤水分监测与模拟研究进展. 地理科学进展, 2004, 23 ( 3 ) : 58—66  
Shao X M, Yan C R, Xu Z J. Progress in monitoring and simulation of soil moisture ( In Chinese ). *Progress In Geography*, 2004, 23 ( 3 ) : 58—66
- [ 7 ] 肖飞, 杜耘, 凌峰, 等. 长江中游四湖流域湖泊变迁与湖区土壤空间格局的关联分析. 湿地科学, 2012, 10 ( 1 ) : 8—14  
Xiao F, Du Y, Ling F, et al. Analysis of relation between change of lakes and the spatial pattern of soils in the lake district in Sihu drainage basin, middle reaches of Yangtze River ( In Chinese ). *Wetland Science*, 2012, 10 ( 1 ) : 8—14
- [ 8 ] 高江, 华欧, 雷国, 等. 温度对土壤含水量、土壤类型及其相互作用对土壤碳矿化的影响. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21 ( 1 ) : 27—35
- [ 9 ] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1 ( 1 ) : 24—31  
Yu T, Tian G L. The application of thermal inertia method the monitoring of soil moisture of North China Plain based on NOAA-AVHRR data ( In Chinese ). *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 ( 1 ) : 24—31
- [ 10 ] 隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用. 遥感学报, 1997, 1 ( 3 ) : 220—224  
Sui H Z, Tian G L, Li F Q. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing ( In Chinese ). *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 ( 3 ) : 220—224
- [ 11 ] 夏虹, 武建军, 刘雅妮, 等. 中国用遥感方法进行干旱监测的研究进展. 遥感信息, 2005 ( 1 ) : 55—58  
Xia H, Wu J G, Liu Y N, et al. Satellite remote sensing of winter wheat seedtime and its application ( In Chinese ). *Remote Sensing Information*, 2005 ( 1 ) : 55—58
- [ 12 ] 孙丽, 陈焕伟, 赵立军, 等. 遥感监测旱情的研究进展. 农业环境科学学报, 2004, 23 ( 1 ) : 202—206  
Sun L, Chen H W, Zhao L J, et al. The advances of drought monitoring by remote sensing ( In Chinese ). *Journal of Agro-environmental Science*, 2004, 23 ( 1 ) : 202—206
- [ 13 ] 汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述. 土壤学报, 2007, 44 ( 1 ) : 157—163  
Wang X, Zhang Z X, Zhao X L, et al. Review of research on soil moisture monitoring by remote sensing ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 ( 1 ) : 157—163
- [ 14 ] Huete A, Didan K, Shimabukuro K, et al. Regional amazon basin and global analyses of MODIS vegetation indices: Early results and comparisons with AVHRR// Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. 2000: 88—103
- [ 15 ] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48 ( 2 ) : 119—126
- [ 16 ] 伍漫春, 丁建丽, 王高峰. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤水分反演. 中国沙漠, 2012, 32 ( 1 ) : 148—154  
Wu M C, Ding J L, Wang G F. Regional soil moisture inversion based on surface temperature and vegetation index characteristic spaces ( In Chinese ). *Journal of*

