

# 土地利用数据在 TVDI 干旱监测方法中的应用研究 ——以甘肃省河东地区为例

沙莎, 王莺, 王丽娟, 蝴蝶

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候与减灾重点实验室, 兰州 730020)

**摘要:**温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)因其物理意义明确而被广泛应用。然而不同土地利用类型的植被指数(VI)、陆地表面温度(LST)存在一定的差别,这种差别可能在利用 TVDI 监测干旱时带来一定的影响。以甘肃省河东地区为例,探讨了 TVDI 方法在研究区的适用性及土地利用类型对 TVDI 指数监测干旱的影响。结果表明:(1) TVDI 对河东地区的庆阳、平凉、临夏、定西北部、甘南等地土壤相对湿度(RSM)有一定的指示作用,但对定西市南部地区、陇南地区、天水市的指示相对较差;(2) 用不同土地利用类型的遥感数据建立的特征空间,能够提高 TVDI 对 RSM 指示的准确性和合理性。一方面,农地类型的 TVDI 值有所下降而林地、草地类型的 TVDI 值有所升高,这在陇东及甘南局部地区取得较好的改进作用;另一方面,历史 TVDI 各区间站次统计表明,经过土地利用类型数据的改进,TVDI 值的分布范围得以扩大,从 0.5~0.9 扩大为 0.2~0.9,这与实际 RSM 的分布特征有更好的对应,有利于区分不同干旱等级的 RSM。

**关键词:** TVDI; 长序列 MODIS; 土地利用类型; 干旱监测; 甘肃省

**中图分类号:** TP79; P426.616

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)05-0375-07

## Research of Application of Land Use Data to TVDI Method on Drought Monitoring in the Eastern Region of Gansu

SHA Sha, WANG Ying, WANG Lijuan, HU Die

(Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Clear principle and concise physical meanings make Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) be a widely used method to monitor drought. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) would not be the same on different land use types, and the difference would affect the drought monitoring by using TVDI method. Taking the eastern region of Gansu as an example, TVDI was calculated based on history MODIS data, and improvement of TVDI for different land use types was discussed. The results are as follows. (1) On the whole, TVDI had the indication to the relative soil moisture (RSM) in Qingyang, Pingliang, Linxia, the north of Dingxi and Gannan. However, TVDI could not indicate the RSM well in the south of Dingxi, the southern region of Gansu and Tianshui. (2) Feature space was built on different land types, which was more precise and reasonable for indicating the RSM. On the one hand, the monitor ability of TVDI for RSM status was improved in the east of Gansu and some parts of Gannan because of TVDI decreasing for farmland type and increasing for woodland and meadow land type. On the other hand, the distribution of TVDI, which did not consider the land types, was more centralized than RSM. By contrast, the distribution can be broadened by taking land type into account feature space, and it is helpful for distinguish RSM of different drought grades.

**Keywords:** TVDI; history MODIS data; land using type; drought monitoring; Gansu Province

收稿日期: 2016-07-08

修回日期: 2016-08-17

**资助项目:** 甘肃省气象局科研项目(2015-13); 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-5); 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201006023); 科技部农业科技成果转化资金项目(2011GB24160005); 中国气象局兰州干旱气象研究所 2013 年基本科研业务费(KYYWF201318)

**第一作者:** 沙莎(1985—), 女, 辽宁沈阳人, 助理研究员, 硕士, 主要从事 GIS、遥感的气象应用研究。E-mail: nuist\_shasha@126.com

干旱灾害<sup>[1]</sup>常带来十分严重的经济损失<sup>[2]</sup>,还会促使生态环境进一步恶化<sup>[3-5]</sup>。IPCC 在其系列评估报告中指出,在全球气候变暖背景下未来干旱风险有不断增加的趋势<sup>[6-7]</sup>。提供准确、大范围的干旱监测信息对农业生产实践、政府部门制定相关决策具有重要的指导意义。传统的干旱监测手段是基于单点的,难以实现空间大范围连续的监测。遥感作为干旱监测的一种重要手段,具有覆盖范围广、空间分辨率高、重访周期短和数据获取快捷方便等优点,利用遥感方法进行大范围旱情动态监测具有一定的优势,近 30 多年来被广泛应用于全球或区域干旱监测中<sup>[8]</sup>。其中利用光学遥感手段监测干旱的方法包括植被指数法、地表温度法、特征空间法等。植被指数法表现出一定的滞后性,地表温度法受土壤背景和植被覆盖的影响大。特征空间法将植被指数、地表温度结合起来,能部分消除单独使用植被指数或地表温度的缺点,在区域的土壤水分或者干旱监测中被广泛使用<sup>[9-14]</sup>。温度植被干旱指数<sup>[15-17]</sup> (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 是这类方法中较常用的指数。张喆等<sup>[18]</sup>分别利用 NDVI 和 RVI 构建特征空间,讨论了 TVDI 指数在新疆塔里木盆地北缘渭干河—库车河三角洲绿洲的适用性。王海等<sup>[19]</sup>利用 TVDI 指数分析了 2009/2010 年云南大旱的时空分布特征。拉珍等<sup>[20]</sup>认为 TVDI 指数作为高原地区大范围干旱监测模型具有一定的科学性和参考性。然而农地土地利用类型的植被指数(VI)、陆地表面温度(LST)较其他土地类型往往偏低、偏高。在特征空间中具有相同的 NDVI 时, LST 较高意味 TVDI 值较高,这意味着几种土地利用类型具有相同的 NDVI 时, LST 越高的农地 TVDI 值越高。相较其他土地类型,有可能农地类型的 TVDI 总是高的,不能正确地指示土壤水分状况,而当使用较低分辨率时,这种情况可能更为突出。因此本文以甘肃省河东地区为例对比分析应用土地利用类型前后两种 TVDI 指数的差异,探讨土地利用类型对 TVDI 指数的影响和改进作用及 TVDI 指数在河东地区的适用性。

