

康为民,罗宇翔,向红琼,等. 贵州喀斯特山区的 NDVI-Ts 特征及其干旱监测应用研究[J]. 气象,2010,36(10):78-83.

贵州喀斯特山区的 NDVI-Ts 特征 及其干旱监测应用研究^{*1}

康为民^{1,2} 罗宇翔¹ 向红琼² 陈娟¹ 郑小波¹

1 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002

2 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002

提 要: 温度植被干旱指数(TVDI)同时考虑了陆面温度和植被指数对遥感干旱监测的影响,综合了两者的长处,有效地减小了植被覆盖度的影响,提高了遥感干旱监测的准确性。陆面温度的反演以普朗克辐射函数为基础,运用地表比辐射率使之转换为灰体辐射。提取植被指数对应的最高陆面温度和最低陆面温度构成 NDVI-Ts 空间,进而得到 TVDI。文章应用对地观测卫星(EOS)的 MODIS 遥感资料,分析并揭示了贵州复杂山区独特的 NDVI-Ts 空间的形态特征,并用于检验贵州 2006 年 7 月 25 日和 2007 年 8 月 19 日土壤表层干旱情况,同时与当地气象站土壤湿度观测数据进行定量验证,表明 TVDI 与土壤湿度显著相关。由于 EOS/MODIS 遥感资料的高时间分辨率、高光谱分辨率和适中的空间分辨率特性,使得该方法适宜于大区域复杂地形的干旱检测与预警。

关键词: 遥感干旱监测, 温度植被指数, MODIS, 陆面温度

NDVI-Ts Characteristics of Guizhou and Its Application to Drought Monitoring in the Karst Area

KANG Weimin^{1,2} LUO Yuxiang¹ XIANG Hongqiong² CHEN Juan¹ ZHENG Xiaobo¹

1 Guizhou Institute of the Mountainous Climate and Environment, Guiyang 550002

2 Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resource, Guiyang 550002

Abstract: In the temperature-vegetation-drought index (TVDI), the impacts of the land surface temperature and the vegetation index on the remote drought monitoring are simultaneously taken into account, and also both merits are combined. Therefore, the effect of vegetation coverage fraction is effectively reduced and the accuracy in remote sensing of drought is obviously improved. Land surface temperature is retrieved based on the Planck radiation function, in which the surface emissivity is used to be a gray body emission. Highest and lowest land temperatures corresponding to each vegetation index are extracted to make up NDVI-Ts space. In this paper, the remote sensing data of the Earth Observing Satellite (EOS) MODIS are used to analyze and reveal the particular morphological characteristics of NDVI-Ts space over Guizhou complex mountains. Soil surface dry conditions on July 25, 2006 and August 19, 2007 are inverted and simultaneously verified with the soil moisture information from local weather stations. The results show that TVDI is significantly related to soil moisture. Because of high temporal and spectral resolution as well as moderate spatial resolution of EOS/MODIS remote sensing data, the method is suitable for the detection and early warning of soil drought in large-scale and complex terrains.

Key words: drought monitoring, temperature-vegetation-drought index (TVDI), MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer), land surface temperature

* 贵州省科技基金(2003-3058);贵州省气象局开放基金(2007005);贵州省科技攻关(S2007-1016);黔科合 SZ[2009]3014;科技部 GYHY (QQ20090631)贵州气象创新(2008-IP02)

2008 年 7 月 3 日收稿; 2010 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者:康为民,主要从事 GIS 与遥感研究与应用. Email:sdskwm@sina.com

