

基于 TVDI 的山地平原过渡带土壤水分反演 ——以绵竹市为例

王娟^{1,2}, 张优^{1,2}, 张杰^{1,2}, 彭文甫^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610068;

2. 四川师范大学 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068)

摘要: 为了对生态脆弱的西部山地平原过渡带进行土壤水分监测研究。以绵竹市为例, 利用 Landsat8 OLI/TIRS 影像, 获取了陆地表面温度(T_s)和归一化植被指数(NDVI), 通过温度植被干旱指数(TVDI)建立了土壤水分回归模型进行遥感水分反演, 并通过野外采样数据对结果进行精度验证。结果表明: TVDI 和土壤水分存在较强相关性($R=0.6553$), 能较好反映表层土壤湿度; 土壤水分整体分布状况表现为西北山地地区高于东南平原地区, 过渡带上山地向平原逐渐降低。因此, TVDI 能较好反映过渡带土壤水分时空差异, 对监测过渡带土壤干湿状况具有理论与现实意义。

关键词: 温度植被干旱指数; 土壤水分反演; 山地平原过渡带; 遥感与 GIS

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0151-06

Soil Moisture Inversion in Transitional Zone of Mountain Plain Based on Temperature Vegetation Drought Index Method —A Case Study of Mianzhu City

WANG Juan^{1,2}, ZHANG You^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, PENG Wenfu^{1,2}, Zhangwei^{1,2}

(1. Faculty of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China; 2. Key Lab of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

Abstract: In order to study the soil moisture monitoring in west China, specifically the ecologically-fragile mountain-plain transition zones (MPTZs), Mianzhu City, which is located in an MPTZ, was selected as the study area. Landsat 8 OLI/TIRS images were used to obtain the surface temperatures (T_s) and normalized difference vegetation index (NDVI). The temperature-vegetation drought index (TVDI) was established, which is a soil moisture regression model that serves as a monitoring index of soil moisture. The TVDI was used for remote sensing inversion of soil moisture, and the accuracy of the inversion results was verified through comparison with data acquired from field samples. The findings indicated that a strong correlation between the TVDI and soil moisture was significant ($R=0.6553$), which could better reflect moisture levels in the topsoil. The greater the TVDI value was, the drier the soil was, and vice versa. In terms of overall distribution, soil moisture levels were higher in the northwest mountainous areas and relatively lower in the southeastern plains. Correspondingly, soil moisture in the MPTZ gradually declined from the mountainous areas to the plains. The TVDI is able to better reflect the spatiotemporal variations of soil moisture in MPTZs and is of theoretical and practical significance for the monitoring of soil moisture conditions in this zone.

Keywords: temperature vegetation drought index; soil moisture retrieval; mountain plain transition zone; remote sensing and GIS

土壤水分进行遥感监测一直是国内外研究的重点, 土壤水分的时空分布研究对农业干旱监测和生态环境监测具有重大意义。杨曦等^[1]研究土壤干湿状

况作为监测土地状况的重要指标, 对监测土地干旱、土壤退化起着重大作用。

遥感监测具有大面积、宏观、实时和动态等优势,

近年来被广泛运用,如徐沛等^[2]对土壤水分遥感反演研究进展进行研究。20 世纪 70 年代初,Wanston 首次根据地表温度结合热惯量模型对土壤湿度进行反演。在此基础上,学者吴黎等^[3]利用 NOAA/AVHRR 计算土壤的有效水分和热惯量,证明二者具有很强的正相关关系,但此方法在影像获取方面存在较大困难,植被覆盖度也会影响土壤信息计算。王明霞等^[4]提出 20 世纪 90 年代 NOAA/AVHRR 和 MODIS 等数据普遍用于土壤水分反演,可见光、热红外波段和近红外波段用于遥感反演被广泛应用。Goetz^[5]研究不同分辨率影像(TM, SPOT 等),算出地表温度(T_s)、NDVI 斜率和土壤湿度之间的关系。Sandholt 等^[6]在此基础上,提出了温度植被干旱指数(TVDI)。在我国植被指数法被广泛应用,如:胡蝶等^[7]利用 Radar-sat-2/SAR 和 MODIS 数据,由估算的含水量(VWC)运用到模型中对黄土高原区进行土壤水分反演;蒋金豹等^[8]利用同期光学数据提取出归一化水分指数(NDWI)后,利用 water-cloud 模型构建后向散射数据库,分别用 HH 和 HV 极化方式构建土壤水分反演模型;徐小逊等^[9]利用 AMSR-E 数据和水分观测数据,构建 BP 神经网络模型,对川中丘陵区土壤水分进行反演。综合对比各个学者的研究,多数通过 MODIS/RADAR 数据进行,这些数据对土壤水分较为敏感但更适用于大范围地区,小范围区域遥感反演难以满足其精度需求,且研究区多以干旱半干旱的高原区或者干旱河谷流域为主,对山地平原过渡区这类特殊地形区的土壤水分反演较少。