## 1 研究区概况

甘肃河东地区(100.73°—108.73°E, 32.52°—37.30°N)是黄土高原和青藏高原的汇集区,主要包括农地、草地、林地 6 种土地利用类型,见图 1。该区地处内陆,地形复杂,地势大致由西北向东南降低,海拔 600~4 828 m,由甘南高原、陇南山地和中部的黄

土高原与丘陵地貌组成。除甘南草原为高寒湿润气候外,其他地区均属于季风气候,光照充足,太阳辐射强,昼夜温差大,降水少,雨热同期。由于东西、南北跨度大,加之地形起伏剧烈,气候的纬向地带性和垂直地带性明显<sup>[21]</sup>。

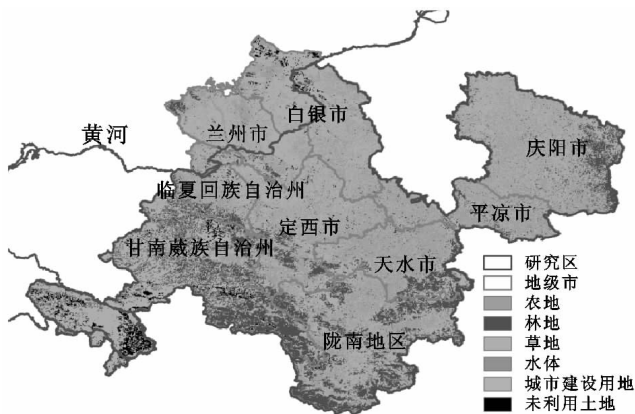


图 1 甘肃省河东地区土地利用类型

## 2 数据与方法

### 2.1 数据及其处理

使用的数据包括:(1) 2000 年 3 月至 2012 年 12 月逐月 MODIS Climate Modeling Grid (CMG) 增强型植被指数 (EVI, Enhanced Vegetation Index) (MOD13C2) 和陆地表面温度 (LST, Land Surface Temperature) (MOD11C3) 产品数据,空间分辨率为 0.05°。用 MRT (MODIS Reproject Tool) 和 Erdas 等工具分别提取 MOD11 C3 中的白天 LST、质量信息及 MOD13 C2 中的 EVI、质量信息,用 ArcGIS Python 编程实现甘肃省河东地区 EVI、LST、质量信息的截取及质量控制工作。为了实现与站点土壤相对湿度数据的对比分析,在各影像上提取站点的 EVI、LST 进行相关计算和分析;(2) 土壤相对湿度 (RSM) 数据为甘肃省河东地区 2003—2012 年 6 月 10 cm 逢 8 观测的土壤相对湿度数据。以 3 旬的平均值作为月 RSM 数据,与遥感数据的时间尺度相对应;(3) 土地利用类型数据源自中国土地利用数据 NLCD2000,分辨率为 1 000 m,为与遥感数据空间尺度一致,重采样为 5 km 的分辨率。

### 2.2 TVDI 指数

Sandholt<sup>[15]</sup>等认为 LST-NDVI 的特征空间中有一系列土壤湿度等值线,这些等值线是由不同水分条件下 LST 与 NDVI 的比值构成的, Sandholt 等据此提出了温度植被旱情指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) (图 2) 的概念:

$$TVDI = \frac{(LST - LST_{min})}{(LST_{max} - LST_{min})} \quad (1)$$
$$LST_{min} = a_1 + b_1 NDVI, LST_{max} = a_2 + b_2 NDVI \quad (2)$$

