

DOI: 10.5846/stxb201211221652

刘立文, 张吴平, 段永红, 邢立新, 陈圣波, 赵敏. 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, Xing L X, Chen S B, Zhao M. Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS Data. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3704-3711.

TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用

刘立文¹, 张吴平¹, 段永红^{1,*}, 邢立新², 陈圣波², 赵 敏³

(1. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;

3. 小店区国土资源局, 太原 030032)

摘要: 温度植被干旱指数 (TVDI) 是一种通过反演土壤湿度来反映农业干旱状况的重要方法, 其中能量平衡和植被指数的变化是影响 TVDI 模型精度的主要因子。在研究比值植被指数 (RVI)、归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI) 和修正土壤调节植被指数 (MSAVI) 和下垫面温度 (T_s) 的基础上, 引入 DEM 数据并对 T_s 做地形校正, 减少了地形起伏对能量平衡的影响, 建立不同植被指数的 T_s -VI 特征空间, 选择与土壤湿度相关性最好的温度植被干旱指数 (TVDI), 获取研究区 2005 年作物生长季 (5—9 月) 的干旱状况, 并用同步的气象信息对于旱状况进行验证。结果表明: 根据不同时期采用不同植被指数的 TVDI 模型, 经过地形校正后能够更好地反映研究区的农业干旱状况。

关键词: 土壤湿度; TVDI; 地形校正; 植被指数; 干旱

Terrain corrected TVDI for agricultural drought monitoring using MODIS data

LIU Liwen¹, ZHANG Wuping¹, DUAN Yonghong^{1,*}, XING Lixin², CHEN Shengbo², ZHAO Min³

1 College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2 College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

3 The Bureau of Land Resources Xiaodian District, Taiyuan 030032, China

Abstract: Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) is an important tool that reflects agriculture dry situation by inverting soil moisture. The changes of energy balance and vegetation index are two main factors to influence the precision of the TVDI. The MODIS (Moderate...) data products, as RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), and T_s (Land Surface Temperatures), are applied and the DEM (ASTER-GDEM) data are used to correct the T_s data for the reduction of the topographic influences by topographic relief. The TVDI is then employed by comparison of different vegetation index, where the TVDI is more sensitive to soil moisture. Thus the dry situation in the study area is analyzed during the plant growth time and compared by the synchronous meteorology data. The results indicate that: (1) terrain correction can effectively prevent the decrease of TVDI value from a lower surface temperature for a higher pixel. The correlation between T_s -NDVI index and measured values on May is compared, R^2 will increase from 0.4634 to 0.5859 by terrain correction. It shows that the terrain corrected TVDI can improve effectively the estimation of soil moisture. (2) By comparing the correlation between T_s -NDVI, T_s -EVI, T_s -RVI, T_s -MSAVI and soil moisture, all the TVDIs present the negative correlations with soil moisture. The best correlations between the soil moisture and TVDIs can be always found, such as T_s -MSAVI in June, July and September 2005, T_s -EVI in May, and T_s -NDVI in August. Thus a TVDI feature space for different periods by these vegetation indexes are built for inversion of drought conditions. By comparison with agricultural

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271507); 吉林省科技发展基金项目 (20094078)

收稿日期: 2012-11-22; **修订日期:** 2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhduanpku@sina.com

meteorology, the results are acceptable. (3) Large area of the study area was humid from May to September 2005, drought occurred in the West on August, and humid was located in East on June. Therefore, compared with the measured data, the terrain corrected TVDI model is robust to eliminate the terrain and land cover influences to land surface temperature for inversion of soil moisture in the study area. And it is faithful to predict the agricultural drought condition in the study area during 2005 crop growth season.

Key Words: drought; soil moisture content; terrain correction; TVDI; vegetation index

相对于传统的农业干旱监测而言,遥感技术越来越多的被应用于农业干旱监测中^[1]。土壤湿度是遥感监测农业旱情时空变化的重要指标,研究方法主要有热惯量法^[2]、蒸散量算法^[3]、植被指数与地表温度结合法^[4]以及微波遥感法^[5]等。在众多的遥感信息模型中,通过 T_s -NDVI 特征空间的变化特征反演土壤湿度实现农业旱情遥感监测,在国内外得到了广泛研究^[6]。Sandholt 在 2002 年基于地表温度 T_s 和植被指数 VI 的关系提出了温度植被干旱指数 (TVDI) 来估测土壤表层水分状况^[7]。冉琼等用数字高程模型对地表温度进行了订正,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^[8];刘海隆^[9]和柯灵红^[10]等人通过研究不同的遥感数据都提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;伍漫春等应用 TM 资料,反演归一化植被指数 (NDVI)、修正土壤调整植被指数 (MSAVI) 和地表温度 (T_s),采用 TVDI 研究了区域土壤水分,研究表明高 MTVDI 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对农业干旱监测具有一定的科学依据^[11]。