本文选取 Landsat 8 OLI/TIRS,既满足 TVDI 的计算又满足土壤水分反演精度的需求。由于部分地区受地形影响,实地采样较困难,加上云层的影响,本文仅对绵竹大部分地区进行水分反演分析。通过计算 NDVI,对绵竹市的地表温度进行遥感反演,建立温度植被指数(T_s -NDVI)特征空间,确认特征空间的干湿边方程,建立土壤水分回归模型进而对绵竹市土壤水分进行反演,并利用野外同步采样实测数据对水分反演的结果进行精度验证。与众多学者用 MODIS/RADAR 数据通过 NDVI 或温度对成都平原进行土壤水分反演相比,本文在计算 NDVI 值基础上,加入温度植被干旱指数,在方法上对反演山地平原过渡带土壤水分更有效性和潜力。

1 研究区概况

绵竹市地处四川盆地西部,103°54′—104°20′E, 30°09′—31°42′N,全市面积 1 245.3 km²。境内地貌类型多样,地势西北高东南低,西北属龙门山脉,中间

过渡地带为丘陵和低山,东部为广阔的成都平原,属平原与山地过渡的典型区域。其中山地占全市总面积的 52.08%,平原面积占全市总面积的 47.92%。山区位于龙门山地震带,地质灾害较多,平原多为农耕区和建设用地。气候属亚热带湿润气候,常年温和,无霜期时间长,降水充沛;春季冷空气活动频繁,春夏季发生干旱的频率高,夏季雨水较多,冬夏气温差异不明显,年平均气温 15.7℃。多年年平均降水量大于 1 000 mm,年最大降水量与最少降水量相差 800 mm,降水季节分配差异较大。

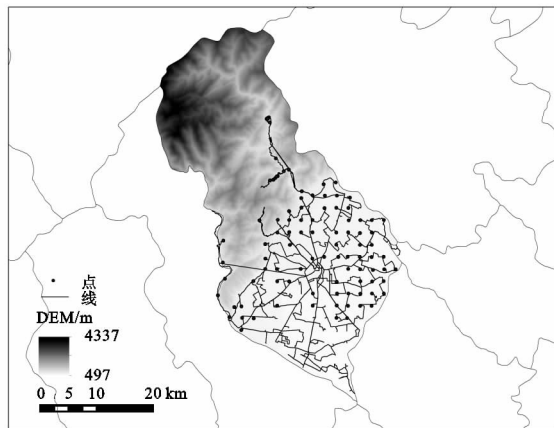


图 1 研究区位置及 DEM 及野外验证采样路线

2 试验材料与方法

2.1 数据来源及预处理

研究数据包括遥感数据、土壤采样数据和辅助数据。遥感数据为 2016 年 4 月 Landsat 8 OLI/TIRS 遥感影像,轨道号为 129/038,来源于中科院遥感与数字地球研究所(www.radi.ac.cn)。遥感数据均以高斯—克吕格投影和 WGS-84 坐标系为基准,以 1:5 万地形图对遥感影像进行几何校正,并运用 ENVI 5.0 对遥感影像进行辐射定标、FLAASH 大气校正等处理,对处理过的数据进行裁剪、土地利用分类及分类后处理。

基于 ArcGIS 10.0,在研究区行政区图上创建 2 km×2 km 的网格,并叠加土地利用类型图,在网格内部生成中心点即为每个采样点,添加经、纬度属性,制作土壤采样点位置图及经纬度信息表。2016 年 4—5 月野外采样时,在田间选取有代表性的新鲜土壤,避开位于建设用地、水域等采样点,按照预先设计的土壤采样位置图进行采样,采样深度约为 20 cm,并将其捏碎放入已知准确质量的铝盒中,对新鲜土壤进行称量,精确至 0.001 g。当天带回室内置于已预热至(105±2)℃的烘箱中烘烤 12 h 取出冷却至室温立即称重。每个样点应采样 3 次做平行测定。若第一次称重平行样之间误差过大则应进行二次烘干再次称重。