式中:  $LST$  为任意像元的地表温度;  $LST_{min}$  和  $LST_{max}$  分别为一定  $NDVI$  值对应的最低和最高地表温度, 可以通过线性回归分析提取干湿边来确定,  $a_1, b_1, a_2, b_2$  为待定系数。  $TVDI$  值在  $[0, 1]$  之间, 值越大越靠近干边, 表示土壤湿度越小, 反之表示土壤湿度越大。

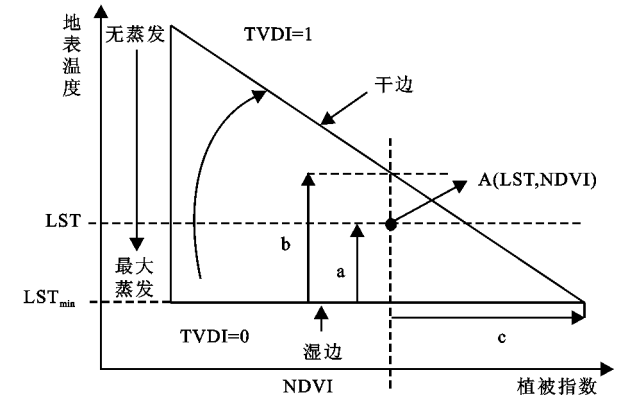


图 2 TVDI 特征空间原理示意图(改绘自 Sandholt 等<sup>[15]</sup>)  
MODIS 遥感资料已经积累了 14 a 的历史数据,

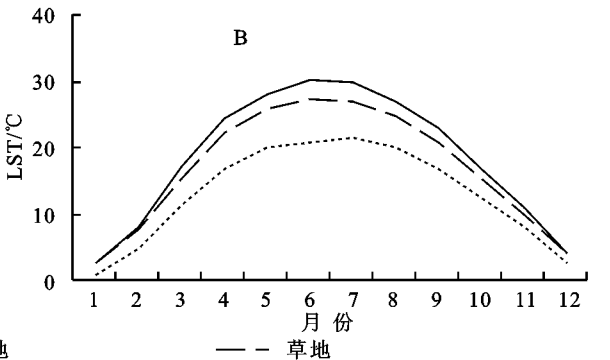
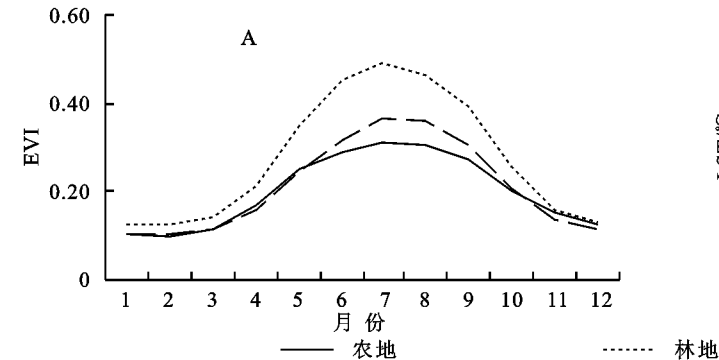


图 3 不同土地利用类型年均 EVI、LST 的逐月变化

3 结果与分析

3.1 干、湿边的拟合

图 4 给出不分土地类型及农地、林地和草地土地利用类型的特征空间, 可以看出, 干边上  $LST$  均随  $EVI$  增加而显著下降, 农地和草地干边下降趋势相近, 林地相对较缓, 但农地和草地的干边明显高于林地; 与理论特征空间有所不同, 不分土地类型及农地、林地、草地类型湿边上  $LST$  均随  $EVI$  先减小后增大, 其中农地  $EVI$  转折点处于 0.3 附近, 其他则处于 0.2 附近, 农地的湿边明显高于林地和草地。湿边上  $LST$  出现转折的现象是由于  $EVI$  两端像元数量少造成的, 如果要提高湿边拟合程度, 建立特征空间时需将前端部分  $EVI$  去除。为了讨论土地利用类型对特征空间的影响, 本文建立全部土地类型及分土地类型

以往研究大多以单次遥感数据建立特征空间, 而基于历史数据建立的特征空间可包含该地区历史状况, 一定程度上能够消除单次 TVDI 模型在时间序列上不具可比性<sup>[22]</sup> 的缺点。因此本文利用历史遥感数据来构建特征空间。另外, 张顺谦<sup>[23]</sup>、卢远<sup>[24]</sup>、杨曦<sup>[25]</sup>、闫娜<sup>[26]</sup> 等的研究表明, 用  $EVI$  取代  $NDVI$  可降低  $NDVI$  易于饱和而对  $TVDI$  的影响, 由  $EVI-LST$  构建的  $TVDI$  更具优势。因此本文利用  $EVI, LST$  构建了  $LST-EVI$  特征空间。甘肃省河东地区主要土地利用类型为农地、草地、林地, 图 3 给出了甘肃省不同土地利用类型年均  $EVI$  和  $LST$  的逐月变化, 可以看到,  $EVI$  和  $LST$  均呈现单峰型, 7 月  $EVI$  和  $LST$  均达到峰值, 其中林地  $EVI(LST)$  始终最高(低), 农地  $EVI(LST)$  始终最低(高), 草地处于中间。这种差距在 4—9 月尤其显著。对应在特征空间中, 农地相对于林地类型总处于  $EVI$  较低而  $LST$  较高的位置, 即干旱的位置, 这可能极大影响了  $TVDI$  监测干旱的准确性。结合数据的完整性及逐月  $EVI, LST$  的变化特征, 本文以 6 月为例讨论土地利用类型对  $TVDI$  指数的改进作用。