为了更好的提高 TVDI 模型监测农业干旱的精度,本研究使用 MODIS 产品数据,利用 DEM 数据对地表温度数据做地形校正,根据不同时期的土壤湿度状况,采用不同植被指数的温度植被干旱指数方法 (TVDI) 反演研究区 2005 年 5—9 月的土壤湿度,并结合同步的气象信息分析了研究区的土壤湿度的时空分布状况。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

本研究选用吉林省行政区划作为研究区,该研究区地貌形态差异非常明显,地势由东南向西北倾

斜,呈现明显的东南高、西北低的特征。以中部大黑山为界,可分为东部山地和中西部平原两大地貌区。东部山地分为长白山中山低山区和低山丘陵区,中西部平原分为中部台地平原区和西部草甸、湖泊、湿地、沙地区。属于温带大陆性季风气候区。全区气温、降水、湿度、风以及气象灾害等都有明显的季节变化和地域差异^[12]。年降水量为 550—910mm, 80%集中在夏季,以东部降雨量最为丰沛,年平均气温为 3.5℃。该区是我国主要粮食生产供应基地之一,干旱是制约粮食产量有着至关重要的作用,而土壤湿度是反映干旱状况的重要指标。

1.2 TVDI 的原理

Sandholt 等在 VI 和 T_s 的散点图呈现三角形分布特征的研究^[13-14]基础上发现, T_s 和 VI 之间的关系主要是由于植被覆盖度和土壤湿度的变化关系由一组组土壤湿度等值线构成的,两者之间的斜率与作物水分指数呈负相关,因此提出了温度植被干旱指数的概念。TVDI 由植被指数和地表温度计算得到,只依靠图像数据,其定义为公式(1)。

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (1)$$

式中, T_{smin} 为相同 VI 值的最小地表温度,对应 VI- T_s 特征空间的湿边, T_{smax} 为相同 VI 值的最大地表温度,对应 VI- T_s 特征空间的干边 (图 1)。当研究区的植被覆盖和土壤湿度变化范围较小时, VI 和 T_s 的散点图呈现梯形分布特征 (图 1)。用最大 (小) 值的方法,提取 NDVI 相对应的最高 (低) 温度,这些像元组成不规则的曲线,通过曲线上的像元线性拟合得到的近似直线称为干 (湿) 边。即可获得特征空间中的干边和湿边方程:

$$\begin{aligned} T_{smax} &= a_1 + b_1 \times VI \\ T_{smin} &= a_2 + b_2 \times VI \end{aligned} \quad (2)$$

式中, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别是干边与湿边线性拟合方程的系数。TVDI 值越趋向 1, 土壤干旱情况越严重; 相反, TVDI 值越趋向于 0, 土壤湿度越高。因此 TVDI 与土壤湿度的相关性, 在两种极端的情况下可以反映干、湿情况(图 1)。

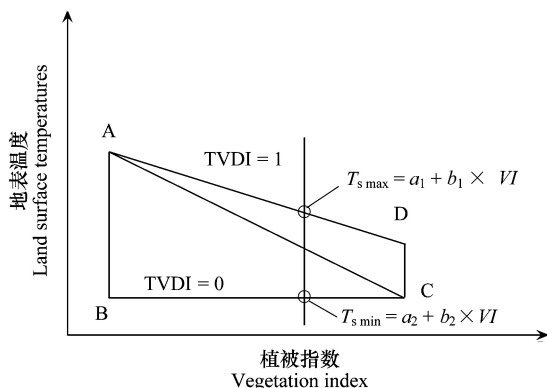


图 1 TVDI 原理示意图^[12]

Fig.1 TVDI principle diagram

1.3 数据源和预处理

植被指数提供了植被生长状况和覆盖信息, 地表温度(T_s)是控制地球表面温度、化学和生物过程的重要参数能反映土壤的湿度情况^[15-16], 通过温度植被干旱指数方法对两者信息进行综合处理与相应的实测数据拟合, 可以得到 TVDI 模型进而得到研究区的土壤干旱状况, 为科学研究该研究区干旱情况提供了重要的依据。