- [17] 冉琼, 张增祥, 张国平, 等. 温度植被干旱指数反演全土壤湿度的DEM订正. 中国水土保持科学, 2005, 3 (2): 32—36  
Ran Q, Zhang Z X, Zhang G P, et al. DEM correction using TVDI to evaluate soil moisture status in China (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3 (2): 32—36
- [18] 刘海隆, 王玲, 包安明. 基于遥感的天山山区地表温度与下垫面的关系研究. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29 (2): 224—229  
Liu H L, Wang L, Bao A M. The relationship between land surface temperature and underlying surface in Tianshan Mountains Region based on remote sensing (In Chinese). Journal of Shihezi University (Natural Science), 2011, 29 (2): 224—229
- [19] 柯灵红, 王正兴, 宋春桥, 等. 青藏高原东北部MODIS地表温度重建及其与气温对比分析. 高原气象, 2011, 30 (2): 277—287  
Ke L H, Wang Z X, Song C Q, et al. Reconstruction of MODIS Land surface temperature in northeast Qinghai-Xizang Plateau and its comparison with air temperature (In Chinese). Plateau Meteorology, 2011, 30 (2): 277—287
- [20] 乔平林, 张继贤, 林宗坚. 石羊河流域水质环境遥感监测评价研究. 国土资源遥感, 2003, 15 (4): 39—41  
Qiao P L, Zhang J X, Lin Z J. The application of remote sensing technique to monitoring and evaluating water pollution in the Shiyang River valley (In Chinese). Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 15 (4): 39—41
- [21] 丁建丽, 瞿娟, 孙永猛, 等. 基于MSAVI-WI特征空间的新疆渭干河—库车河流域绿洲土壤盐渍化研究. 地理研究, 2013, 32 (2): 223—232  
Ding J L, Qu J, Sun Y M, et al. The retrieval model of soil salinization information in arid region based on MSAVI-WI feature space: A case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa watershed (In Chinese). Geographical Research, 2013, 32 (2): 223—232
- [22] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment, 2002, 79 (2/3): 213—224
- [23] 卢建华. 基于直方图阈值法的遥感图像分割算法研究. 福州: 福建农林大学, 2013  
Lu J H. Research on remote sensing image segmentation algorithm based on histogram threshold method (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013
- [24] 吴晓东, 冯伍法, 张继领, 等. 基于多峰灰度直方图分割的遥感影像码头目标提取. 影像技术, 2016, 28 (2): 46—47  
Wu X D, Feng W F, Zhang J L, et al. Target extraction from remote sensing images based on multi peak histogram segmentation (In Chinese). Image Technology, 2016, 28 (2): 46—47
- [25] 宋春桥, 游松财, 刘高焕, 等. 基于TVDI的藏北地区土壤湿度空间格局. 地理科学进展, 2011, 30 (5): 569—576  
Song C Q, You S C, Liu G H, et al. The spatial pattern of soil moisture in northern Tibet based on TVDI method (In Chinese). Progress in Geography, 2011, 30 (5): 569—576
- [26] 鄂雪英, 丁建丽, 张喆, 等. 中亚土库曼斯坦典型绿洲荒漠化动态遥感监测. 自然灾害学报, 2014, 23 (2): 103—110  
Yan X Y, Ding J L, Zhang Z, et al. Dynamic remote sensing monitoring of desertification of a typical oasis in Turkmenistan of Central Asia (In Chinese). Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (2): 103—110
- [27] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2012, 18 (2): 417—427
- [28] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57 (2): 265—281
- [29] 宁婷, 郭忠升. 半干旱黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分循环特征. 生态学报, 2015, 35 (15): 5168—5174  
Ning T, Guo Z S. Characteristics of the soil water cycle in an abandoned sloping field in the semi-arid Loess Hilly Region (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (15): 5168—5174
- [30] 刘立文, 张吴平, 段永红, 等. TVDI模型的农业旱情时空变化遥感应用. 生态学报, 2014, 34 (13): 3704—3711  
Liu L W, Zhang W P, Duan Y H, et al. Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS data (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (13): 3704—3711
- [31] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeastern Australia. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12 (10): 2021—2044
- [32] 陈艳华, 张万昌. 植被类型对温度植被干旱指数(TVDI)的影响研究—黑河绿洲区为例. 遥感技术与

应用, 2007, 22(6): 700—706  
 Chen Y H, Zhang WC. Evaluating effects of vegetation types on temperature vegetation drought index ( TVDI ) in the Heihe Oasis Region ( In Chinese ). Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(6): 700—706

[33] 张喆, 丁建丽, 李鑫, 等. TVDI用于干旱区农业旱情监测的适宜性. 中国沙漠, 2015, 35(1): 220—227  
 Zhang Z, Ding J L, Li X, et al. Suitability of TVDI used to monitor agricultural drought in arid area ( In Chinese ). Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 220—227