的特征空间, 干湿边拟合结果见表 1。

3.2 土地利用类型对 TVDI 指数的改进作用

3.2.1 对 TVDI 分布特征的改进 利用表 1 所示的干、湿边方程, 分别计算 2003—2012 年 6 月不分土地利用类型及分土地利用类型的  $TVDI$  指数(以下分别简称为  $TVDI_N, TVDI_L$ ), 并逐年统计  $TVDI_N, TVDI_L$  与  $RSM$  的相关系数(表 2)。结果表明近 10 a 来除 2010 年外  $TVDI_N$  与  $RSM$  普遍显著相关,  $TVDI_L$  与  $RSM$  的相关性略差, 在 2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年、2012 年与  $RSM$  显著相关。虽然  $TVDI_N$  与  $RSM$  的相关性高, 但  $TVDI_N$  与  $RSM, TVDI_L$  与  $RSM$  的散点图(图 5)显示出  $TVDI_N$  的分布过于集中, 这与  $TVDI$  的定义不甚相符。  $RSM$  低于 60% 指示有干旱发生, 一般  $TVDI$  值大于 0.6 指示有干旱发生。这 10 a 间  $RSM$  指示大致有 59% 左右站点发生

了不同程度的干旱,而 TVDI<sub>N</sub> 却有 95% 左右站点的 TVDI 值都大于 0.6,而考虑土地利用类型后约有

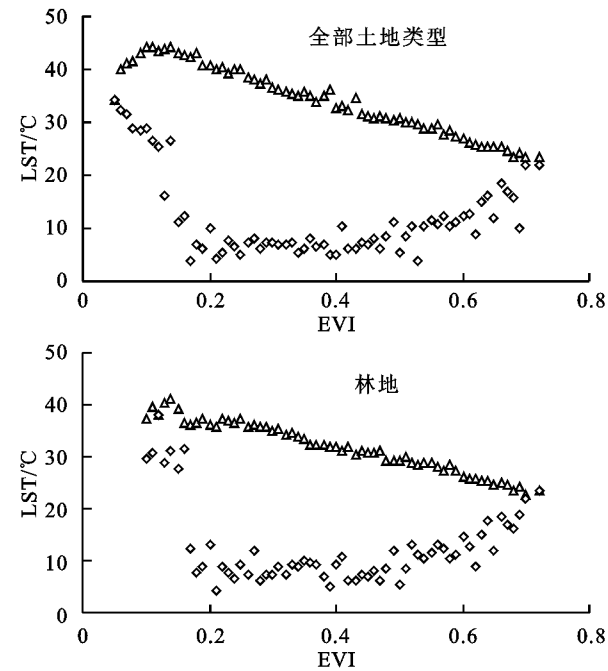


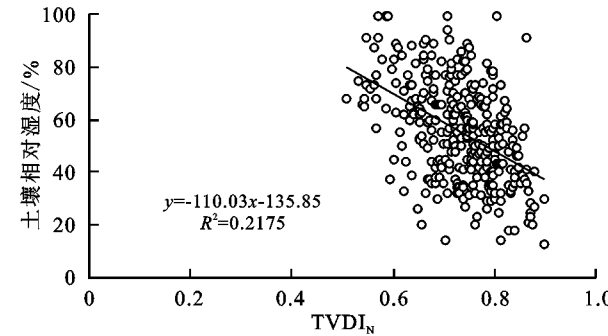
图 4 甘肃省河东地区 6 月不同土地利用类型的特征空间

土地利用类型	干边	湿边
农地	$y=-34.927x+49.89, R^2=0.9586$	$y=-20.779x+28.282, R^2=0.4862$
林地	$y=-27.83x+44.977, R^2=0.9713$	$y=-7.8928x+16.031, R^2=0.0338$
草地	$y=-35.016x+49.369, R^2=0.9729$	$y=-6.113x+15.208, R^2=0.0269$
全部	$y=-31.622x+46.175, R^2=0.9289$	$y=-11.243x+16.299, R^2=0.0765$