辅助数据包括研究区矢量边界数据、1:5 万地形图和 DEM 数据,均来源于西南教育部重点实验室,GPS 野外采样数据等。

2.2 NDVI 计算及异常值处理

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index)是植被生长状况、生物量及植被覆盖度的最佳指示因子^[10],其范围为-1~1,负值表示地面覆盖云、水、雪等,对可见光反射;0 表示岩石或裸土等,近红外波段和红光波段近似相等;正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。其计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中:NIR 为近红外波段处的反射率值;R 为红波段处的反射率值。由于经过大气校正后的结果有部分像元值为负,即 NDVI 值在 $[-1, 1]$ 之外存在异常值,为便于计算,将这部分像元的 NDVI 值的背景设为(0),参考前学者彭文甫等^[11]研究在 ENVI 5.0 上通过 Band Math: $(NDVI \text{ lt } -1) \times 0 + (NDVI \text{ gt } 1) \times 0 + (NDVI \text{ ge } -1 \text{ and } NDVI \text{ le } 1) \times NDVI$,得到去除异常值后的 NDVI 数据。

2.3 植被覆盖度计算

根据像元二分模型^[12-13]植被覆盖度计算公式为:

$$P_v = \frac{(S - S_{soil})}{(S_{veg} - S_{soil})} \quad (2)$$

式中: P_v 为植被覆盖度; S_{soil} 为纯裸土覆盖像元的遥感信息; S_{veg} 为纯植被覆盖像元的遥感信息。由于一个混合像元的 NDVI 值可以由植被覆盖部分的 NDVI_{veg}与裸土(无植被覆盖)部分的 NDVI_{soil}值组成^[14],因此可以将 NDVI 值代入公式(2)中计算植被覆盖度:

$$P_v = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (3)$$

式中:NDVI 为归一化植被指数;NDVI_{soil}为完全被裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值;NDVI_{veg}为纯植被像元的 NDVI 值。NDVI 值受到大气、地表状况、年份、季节和区域条件等的影响,NDVI_{soil},NDVI_{veg}随着空间和时间发生变化。本文统计 NDVI 值时,根据区域 NDVI 累计概率分布表,以 5%和 95%设置置信度区间,选取 5%和 95%附近的 NDVI 值分别作为 NDVI_{soil}(0.001 441),NDVI_{veg}(0.773 399)值。

2.4 地表温度反演

目前地表温度遥感反演的算法有:大气校正法、单窗算法、分裂窗算法。Landsat 8 TIRS 包括两个热红外波段,第 10 波段(10.60~11.19 μm)和第 11 波段(11.50~12.51 μm),TIRS 10 位于较低的大气吸收区,其大气透过率值高于 TIRS 11,更适合于单波段的地表温度反演;同时,美国地质调查局 USGS

(United States Geological Survey)指出由于 Landsat 8 TIRS 第 11 波段暂时存在定标不稳定性,不建议运用分裂窗算法进行定量研究。单窗算法与单通道算法的主要区别在于单窗算法所需的大气参数包括近地表气温和大气水分含量,而单通道算法所需的大气参数为大气水分含量。因此,本研究采用 Landsat 8 TIRS 第 10 波段和大气校正法反演地表温度。

大气校正法的计算方法:首先估计大气对地表热辐射的影响,然后把这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中减去,从而得到地表热辐射强度,再把这一热辐射强度转化为相应的地表温度。

2.4.1 地表比辐射率 首先,基于 ENVI 5.0 和 GIS 平台,采用人机交互解译方法,结合 GPS 野外实地考察数据,对 2016 年遥感数据进行分类,获取水体、自然表面(耕地、林地、草地、未利用地等)和城镇区(建设用地),总体分类精度大于 90%以上,Kappa 系数均大于 0.856 以上;其次,根据覃志豪等^[15]提出将地表分为水体、自然表面和城镇区,针对 3 种不同地表分别进行计算,以便得到更加准确的地表比辐射率数据:

水体像元比辐射率:

$$\epsilon_{water} = 0.995 \quad (4)$$

自然表面像元比辐射率:

$$\epsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614P_v - 0.0461P_v^2 \quad (5)$$

城镇区像元比辐射率:

$$\epsilon_{building} = 0.9589 + 0.086P_v - 0.0671P_v^2 \quad (6)$$

式中: P_v 为地表植被覆盖度。

2.4.2 黑体辐射亮度计算 通过 NASA 的网站查询(<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>),输入成像时间、中心温度、以及其他参数,得到以下大气剖面信息:大气在热红外波段的透过率 τ :0.76,大气向上辐射亮度 L_{\uparrow} :1.79 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$,大气向下辐射量辐射亮度 L_{\downarrow} :2.98 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$,根据黑体辐射亮度公式:

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \epsilon)L_{\downarrow}] / \tau\epsilon \quad (7)$$

式中: L_{λ} 为 Landsat 8 卫星传感器接收到的 Band10 热红外波段辐射亮度值。

2.4.3 地表温度计算 根据普朗克定律将热辐射强度值转换为相应的亮度温度,并将单位为 K 的亮度温度用摄氏温度(单位 $^{\circ}\text{C}$)表示,计算公式如下:

$$T_s = k_2 / \left[\ln \frac{k_1}{B(T_s)} + 1 \right] - 273.15 \quad (8)$$

式中: T_s 为地表温度($^{\circ}\text{C}$); k_1, k_2 为 TIRS 10 波段的参数亮温反演常数, $k_1 = 774.8853 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{sr})$, $k_2 = 1321.0789 \text{ K}$ 。

2.4.4 温度植被干旱指数(TVDI) Sandholt 等^[6]提出 T_s —NDVI 特征空间近似为三角形,提出温度—植被

干旱指数(TVDI)的概念。伍漫春等^[16]证明出地表温度 T_s 与NDVI存在明显的负相关关系。任意一个NDVI值对应一组 T_{smax} (干边)和 T_{smin} (湿边),因而 T_s —NDVI特征空间的拟合线可反映区域土壤水分含量状况。 T_s —NDVI特征空间计算的表达式为:

$$TVDI=\frac{(T_s-T_{smin})}{(T_{smax}-T_{smin})}\tag{9}$$

式中: T_{smax} 和 T_{smin} 分别表示当NDVI等于某一特定值时,地表温度的最大值和最小值; T_s 为任一像元地表温度。将 T_s —NDVI特征空间简化处理为三角形的同时,对 T_{smin} 和 T_{smax} 进行线性回归,回归方程为:

$$T_{smin}=a_1+b_1NDVI\tag{10}$$

$$T_{smax}=a_2+b_2NDVI\tag{11}$$

式中: a_1,a_2 为干、湿边方程的截距; b_1,b_2 为干、湿边方程斜率。将公式(10),(11)代入到(9)中可以得到TVDI的计算公式:

$$TVDI=\frac{T_s-(a_1+b_1NDVI)}{(a_2+b_2NDVI)-(a_1+b_1NDVI)}\tag{12}$$

TVDI的值随着地表温度 T_s 的升高而变大,土壤湿度随TVDI值增大而减小,因而土壤湿度与温度、TVDI值呈负相关关系。

3 结果与分析

3.1 NDVI 值及植被覆盖度计算

经过对NDVI值的异常值处理,根据公式(3)计算出研究区植被覆盖度空间分布(图2),结合研究区实际情况,参照温小乐等^[17]研究经验将植被覆盖度进行重分类,将 P_v 分为5个等级,从表1可以看出:研究区植被覆盖度处于较高水平,高、中高植被覆盖区面积占到研究区面积50%以上,西北以及中部地区植被覆盖度高于东南地区,并且由于研究区影像受到云层影响,在西北林地地区存在地低植被覆盖区、东南角耕地地区存在中低植被覆盖区的异常现象。

表 1 绵竹市植被覆盖度分布情况

植被覆盖度等级	各等级所占研究区面积比例/%
低植被覆盖度(0~0.2)	9.35
中低植被覆盖度(0.2~0.4)	12.14
中植被覆盖度(0.4~0.6)	24.83
中高植被覆盖度(0.6~0.8)	32.80
高植被覆盖度(0.8~1)	20.87

3.2 地表温度反演

研究区温度反演结果见图3。
(1)西北大部分地区存在终年积雪,加上西北山地区、东南角平原区有大面积厚云覆盖,这些区域温度在0℃以下,甚至在一10℃以下,出现温度异常的情况;西北角部分地区未被云层遮盖,在4—5月间,温度范围在0~10℃属正常范围。

(2)中部山地地区温度总体高于西北山地地区,大部分地区温度范围在10~20℃,土地利用类型多以林地为主,植被覆盖率高,部分地区因受到人类活动或者坡向、坡度的影响,温度高于20℃。