## Spatial Variation and Inversion of Soil Moisture Based on Multi-Source Data

CAI Lianghong<sup>1, 2</sup> DING Jianli<sup>1, 2†</sup> WEI Yang<sup>1, 2</sup>

(1 College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

(2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China)

**Abstract** 【Objective】Soil moisture is a key variable in parameterization of a land surface. Soil moisture content varies spatially and temporally, and plays an important role in material and energy exchanges occurring in the earth-atmosphere interface. It is a basic indicator for prediction of crop growth and crop yield, and also an important parameter in the numerical weather prediction model that helps efficiently forecast improvement in the physics of land surface processes on regional or global scales. However, it is very difficult to obtain an accurate soil moisture parameter just through field measurement temporally and spatially, especially at large spatial scales. Remote sensing technology has widely been used in estimation of soil moisture contents for it features capability of observing a large area synchronously, timely and economically. In the present study, a total of 39 soil samples were collected from an oasis in the Weigan-Kuqa Delta, Xinjiang of China. 【Method】Temperature Vegetation Dryness Index ( TVDI ) is an important tool that can be used to reflect soil moisture regime through inversion. In this study DEM data were introduced to correct the data of land surface temperature ( Ts ) on the basis of the researches on TVDI in an attempt to mitigate the impact of undulation in land relief on secondary distribution of energy. The study area was divided into different land use types by threshold. Based on the synchronously field measured data, a piecewise inversion model was used to inverse soil moisture distribution in the delta oasis, and then spatial distribution pattern of soil moisture in the studied area and rules of its variation were further analyzed. 【Result】Results show as follows: (1) Based on TVDI, DEM was introduced for terrain correction. Comparing the data before and after the terrain correction demonstrates that Modified Soil-Adjusted Vegetation Index ( MSAVI ) and the determination coefficient of the field measured soil moisture content in the topsoil layer were higher after the correction than before the correction. After the correction,  $R^2$  rose from 0.44 to 0.53, and all were above the 0.01 significance level; (2) The soil moisture regime of the delta oasis reflected in the classification maps of TVDI demonstrates an apparent rule of spatial variation of soil moisture that on the whole, soil moisture declines from west to east and from north to south. Based on the variation coefficient of the mean soil moisture contents in the six soil layers of the 0~100 cm soil profiles different in land use type in the study area, soil moisture variation coefficient of the oasis and ecotone was 28% and 36%, respectively. From the distribution of the soil moisture variation coefficients of the soil layers in the soil moisture vertical variation coefficient map, it is discerned that the closer to the surface, the higher the variation coefficient, and that the vertical variation coefficient of soil moisture varied with land use type even in the same soil layers. However, the overall trend was quite similar, that is, it declines with soil depth; (3) By comparing the piecewise

inversion model with the original model in inversion, it is learnt that the determination coefficient between the measured soil moisture and that predicted using the piecewise model and original model was 0.72 and 0.64, with RMSE being 0.03 and 0.04, respectively. Obviously, the coefficient of determination increased by 0.08 and RMSE decreased by 0.01. 【Conclusion】 Based on all the above-described findings, it could be concluded as follows: (1) In this study, DEM elevation data were used for terrain correction of TVDI, and the corrected TVDI better reflected the soil moisture regime; (2) On the whole, soil moisture declines from west to east and from north to south, and remains quite consistent in the oasis, but varies drastically in the ecotone. Soil moisture vertical variation coefficient varied as a whole, showing a declining trend of a power function; (3) By comparing the piecewise inversion model and the original model in inversion, it is learnt that the piecewise inversion model should be used to invert soil moisture in soils different in land use, which may effectively supplement each other, thus improving accuracy of the inversion as a whole. It is, therefore, worthy of attention and application in researches on regional soil moisture regime.

**Key words** TVDI; Terrain correction; Soil moisture; Spatial pattern

(责任编辑: 檀满枝)