表 1 甘肃省河东地区 6 月不同土地利用类型干湿边拟合方程

表 2 2003—2012 年 TVDI <sub>N</sub> , TVDI <sub>L</sub> 与 RSM 的相关系数										
项目	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
TVDI <sub>N</sub> 与 RSM	-0.33*	-0.39*	-0.56*	-0.70*	-0.34*	-0.49*	-0.39*	-0.21	-0.50*	-0.59*
TVDI <sub>L</sub> 与 RSM	-0.28	-0.19	-0.44*	-0.59*	-0.30*	-0.56*	-0.38*	-0.03	-0.28	-0.44*

注: \* 表示相关性通过了  $\alpha=0.1$  的显著性水平。



分别统计 2003—2012 年 6 月 10 cm 土壤相对湿度(RSM)以 10% 为间隔区间的出现站次及 2 种 TVDI 值以 0.1 为间隔区间的出现站次,结果见图 6。从图 6A 中可以看到,10 cm RSM 分布于 10%~100%,其中重旱、中—轻旱、不早<sup>[27]</sup> 站次分别占到

60% 的站点 TVDI 值大于 0.6,显然 TVDI<sub>N</sub> 值存在不合理性,不利于干旱等级的划分。

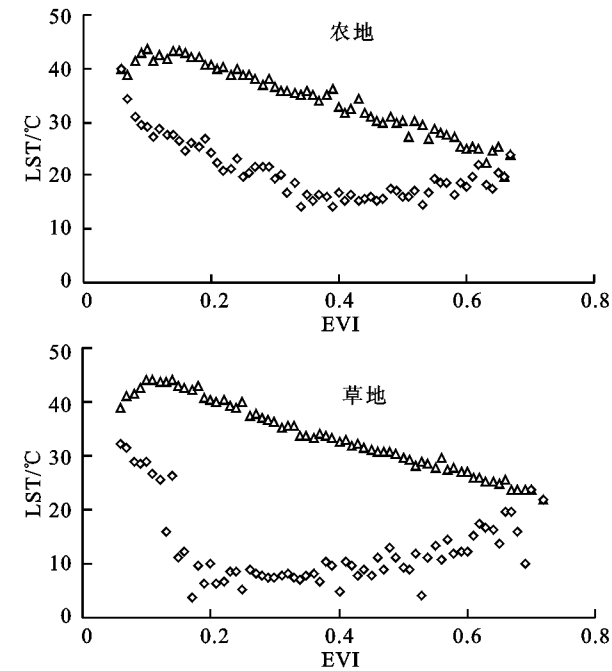


图 5 2003—2012 年 TVDI<sub>N</sub>, TVDI<sub>L</sub> 与 RSM 的散点图

25.57%, 35.92%, 38.52%。图 6B 为 TVDI<sub>L</sub> 在不同区间的频次,它分布于 0.2~0.9,集中于 0.6~0.8,其中 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8, 0.8~1.0 分别占 4.21%, 31.07%, 52.75%, 11.97%。图 6C 为 TVDI<sub>N</sub> 在不同区间的站次,分布于 0.5~0.9,其

中 0.7~0.8 占到 46.93%,  $TVDI_N$  较  $TVDI_L$  分布得更加集中。根据 TVDI 的定义, TVDI 值越接近 0 土壤湿度越接近 100%, 相反, TVDI 值越接近 1 土壤湿度越接近 0。TVDI<sub>N</sub> 值过于集中, 这与观测的 RSM

在 10%~100% 之间的实情不甚符合且不能很好地区分各等级的土壤湿度。而  $TVDI_L$  通过考虑土地利用类型, 从而使  $TVDI_N$  分布过于集中的缺点得到一定程度的修正, 这使 TVDI 值趋于合理化。