(3)东部平原地区,温度大多在20~30℃,这部分地区主要以耕地为主;平原中部地区,建设用地覆盖面积广,温度在30~35℃,为研究区主城区,根据城市热岛效应原理,温度比城市周围高;在城市中心,少部分地方温度高达35℃以上,根据实地验证考察,这些地方存在工厂分布,工业发展排放,导致这些地区温度较高。

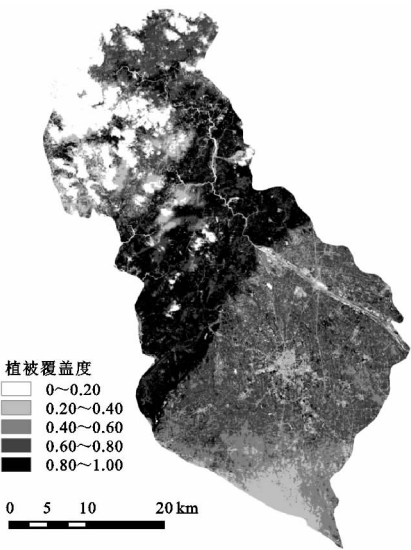


图 2 绵竹市植被覆盖度空间分布

综上,由平原到山地温度存在一个明显的下降过程,平原地区由于受海拔、植被覆盖度、人类活动等影响温度偏高,山地地区受人类活动影响较小,植被覆盖率较高,温度比平原地区相对低。

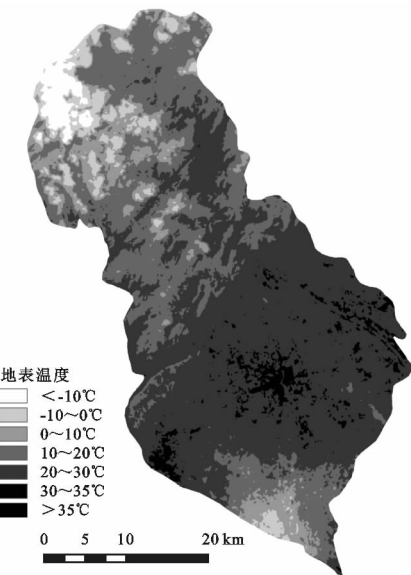


图 3 绵竹市地表温度分布

3.3 TVDI 计算

3.3.1 T_s —NDVI 特征空间的建立 通过 Excel 函数计算,设置 NDVI 步长值为 0.01,提取相同 NDVI 值对应的(温度) T_s 的最大值和最小值,构成 T_s —NDVI 特征空间的形状近似三角形(图 4),符合 Sandholt 提出的三角形特征空间描述。

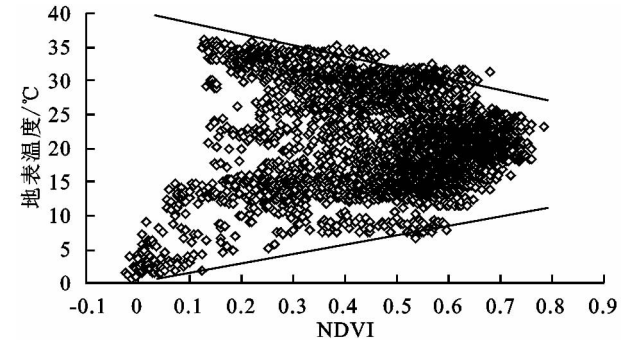


图 4 干湿边特征空间

3.3.2 特征空间干湿边的确定 NDVI 与地表温度近似呈线性关系,根据特征空间散点图,地表温度最大值 T_{Smax} 、最小值 T_{Smin} 的散点趋势大致都可以分为 3 段(图 4):在 $-0.05 \leq NDVI \leq 0.2$ 区间上, T_{Smax} 散点没有对应最大值,而 T_{Smin} 散点形成斜率为正的直线; $0.2 < NDVI \leq 0.6$ 区间上, T_{Smax} 散点、 T_{Smin} 散点均近似成一条水平直线,斜率几乎为 0;在 $0.6 < NDVI \leq 0.8$ 区间上, T_{Smax} 线性是斜率为负的直线, T_{Smin} 是斜率为正的直线。根据对 T_s —NDVI 特征空间的描述,干湿边的总体趋势是 T_{Smax} 随着 NDVI 值的增大而减小,相反的 T_{Smin} 随着 NDVI 值的增大而增大。因此对区间内符合 T_s —NDVI 特征空间的描述的点进行模拟(图 5)。