1.3.1 遥感数据

本研究采用的数据是 modis 产品数据 (MOD11A2 和 MOD13A2, 时相为 2005 年 4 月 23 日至 9 月 30 日) 来源于 NASA WIST, 其中, MOD11A2 是 1 km 地表温度/发射率 8 天合成 L3 产品, 采用最大合成法 (MVC) 获得 16 天陆地地表温度 (T_s), MOD13A2 为 1 km 分辨率植被指数 16 天合成产品。DEM 数据来源于中国科学院中国应用环境中心的 30m 的 ASTER GDEM 数据, 经过重采样后分辨率为 1 km。

1.3.2 地形校正处理

本研究采用的地形校正的方法是应用较为广泛的 C 校正模型, 首先对数据进行预处理包括之前用 MRT 对 modis 数据的拼接和投影转换, 利用 DEM 数据在 ENVI 中对坡度、坡向数据进行获取, 同时为了消除大气散射和地表相邻点反射光折射造成

的像素 DN 值和太阳入射角 α 有余弦关系, 本研究利用 IDL 语言在二阶校正模型的基础上改进建立并经过二个阶段 (二次校正) 才能得到校正结果。

1.3.3 植被指数获取

通过 MOD13A2 产品数据得到了 1 km 分辨率的蓝光波段 (Blue), 红光波段 (Red) 和近红外波段 (Near Infra Red, NIR) 波段, 在 ENVI 中通过波段运算, 得到了研究区的比值植被指数 (Ratio Vegetation Index, RVI), 归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 和改进的修正土壤调整植被指数 (MSAVI)。

2 结果与分析

2.1 地表温度的地形校正

由于研究区东高西低的特点决定了地形是影响研究区植被、土壤、气候等各方面地域分异的重要控制因素。一方面地形通过相对高差的巨大山脉、河谷等地域格局影响干、湿气流的走向影响降水、风力等气候差异, 从而影响土壤质地、湿度等; 另一方面高程控制温度从而影响植被覆盖垂直地带性分布、蒸散发程度以及地表水径流^[6], 从图 2 中可以得知, TVDI 与高程呈明显的负相关。研究区由东部到西部地形由山地过渡到平原, 地形起伏度较大, 通过地形校正可以有效地减少因为高程引起的相同 NDVI 条件下高程高的像元对应的 T_s 值有所降低, TVDI 值减少的特性。

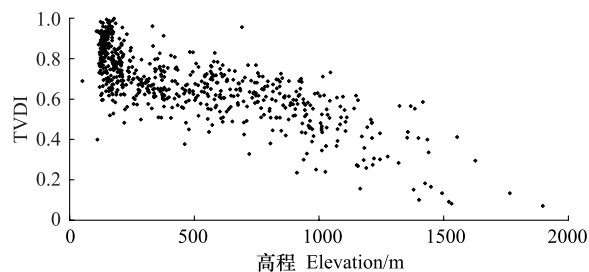
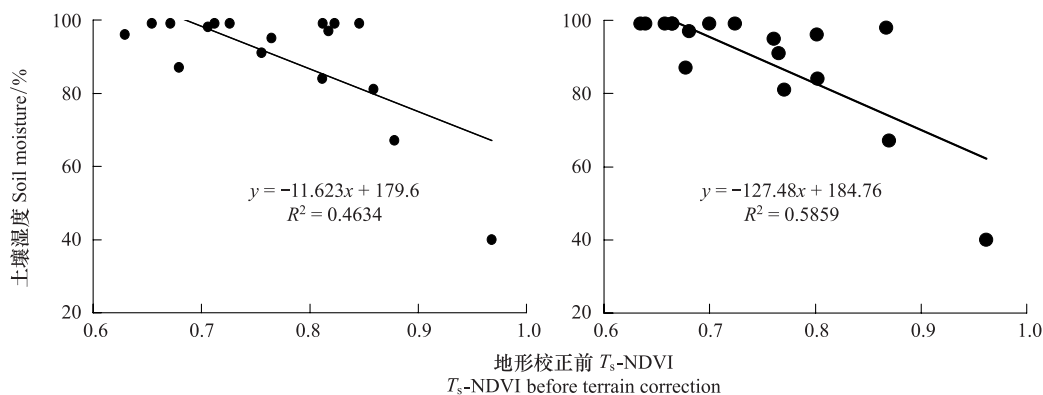