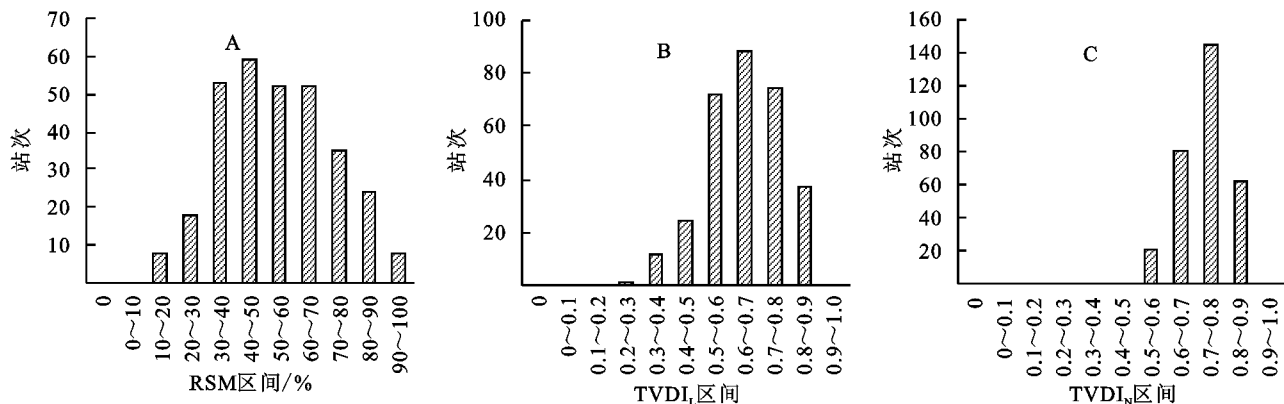


图6 2003—2012年6月份 RSM,  $TVDI_L$ ,  $TVDI_N$  不同区间站次统计

3.2.2 对空间分布特征的改进 图7给出了  $TVDI_N$ ,  $TVDI_L$  与同期土壤相对湿度的空间分布。从图7可以看出, 2007年庆阳市的镇原、西峰镇、华池、宁县4站和2008年宁县站的 RSM 均在 60%~80%, 属正常范围, 其余年份均出现不同程度的旱情, 其中2004年、2005年、2006年、2011年旱情较重;  $TVDI_N$  显示庆阳市近 10 a 均呈现不同程度的干旱, 未能显示出 2007年、2008年土壤水分正常的实情, 而  $TVDI_L$  则给出了较准确的指示。在平凉地区,  $TVDI_N$  显示大部分年份均有旱情, 而实际上仅 2006年在泾川、2009年在泾川和静宁、2011年、2012年在平凉和泾川出现了重旱,  $TVDI_N$  所指示的旱情在范围和强度上均比实际情况偏大、偏强, 与之相比  $TVDI_L$  则能显示出站点间旱与不旱的差别。在临夏和甘南地区, 永靖县除 2006年、2007年外主要呈现重旱, 临夏及和政 2009年、2011年、2012年出现轻旱外, 其他站点 RSM 均是正常或偏湿的情况, 2种 TVDI 均与之有较好的对应, 但个别地区  $TVDI_N$  值偏低。除 2007年、2008年外, 白银南部、定西北部天水北部近 10 a 主要以中—重旱为主, 2种 TVDI 对其有一定的指示,  $TVDI_L$  几乎未对天水地区的 RSM 做出准确指示, 2种 TVDI 均未指示出定西南部地区 2009年、2010年的旱情。陇南地区 2005年、2006年、2008年出现较大范围轻—重旱的旱情, 2种 TVDI 均有所指示, 但在其他正常偏湿的年份如 2003年、2004年、2007年 2种 TVDI 值也偏高, 与实际有所出入。

总的来说, TVDI 对河东地区的庆阳、平凉、临夏、定西北部和甘南等地的 RSM 有一定的指示作用, 但对定西南部、陇南、天水的指示相对较差, 土地

利用数据主要在陇东地区起到了较好的改进作用。通过分析甘肃省河东地区的数字高程模型 (DEM) 数据发现, 定西南部、陇南、天水南部地区地形坡度较大 (超过 20°), 而河东的北部地区坡度相对较小、地势平坦, 这可能是 TVDI 指数对定西南部、陇东、天水等地指示作用相对较差的重要原因。

### 3.3 不同土地类型上两种 TVDI 的比较

表3给出 2003—2012年不同土地利用类型  $TVDI_L$  与  $TVDI_N$  的差值, 若其差值为负值则说明 TVDI 值变小, 即相对远离了干边, “干旱”程度减弱, 若差值为正则正好相反即“干旱”程度增强。可以看到,  $TVDI_L$  经过土地利用类型调整后, 农地类型的 TVDI 值有所下降, 平均下降 0.116; 林地和草地类型的 TVDI 有所升高, 分别平均升高 0.108, 0.088。从空间上看, TVDI 值的下降主要在庆阳、平凉、白银和天水大部分地区, TVDI 值的上升主要在甘南绝大部分地区及陇南大部分地区。通过 2003—2012年 2种 TVDI 与 RSM 的对比分析发现, 庆阳、平凉市  $TVDI_L$  值下降提高了对 RSM 的指示作用, 而天水、定西地区下降的  $TVDI_L$  值反而降低了 TVDI 对 RSM 的指示性。甘南地区 RSM 主要以正常为主,  $TVDI_N$  值在该地区局部区域接近 0 甚至 < 0, 表明土壤相当湿润, 通过土地利用类型调整后上升至 0.2~0.3, 这使  $TVDI_L$  对 RSM 的指示更加合理; 陇南地区  $TVDI_N$  和  $TVDI_L$  对 RSM 均没有很好的指示。综上所述, 经过土地利用类型的改进, 陇东地区农地土地利用类型的  $TVDI_L$  值有所下降, 甘南地区林地、草地土地利用类型的  $TVDI_L$  有所上升, 这使其对 RSM 的指示更加准确、合理。