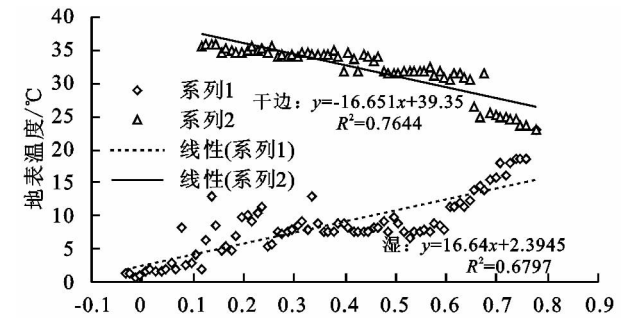


图 5 T_s —NDVI 特征空间干边、湿边方程

确定散点区间后,对 T_{Smax} 、 T_{Smin} 和 NDVI 分别作一元线性回归分析(图 5),确定干、湿边方程,并进行回归检验,在 0.05 的置信度水平上干边、湿边方程具有统计学意义,回归方程见表 2。

表 2 干湿边方程

边类型	干湿边方程	决定系数
干边	$y = -16.651x + 39.35$	0.7644
湿边	$y = 16.64x + 2.3945$	0.6797

3.4 土壤水分反演

3.4.1 TVDI 指数计算 求得干边、湿边方程的截距和斜率后,将地表土壤温度和 NDVI 值代入公式(9),求出绵竹市温度植被干旱指数(TVDI)空间分布数据(图 6)。

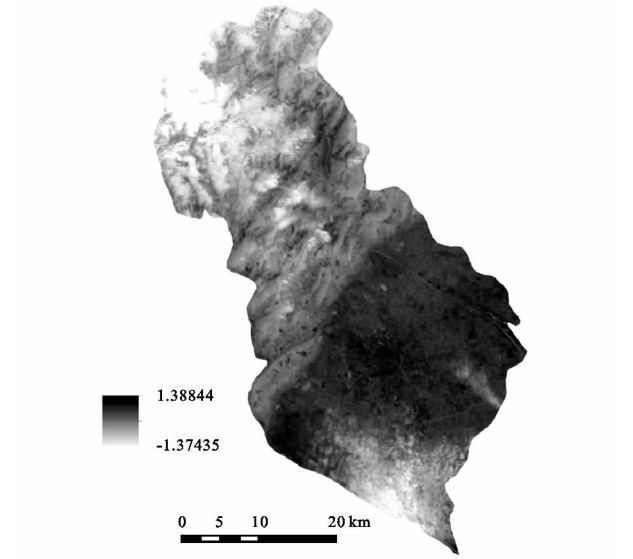


图 6 绵竹市 TVDI 分布

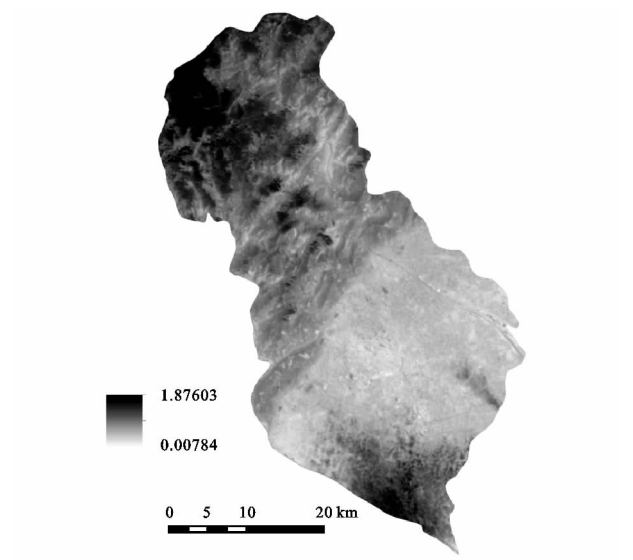


图 7 绵竹市土壤水分的空间分布

3.4.2 土壤水分回归模型 利用野外采样土壤水分数据与温度植被干旱指数(TVDI)建立一元线性回归方程模型,进行回归建模时(表 3),选取 50 个样点作为回归样点,并覆盖所有的土地利用类型。由表 3 可知,回归模型中 p 值都远小于 0.05,表示在 0.05 的置信度水平上 TVDI 指数与土壤水分有很强的负相关性,利用 TVDI 指数能够很好地反映研究区的土壤水分。