图 2 研究区不同高程等级 TVDI 分布图

Fig.2 TVDI-DEM relationship in study area

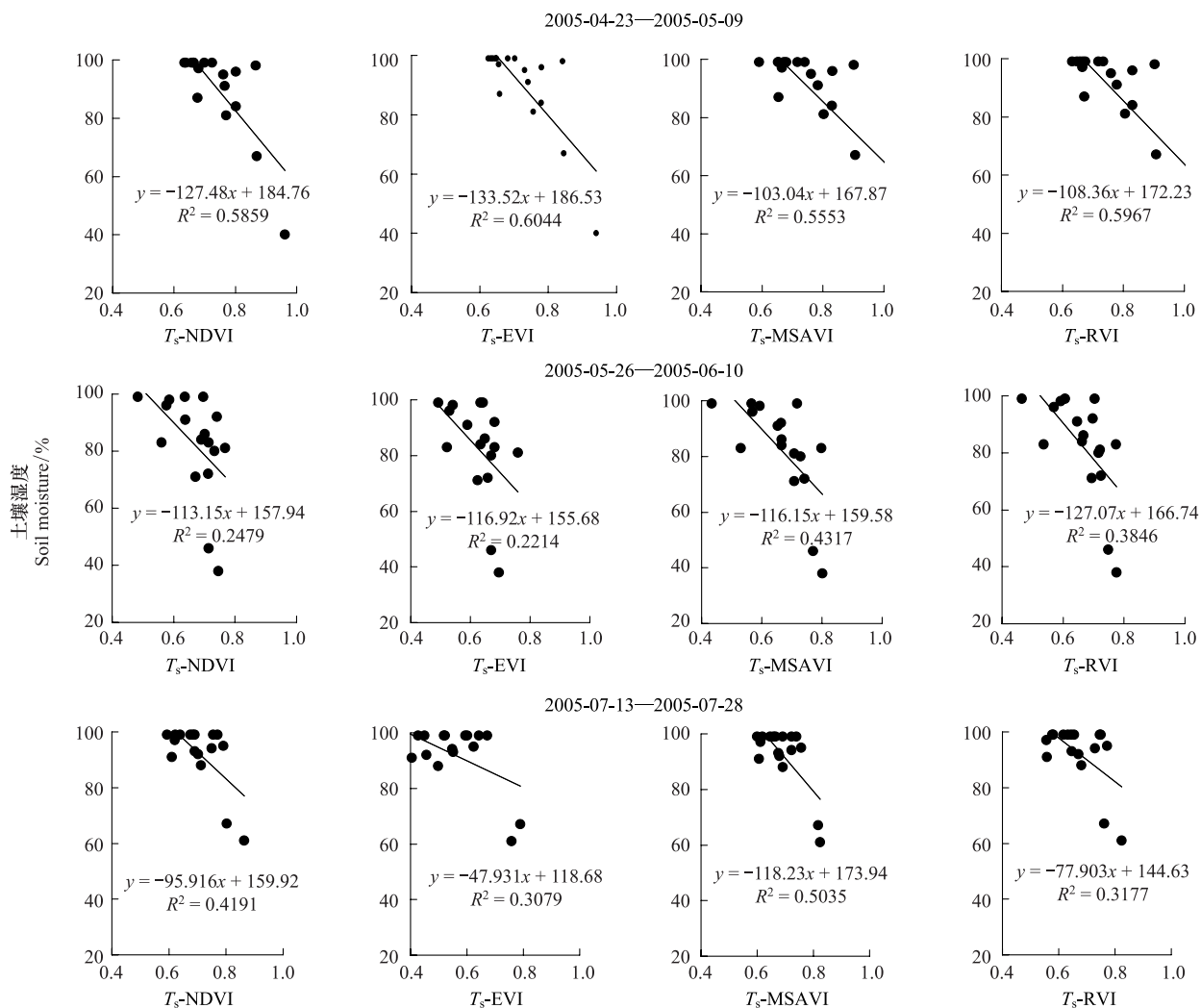
由图 3 可知, 经过地形校正后的 2005 年 5 月上旬的 T_s -NDVI 值与实测值的拟合, 相关系数高于地形校正前, R^2 从 0.4634 提高到 0.5859。通过拟合图可得知, 利用 DEM 校正后的 T_s /NDVI 反演干旱状况更好。

图3 地形校正前后5月份 T_s -NDVI 和实测值的拟合效果比较Fig.3 Actual and simulated T_s -NDVI relationship Before and After Topographic Correction for May