引言

贵州地处亚热带喀斯特高原山区,境内地形复杂,地势陡峭,土层脊薄,地表水以径流为主,水分流失大,土壤蓄水保水能力差,夏季往往 10 天不下雨旱象就会露头,超过 18 天就会出现干旱。再加上降水的时空分布不均,年际之间变化大,常有区域性、阶段性的干旱发生。如 2006 年 6 月下旬至 8 月底出现在重庆的大范围高温干旱,与之接壤的贵州北部部分地区降雨量偏少 4~7 成,有的地区甚至偏少 8 成多,成为近 50 年以来最为严重的干旱。旱灾是贵州的主要农业灾害,土壤水分监测以及及时准确地获取旱情信息都非常重要。传统方法局限于稀疏点上的土壤含水量数据来监测旱情及分布范围,数据量少,代表性差,无法实现大范围的动态监测^[1]。而卫星遥感信息因其宏观、动态、客观、时效性好的特点,为大范围的干旱灾害监测提供了一种高效、便捷的技术平台,尤其在贵州复杂的地理环境下更具有特殊意义。

用卫星遥感方法监测土壤水分和干旱的研究始于 20 世纪 70 年代,国内 20 世纪 80 年代逐渐开展这方面的工作,且多是基于 NOAA/AVHRR^[2]、LandSat TM 等传感器进行^[3],采用的旱情指标或者建立在植被指数基础上,或者建立在陆面温度基础上^[4-5],或者通过实际蒸散和潜在蒸散的比值^[6]来取得。归一化植被指数(NDVI, Deering 1978 年)作为水分胁迫指标适宜在植被覆盖条件下使用,但存在一定的滞后性;而土壤热惯量法进行土壤水分状况评价^[7-9]只能用于裸土或稀疏的植被覆盖,且环境因素限制很大。归一化温度指数(Normalized Difference Temperature Index, NDTI)能很好地描述土壤供水能力,比 NDVI 具有更高的时效性;以冠层或叶片辐射温度信息作为旱情评价指标早在 20 世纪 80 年代初期就得到广泛的应用^[10-11],但两者都受土壤背景信息的影响。总的说来,诸种方法各有优缺点,但有明显的互补作用。综合陆面温度模式和植被指数模式的长处,学者们创立了植被指数与陆面温度相结合的 NDVI-Ts 空间来评价区域旱情,有效地减小了植被覆盖度对于干旱监测的影响,准确性更高,实用性更强。

MODIS 作为新一代对地观测仪器,具有从可见光到远红外 36 个波段,频率划分细,空间分辨率比

NOAA/AVHRR 也有所提高,为更精确更稳定的陆面温度反演创造了条件,非常适合用于干旱监测。本文利用 MODIS 植被指数和陆地表面温度^[12]建立贵州喀斯特高原山区 NDVI-Ts 空间,然后计算其温度植被干旱指数(TVDI),分析其土壤干旱状况,并通过各地气象站信息和野外同步采样的土壤湿度数据验证,进行贵州喀斯特山区干旱预警与监测运用研究。

1 原理和方法

1.1 植被指数(VI)

植被指数由卫星传感器中可见光和近红外通道探测数据的线性或非线形组合而成,能够反映绿色植物的生长和分布特征,可以对地表植被的生长状况做简单、有效或经验的度量^[13]。根据植被的光谱特性,通过卫星可见光和近红外波段的不同组合,已经定义了 40 多种植被指数,其中归一化差值植被指数 NDVI 是目前应用最广的一种。这是因为 NDVI 具有消除大部分与仪器定标、太阳角、地形、云阴影和大气条件有关辐照变化的特点,增强了对植被的响应能力。NDVI 公式如公式(1),其值限定在(-1, 1)范围内。

$$NDVI = \frac{CH2 - CH1}{CH2 + CH1} \quad (1)$$

式中 CH1, CH2 为 MODIS 第 1、第 2 通道的反射率。

1.2 陆地表面温度(LST)

陆地表面温度是地球表面能量平衡一个很好的指标,是区域和全球尺度地表物理过程中的一个关键因子。通过遥感方法获取陆地表面温度的理论基础是:随着温度的升高陆地表面发射的总辐射能也迅速地增加,同时地面物体温度的变化也影响物体的发射光谱。