表 3 土壤水分 TVDI 回归方程

TVDI 回归方程	相关系数	决定系数	p 值
$y = -0.6762x + 0.9467$	0.6553	0.4294	0.000

3.4.3 土壤水分反演结果 将绵竹市的 TVDI 指数

代入到表 3 的一元线性回归方程中,得到 TVDI 值和土壤水分存在较强相关性($R^2=0.6553$),根据反演结果得到绵竹市土壤水分的空间分布图,由图 7 可知,土壤水分反演情况如下:

(1) 西北和东南角地区由于反演异常,水分含量出现异常,但西北山地地区,海拔高达到 4 000 m 以上,存在终年积雪的地方,水分含量较高;中部山地地区土壤水分含量整体较高,但部分地方受人类活动及地形原因影响比周围地区低。山地地区虽受人为影响小,但此区域属龙门山地震带,多山地灾害,滑坡、泥石流等,加上 2008 年地震对山地影响较大,植被破坏等不易恢复,对土壤水分流失造成一定影响;

(2) 东部平原地区土壤水分含量比西部山地地区低,对比土地利用类型图可看出:耕地地区的土壤水分含量比建设用地区高,土壤水分虽主要受海拔高度变化(497~4 337 m)、温度变化等影响,但绵竹市东南地区地属成都平原,多耕地和建设用地,受人为影响较大,对土壤水分产生较大影响。总体看来:平原向山地的过渡带上明显看出土壤水分的逐渐变化过程。

需要说明,所用影像时间为 4 月,多厚云,尤其东南角和西北部分地区,经不同年份同时期影像替换,但因光学遥感存在色差无法找到合适的替代影像,因此反演区域选取在绵竹市大部分地区,西北和东南地区反演结果存在异常。

3.5 精度验证

用未参与建模的 37 个实测数据样点对 TVDI 回归模型反演,对绵竹市土壤水分进行精度验证以及回归检验(表 4)。土壤水分反演精度(RMSE)为 9.65%,且 p 值远小于 0.05,反演的土壤水分精度相对较高。说明处于山地平原过渡带的典型区域的绵竹市,通过 NDVI 和温度建立 T_s —NDVI 特征空间进行土壤水分反演是可行的。

表 4 绵竹市土壤水分精度验证

相关系数	决定系数	RMSE/%	p 值
0.7620	0.5807	9.65	0.0013

4 结论

(1) 采用 Landsat 8 影像对温度进行反演与其他学者使用 MODIS 数据对温度信息进行直接获取不同,MODIS 数据具有更新快、范围广等特点,但对于研究区这种小区域范围进行温度的反演,Landsat 8 OLI/TIRS 影像使用更简单易操作。

(2) 通过回归模型构建温度植被干旱指数(TVDI)进行土壤水分反演,得出 TVDI 和土壤水分存在较强相关性,与很多学者研究得出的结论相同^[18-22]。研究

区多由林地和耕地组成,植被覆盖度较高,文章在计算植被覆盖率的基础上,通过干旱植被指数法进行水分反演,并使用野外实地采样数据进行验证,在成都平原地区甚至四川省内都很少。结果表明:TVDI 值越大说明土壤越干旱,相反土壤水分越充足,其指数值就越小;明显看出由平原向山地过渡,温度逐渐降低,土壤表层水分也由山地向平原逐渐减少。

(3) 绵竹市处于山地平原过渡带的特殊地形,境内海拔在 497~4 337m,由山地向平原过渡区高差分明显,植被覆盖度较高,对绵竹市进行土壤水分进行反演,有助于观测由平原向山地、由耕地到林地过渡带水分变化,对农业土地水分监测和生态环境监测具有重大意义。在 GIS 技术的支持下,利用 Landsat 8 OLI/TIRS 数据,采用温度植被干旱指数 TVDI 对地形复杂、植被覆盖较高的山地平原过渡带进行土壤水分反演是具有可行性的。

(4) 不足之处:温度是构成 TVDI 的重要因素,而范辽生等^[21]提出高程的变化是影响温度的重要条件。本文以山地平原过渡带为研究区,境内高程变化较大(497~4 337 m),因此还应该考虑高程对温度变化的影响,利用高程对 TVDI 进行校正。

参考文献:

[1] 杨曦,武建军,闫峰,等. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报,2009,29(3): 1205-1216.

[2] 徐沛,张超. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 林业资源管理,2015(4):151-156.

[3] 吴黎,张有智. 改进的表观热惯量法反演土壤含水量[J]. 国土资源遥感,2013,25(1):44-48.

[4] 王明霞,毋兆鹏. 遥感监测土壤湿度综述[J]. 干旱环境监测,2013(4):163-168.

[5] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1):71-94.