2.2 TVDI 与土壤湿度的相关性分析

根据研究区 17 个气象站点观测的 10 cm 土壤湿度数据与地形校正后的不同的温度植被干旱指数值,利用最小二乘法进行回归分析(图 4)。结果表

明,不同时期的 T_s -NDVI、 T_s -EVI、 T_s -RVI 和 T_s -MSAVI 与土壤湿度均呈现不同程度的负相关,即温度植被干旱指数越高,土壤湿度越低,农业旱情越严重。



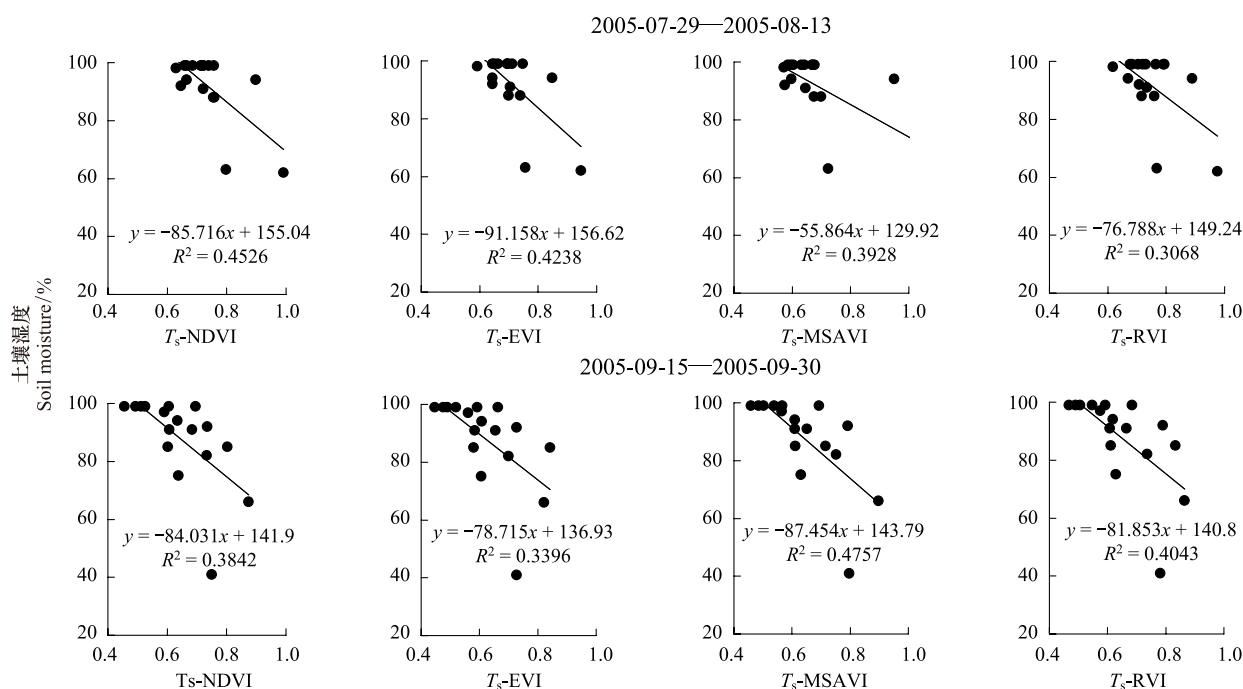


图4 地形校正后的2005年5—9月TVDI与土壤湿度的关系

Fig.4 TVDI and Soil Moisture Relationship during May-Sept. 2005, After Topographic Correction

由图4可知,总体来看 T_s -NDVI、 T_s -EVI、 T_s -RVI 和 T_s -MSAVI 均能反映 10 cm 深度的土壤水分状况,可用于 10 cm 深度的土壤湿度和旱情遥感监测和研究。通过对于不同时期的不同植被指数的温度植被干旱指数法监测土壤湿度比较发现, T_s -MSAVI 相关性最好,其中在 2005 年 6 月、7 月、9 月具有绝对的优势,同时相关研究表明 T_s -MSAVI 对高植被覆盖区域的变化比其他植被指数的 TVDI 更为敏感在特征空间中也能够更好地体现出植被覆盖状况的变化,增强了对土壤水分的敏感性。此外由于考虑了裸土土壤线,MSAVI 比其他植被指数对于低植被覆盖有更好的指示作用,因此用 T_s -NDVI 能更准确地反映土壤水分状况。