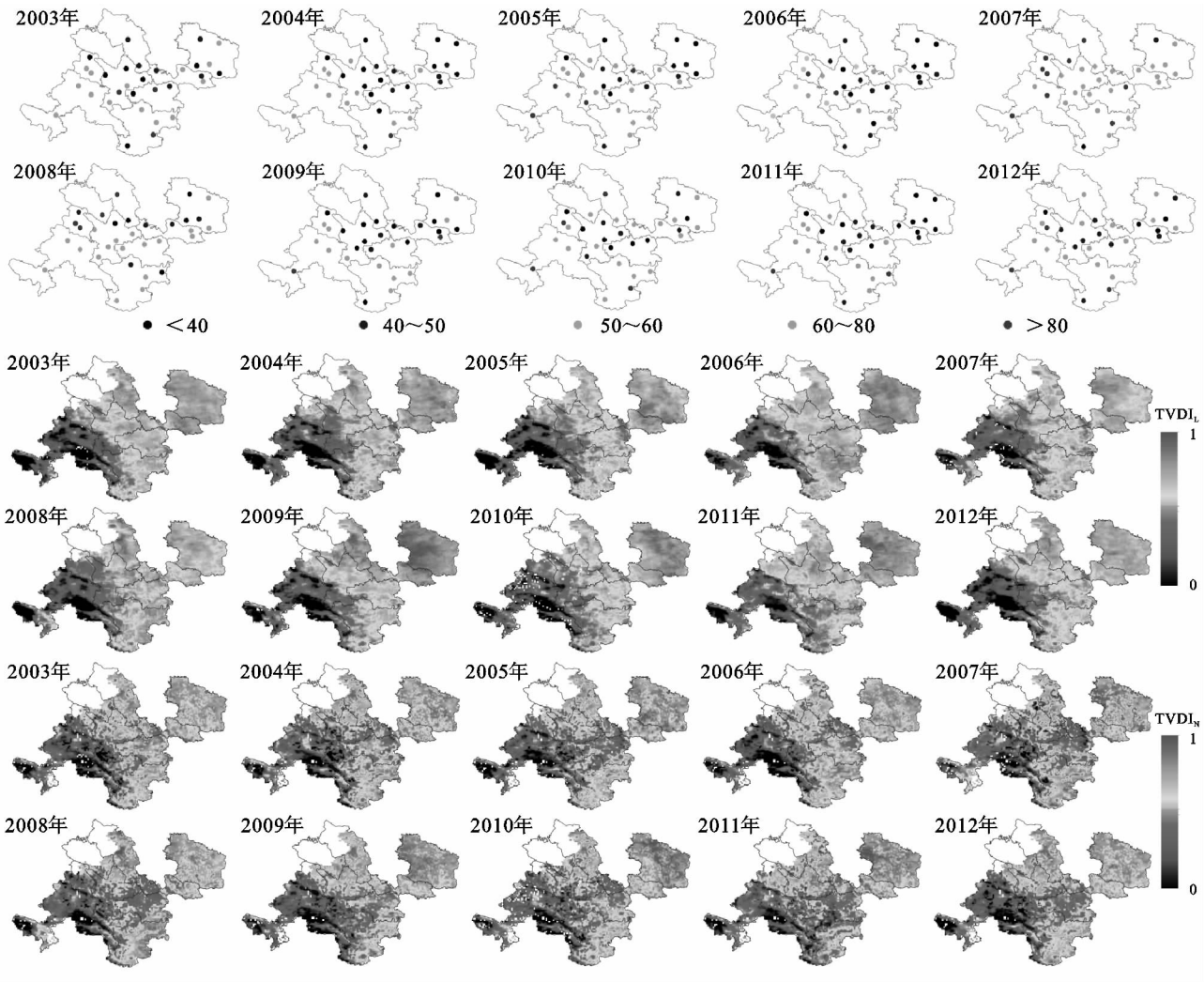


图 7 甘肃省河东地区 2003—2012 年 6 月 RSM、TVDI<sub>L</sub>、TVDI<sub>N</sub> 的空间分布

表 3 2003—2012 年不同土地利用类型 TVDI<sub>L</sub> 与 TVDI<sub>N</sub> 的差值

土地类型	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
农地	−0.125	−0.124	−0.114	−0.118	−0.128	−0.113	−0.113	−0.109	−0.119	−0.093
林地	0.109	0.112	0.099	0.100	0.112	0.076	0.112	0.155	0.100	0.108
草地	0.089	0.094	0.089	0.062	0.102	0.061	0.075	0.130	0.070	0.105