[6] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(23):213-224.

[7] 胡蝶,郭锐,沙莎,等. Radarsat-2/SAR 和 MODIS 数据联合反演黄土高原地区植被覆盖下土壤水分研究[J]. 遥感技术与应用,2015,30(5):860-867.

[8] 蒋金豹,张玲,崔希民,等. 植被覆盖区土壤水分反演研究:以北京市为例[J]. 国土资源遥感,2014,26(2):27-32.

[9] 徐小逊,张萍,徐精文,等. 基于被动微波遥感和 BP 神经网络的土壤水分反演研究:以川中丘陵区为例[J]. 西南农业学报,2014,27(6):2478-2484.

- Saskatchewan[J]. *Applied Geography*, 2003, 23(4): 261-279.
- [3] Imeson A C, Kwaad F J P M. Gully types and gully prediction[J]. *Geografisch Tijdschrift*, 1980, 14(5): 430-441.
- [4] 吴志峰,王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 31-35.
- [5] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 175-180.
- [6] 邓羽松,李双喜,丁树文,等. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 63-70.
- [7] 邓羽松,夏栋,蔡崇法,等. 基于分形理论模拟花岗岩崩岗剖面土壤水分特征曲线[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 1-8.
- [8] 陈晓安,杨洁,熊永,等. 红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(10): 1175-1181.
- [9] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 53-56.
- [10] 王秋霞,丁树文,夏栋,等. 花岗岩崩岗区不同层次土壤分离速率定量研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 65-70.
- [11] 郝福星,黄炎和,林金石,等. 指纹法研究花岗岩区典型崩岗小流域悬浮泥沙来源[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 45-102.
- [12] 刘希林,张大林,贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 802-811.
- [13] 李思平. 崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 29-35.
- [14] 王彦华,谢先德,王春云. 广东花岗岩风化剖面的物性特征[J]. *热带地理*, 2000, 20(4): 256-260.
- [15] 魏多落. 南方花岗岩区崩岗剖面特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [16] 夏振刚,邓羽松,赵媛,等. 鄂东南花岗岩崩岗岩土抗剪强度与含水量的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(6): 26-34.
- [17] 张晓明,丁树文,蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 241-245.
- [18] 陈晓安. 崩岗侵蚀区土壤物理性质分层差异及其对崩岗发育的影响[J]. *中国水土保持*, 2015(12): 71-72.
- [19] Nesbitt H W, Young G M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [20] 胡梦珩,杨爱丽,张文丽. 常量元素氧化物含量及其比值揭示的中晚全新世以来玛曲高原的环境演变[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 313-320.
- [21] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J]. *地理学报*, 2017, 72(2): 279-291.
- [22] 张玉芬,邵磊,熊德强. “巫山黄土”元素地球化学特征及成因和物源意义[J]. *沉积学报*, 2014, 32(1): 78-84.

~~~~~

(上接第 156 页)

- [10] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 彭文甫,王广杰,周介铭,等. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J]. *生态学报*, 2016(7): 1975-1988.
- [12] 张丽,何晓旭,魏鸣. 基于 NDVI 的淮河流域植被覆盖度动态变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2012(S1): 51-56.
- [13] 汪明冲,王兮之,梁钊雄,等. 喀斯特与非喀斯特区域植被覆盖变化景观分析: 以广西壮族自治区河池市为例[J]. *生态学报*, 2014(12): 3435-3443.
- [14] 陈晋,陈云浩,何春阳,等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J]. *遥感学报*, 2001(6): 416-422, 481.
- [15] 覃志豪,李文娟,徐斌,等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. *国土资源遥感*, 2004, 16(3): 28-32.
- [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[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(1): 148-154.
- [17] 温小乐,姜兴强,徐涵秋. 基于 TM 影像的长乐市植被覆盖度变化研究[J]. *遥感信息*, 2013(6): 56-61.
- [18] 丁凤,徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与试验分析[J]. *地球信息科学*, 2006(3): 125-135.
- [19] 虞文丹,张友静,陈立文,等. 基于 TVDI 与气象因子的土壤含水量估算[J]. *地理空间信息*, 2015, 13(1): 137-139.
- [20] 王家强,梁继业,李志军,等. 利用植被指数—地表温度特征空间反演干旱区土壤干湿状况[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 39-46.
- [21] 范辽生,姜纪红,盛晖,等. 利用温度植被干旱指数(TVDI)方法反演杭州伏旱期土壤水分[J]. *中国农业气象*, 2009(2): 230-234.