2.3 研究区干旱状况时空分析

(1) 整体旱情遥感反演

由以上分析可知, T_s -MSAVI 在 2005 年 6 月、7 月、9 月较之其他的植被指数相关性最好,而 T_s -EVI 和 T_s -NDVI 分别在 5 月和 8 月反演土壤湿度较好。因此对 T_s -MSAVI 特征空间提取 2005 年 6、7、9 的 TVDI 分布图,利用 T_s -EVI 和 T_s -NDVI 提取 5 月和 8 月的 TVDI 分布图和中国根据土壤湿度界定干旱的标准对研究区干湿状况进行分级。分别为:极湿润 ($0 \leq \text{TVDI} < 0.4$),湿润 ($0.4 \leq \text{TVDI} < 0.6$),正常 (0.6

$\leq \text{TVDI} < 0.8$),干旱 ($0.8 \leq \text{TVDI} < 0.9$),极干旱 ($0.9 \leq \text{TVDI} < 1$),利用 ENVI 制作了研究区 2005 年 5 月—9 月的旱情等级分布图(图 5),并利用研究区的降雨量数据进行验证。

根据研究区气象局公布的 2005 年研究区的农业气象旬报得知 5 月上旬气温特低,降水特多,西部旱情相对于其它年份而言得到明显的缓解,东部地区出现过湿现象,干旱地区主要分布在白城、洮南、通榆等地区,极湿润地区只分布在研究区东部部分县(市)农田,TVDI 西、中、东部地区土壤湿度随植被程度覆盖程度分布不均现象。6 月上旬气温稍高,降水稍多,全区平均降水量为 32.2 mm,比常年同期多 11%,大量的降雨有利于西部旱情的缓解同时也造成了中东部地区出现大范围的过湿现象,个别地区已成涝区,本月干旱、极干旱地区主要集中在通榆、大安西部等小范围地区。7 月中旬气温偏高,降水偏少,全区平均降水量为 29.3 mm,比常年同期少 46%。但是 7 月份仍然是全区降雨量主要集中月份,降雨量比较平均,干旱得到明显缓解。全区 TVDI 值主要分布在 0.4—0.8 之间,干旱情况属于正常,通榆、长岭等县(市)出现小范围干旱。8 月上旬气温稍低,降水稍少,降雨量分布不均匀,全区 TVDI 值主要分布在 0.4—0.8 之间,干旱情况属于正常偏湿润,干

旱、极干旱地区主要分布在白城地区西部的县(市), 干旱范围明显扩大, 中东部少量地区出现了极湿润现象。9 月中下旬气温特高, 降水稍多, 西部旱情得到了明显缓解, 从 9 月 15 日夜间至 17 日 08 时, 全区