4 结论与讨论

通过统计历史 EVI 与 LST 数据发现,不同土地类型的逐月 EVI 与 LST 变化特征有明显不同,在甘肃省河东地区 6 月林地 EVI>草地 EVI>农地 EVI,林地 LST<草地 LST<农地 LST。从理论上来讲,相同的 EVI,若 LST 高则更加靠近干边即越干,即农地总是相对更加靠近干边,使 TVDI 偏大,即对农地土壤水分的估算偏低。本文用分土地利用类型和不分土地利用类型 2 种方法构建了 TVDI,通过与地面 RSM 的对比分析,得到以下结论:

(1) TVDI 对河东地区庆阳、平凉、临夏、定西北部、甘南等地 RSM 有一定的指示作用,但对定西市南部地区、陇南地区、天水市的 RSM 指示相对较差,

较差的地区主要为林地土地类型及其周围,该区域地形坡度较大,地形的起伏可能是造成 TVDI 在该区域指示作用较差的一个重要原因。

(2) 分土地利用类型后,首先,农地类型的 TVDI 值一定程度上下降,这在庆阳、平凉取得了较好的改进作用;林地、草地类型的 TVDI 值一定程度上上升,这提高了甘南局部区域 TVDI 对 RSM 的指示作用。其次,TVDI 指数在不同间隔区间的统计分布更加趋于合理,这使其对不同等级 RSM 的指示也趋于合理。虽然不分土地类型 TVDI 与 RSM 的相关系数更高,但是该 TVDI 值分布过于集中,与实际站点的 RSM 分布特征不一致,也不易区分不同干旱等级的 RSM。利用不同土地类型建立的 TVDI 则对这种不合理的情况有所改进。

本研究基于 5 km 的月尺度遥感数据完成,结果表明分土地利用类型建立的 TVDI 模型一定程度提高了 TVDI 指示干旱的合理性。从另一个角度看, TVDI 指示干旱的能力与分辨率不无关系,在使用较粗分辨率遥感数据时应当利用土地利用类型数据加以修正。今后将考虑利用更高的时间和空间分辨率数据进行相关研究,以求进一步提高 TVDI 对河东地区土壤湿度的监测能力。

#### 参考文献:

- [1] 张强,张良,崔显成,等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-774.
- [2] 王劲松,李耀辉,王润元,等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.
- [3] 宋连春,邓振镛,董安祥. 全球变化热门话题丛书: 干旱[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 徐启运,胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 479-482.
- [5] 张强,胡隐樵,曹晓彦,等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 358-362.
- [6] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. [M]// Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. 2007: 159-254.
- [7] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability [J]. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, 2007, 37(6): 2407.
- [8] 沙莎,郭锐,李耀辉,等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 128-134.
- [9] Li H J, Li C Q, Lin Y, et al. Surface temperature correction in TVDI to evaluate soil moisture over a large area[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2010(8): 1141-1145.
- [10] Chen J, Wang C Z, Jiang H, et al. Estimating soil moisture using Temperature-Vegetation Dryness Index(TVDI) in the Huang-huai-hai(HHH) plain[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(4): 1165-1177.
- [11] Han Y, Wang Y Q, Zhao Y S. Estimating Soil Moisture Conditions of the Greater ChangBai Mountains by Land Surface Temperature and NDVI [J]. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, 2010, 48(6): 2509-2515.
- [12] 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.
- [13] 王鹏新, WAN Zhengming, 龚健雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533.
- [14] 康为民,罗宇翔,向红琼,等. 贵州格斯特山区的 NDVI-Ts 特征及其干旱监测应用研究[J]. 气象, 2010, 36(10): 78-83.
- [15] 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(2): 213-224.
- [16] Goetz S J. Multi-sensor Analysis of NDVI and Surface Temperature and Biophysical Variables as a Mixed Grassland Site [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [17] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3): 191-205.
- [18] 张喆,丁建丽,李鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 220-227.
- [19] 王海,杨祖祥,王麟,等. TVDI 在云南 2009/2010 年干旱监测中的应用[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(1): 59-65.
- [20] 拉珍,拉巴,陈涛. 基于 TVDI 的西藏“一江两河”地区干旱监测研究[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4): 48-52.
- [21] 赵一飞,张勃,汪宝龙,等. 近 54a 来甘肃省河东地区气候时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 956-964.
- [22] 杨世琦,高阳华,易佳. 干旱遥感监测方法研究进展[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 75-78.
- [23] 张顺谦,冯建东. 四川盛夏伏旱的 MODIS 遥感监测方法[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 51-55.
- [24] 卢远,华瑾,韦燕飞. 利用 MODIS 数据进行旱情动态监测研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 55-58.
- [25] 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.
- [26] 闫娜,李登科,杜继稳,等. 基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J]. 2010, 19(4): 178-182.
- [27] 梁芸,张峰,韩涛. 利用 EOS/MODIS 植被供水指数监测庆阳地区的土壤湿度[J]. 干旱气象, 2007, 25(1): 44-47.