过程平均降水量为 13.7mm。全区 TVDI 值主要分布在 0.5—1 之间属于湿润、极湿润状况, 干旱地区主要分布在通榆县内。

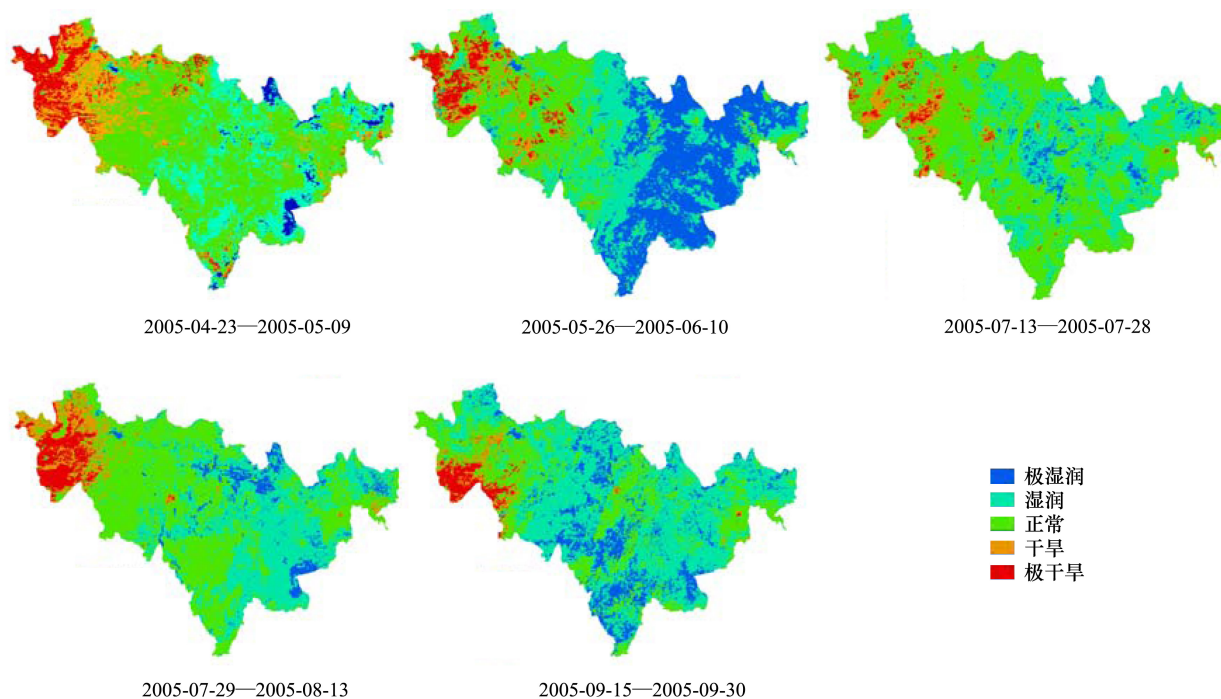


图 5 研究区 2005 年作物生长季旱情等级时空变化图

Fig.5 Crop Drought distribution during Growth Season in 2005

(2) 研究区干旱状况时空分析

为了进一步的探讨研究区的干旱状况, 按照研究区的东高西低特殊的地形地貌特征将研究区分为东部中山低山区, 中部低山丘陵平原区, 西部沙丘覆盖平原区并分别对研究区 2005 年不同月份的干旱

状况做像元统计分析(图 6)。通过分析可知, 由于东部地区地势高, 植被覆盖度好, 大部分像元位于正常湿润范围内, 干旱、极干旱分布范围较少, 在 5 月份像元数最多, 部分地区有极湿润状况, 在 6 月份像元数达到最多。在中部地区, 地势趋于平缓, 植被覆

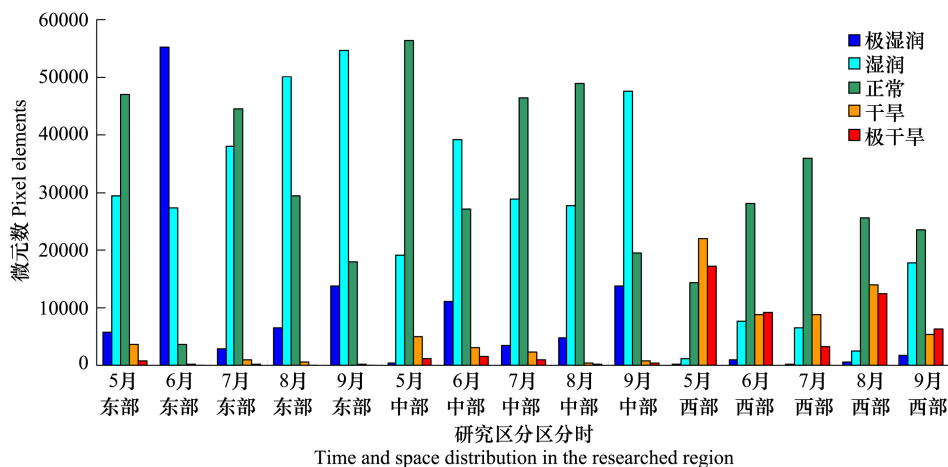


图 6 研究区干旱状况分区分时统计

Fig.6 Statistics of Drought Conditions by time and space

盖度较好,大部分像元位于正常湿润范围内,干旱、极干旱分布范围稍大,在5月份像元数最多,极湿润像元分布范围稍大,在9月份达到了最多。在西部平原地区,沙丘覆盖造成了该地区植被覆盖度差,大部分像元位于极干旱、干旱和正常地区,小范围地区有湿润,极湿润状况,在9月份像元数达到最多。

3 讨论

针对传统 TVDI 模型的不足,利用 DEM 数据对研究区的地表温度数据做地形校正,消除地形起伏和覆盖类型差对地表温度的影响;为了减少大气及土壤背景对土壤湿度的影响,分析了不同植被指数的温度植被干旱指数,从中选取与实测土壤湿度之间的相关性最好的温度植被干旱指数模型来反演研究区的土壤湿度。经过实测数据验证表明,校正后的 T_s /MSAVI、 T_s -EVI 和 T_s -NDVI 模型能够有效地反映研究区 2005 年 5 月—9 月的干旱状况。由于能获得的研究区地区气象站点极其稀疏且无法获取最近时段的气象数据,因此,无法直接验证土壤湿度空间分布与气温或降水的关系。今后应针对影响土壤湿度的其他因素进行研究,为提高遥感模拟干旱状况,做更深一步的工作。

4 结论

(1)在土壤湿度的遥感模拟中加入地形校正,可以有效地减少因为高程引起的相同 NDVI 条件下高程高的像元对应的 T_s 值有所降低,TVDI 值减少的特性。通过对 5 月份地形校正前后的 T_s -NDVI 指数与实测值的相关性比较得知, R^2 从 0.4634 提高到 0.5859,能够有效提高土壤湿度的精度。

(2)通过比较 T_s -NDVI、 T_s -EVI、 T_s -RVI 和 T_s -MSAVI 与土壤湿度的相关性得知,以上 TVDI 均能体现土壤湿度状况的负相关关系,其中 T_s -MSAVI 在 2005 年 6, 7, 9 月的相关性最好,而 T_s -EVI 和 T_s -NDVI 分别在 5 月和 8 月相关最好,通过分别建立不同时期的相关性最好植被指数的 TVDI 特征空间,反演得到研究区干旱状况图。通过与研究区农业气象旬报比较表明,此方法能够较好地反映了研究区 2005 年 5—9 月的干旱状况。

(3)按照研究区的地形地貌特征分区分时研究了研究区干旱状况,通过研究得知研究区 2005 年

5—9 月的大部分地区属于正常湿润地区,干旱、极干旱现象主要出现在研究区西部,在 8 月份覆盖面积达到最大,而极湿润地区主要位于研究区东部,在 6 月份达到最大。

References:

- [1] Li C Q, Li H J. The application of TVDI in drought monitoring for winter wheat in spring. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(3): 161-165.
- [2] 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. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 24-32.
- [3] Sui Z H, Tian G L, Li F Q. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3): 220-224.
- [4] Xia H, Wu J J, Liu Y N, Fan J L. Progress on drought monitoring by remote sensing in China. *Remote Sensing Information*, 2005, (1): 55-57.
- [5] Sun L, Chen H W, Zhao L J, Hong M. The advances of drought monitoring by remote sensing. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 202-206.
- [6] Sun C Q, You S C, Liu G H, Ke L H, Zhong X K. The spatial pattern of soil moisture in Northern Tibet based on TVDI method. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 570-576.
- [7] 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.
- [8] Ran Q, Zhang Z G, Zhang G P, Zhou Q B. DEM correction using TVDI to evaluate soil moisture status in China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 32-36.
- [9] 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. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2011, 29(2): 224-229.
- [10] Ke L H, Wang Z X, Song C Q, Lu Z Q. Reconstruction of MODIS land surface temperature in Northeast Qinghai-Xizang plateau and its comparison with air temperature. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 277-287.
- [11] Wu M C, Ding J L, Wang G F. Regional soil moisture inversion based on surface temperature and vegetation index characteristic spaces. *Journal of Desert Research*, 2011, 30(5): 570-576.
- [12] Bai Z Y, Xing L X, Pan J, Li P F, Xu Z B. Research on soil moisture information by remote sensing. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2011, 34(3): 50-55.
- [13] Price J C. Using Spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.

- [14] Carlson TN. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 52(1/2): 45-69.
- [15] Wang Z X, Liu C. Huete A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-986.
- [16] Liu X Q. Retrieving the Soil Moisture Based on TM Data in Yan River Basin [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, 2010: 2-2.
- [6] 宋春桥, 游松财, 刘高焕, 柯灵红, 钟新科. 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): 570-576.
- [8] 冉琼, 张增祥, 张国平, 周全斌. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 32-36.
- [9] 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.
- [10] 柯灵红, 王正兴, 宋春桥, 卢振权. 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.
- [11] 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.
- [12] 白志远, 邢立新, 潘军, 李鹏飞, 许振北. 土壤湿度信息遥感研究. *测绘与空间地理信息*, 2011, 34(3): 50-55.
- [15] 王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-986.
- [16] 刘晓婧. 基于 TM 数据的延河流域土壤水分反演研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 2-2.

参考文献:

- [1] 李春强, 李红军. TVDI 在冬小麦春季干旱监测中的应用. *遥感技术与应用*, 2008, 23(3): 161-165.
- [2] 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): 24-32.
- [3] 隋洪志, 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.
- [4] 夏虹, 武建军, 刘雅妮, 范锦龙. 中国用遥感方法进行干旱监测的研究进展. *遥感信息*, 2005, (1): 55-57.
- [5] 孙丽, 陈焕伟, 赵立军, 洪敏. 遥感监测旱情的研究进展. *农业环境科学学报*, 2004, 23(1): 202-206.