20 世纪 60 年代,卫星遥感数据开始用来反演地表温度。从那时起,在已知比辐射率的前提下,科研工作者利用各种对大气辐射传递方程的近似和假设,提出了许多不同表面温度的反演算法,其中分裂窗算法(split windows)是目前常用的方法。该算法利用大气窗口 10~13 μm 内,两个相邻通道(11 μm 与 12 μm)上大气的不同吸收特性,由两通道亮温的某种组合来消除大气的影

地表温度为 T_s 在波长为 λ 的波谱辐射值 L 可根据普朗克函数表示为:

$$L(\lambda, T) = \epsilon(\lambda)B(\lambda, T_s) = \epsilon(\lambda) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T_s} - 1)} \quad (2)$$

式中: $L(\lambda, T)$ 为光谱辐射度, 即在一定波长下单位立体角每平方米的辐射功率 ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m \cdot sr^{-1}$); c 为光速 ($2.99792458 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$); h 为普朗克常数 ($6.626076 \times 10^{-34} J \cdot s$); k 为玻耳兹曼常量 ($1.380658 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$); λ 为波长 (m); T 为绝对温度 (K)。

通过变换方程(2)获得亮度温度 T_s 的计算式

$$T_s = \frac{hc}{k\lambda \ln(1 + 2\pi\epsilon hc^2/\lambda^5 L)} \quad (3)$$

Becker 在辐射传输线性近似的基础上, 考虑地表比辐射率的影响, 给出了局地分裂窗算法^[14]为:

$$T_s = A_0 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2 \quad (4)$$

$$A_0 = 1.274 \quad (5)$$

$$P = 1 + 0.15616(1 - \epsilon)/\epsilon - 0.482\Delta\epsilon/\epsilon^2 \quad (6)$$

$$M = 6.26 + 3.98(1 - \epsilon)/\epsilon + 38.33\Delta\epsilon/\epsilon^2 \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$$

$$= 0.01019 + 0.047\ln(NDVI) \quad (8)$$

$$\epsilon = 1.0094 + 0.47\ln(NDVI) \quad (9)$$

$$\epsilon_4 = 0.9897 + 0.029\ln(NDVI) \quad (10)$$

其中, T_4, T_5 分别为 AVHRR 第 4 和 5 通道的亮温; ϵ_4, ϵ_5 分别为 AVHRR 第 4 和 5 通道的平均比辐射率。MODIS 中 31、32 波段和 NOAA/AVHRR 的 4、5 波段非常接近, 并且数据精度更高。因此将上述应用于 AVHRR 数据的分裂窗方法应用到 MODIS 数据上。

1.3 温度植被干旱指数 (TVDI) 及其在贵州的表现特征

1.3.1 TVDI 的普遍特征

研究发现陆地表面温度与植被指数呈显著的负相关关系^[15]。Price^[16] 和 Carlson^[17] 发现当研究区域的植被覆盖度和土壤水分条件变化范围较大时, 以遥感资料得到的 NDVI 和 T_s 为横纵坐标得到的散点图呈三角形, Moran 等^[18] 发现散点图呈梯形, 在相同大气和地表湿度状况下, 不同的地表类型有着不同的 NDVI/ T_s 斜率和截距。这些分布形态就是所谓的 NDVI- T_s 空间。

图 1 是 NDVI- T_s 特征空间的示意图, 左侧边代表不同湿度的裸土温度, 随着湿度的降低, 温度升高, 横轴表示植被指数由裸地到最大(接近于 1), 斜

线表示在一定的土壤湿度下, 地表温度随植被指数增加而下降, 在 NDVI- T_s 特征空间中不同的等值线代表不同的干旱程度。例如, TVDI 值为 1 是干边(dry edge), 代表土壤缺水; TVDI 值为 0 则是湿边(wet edge), 具有最大的土壤水分蒸发蒸腾总量和无限的水分供应。干边和湿边反映了土壤水分的两个极端状态。

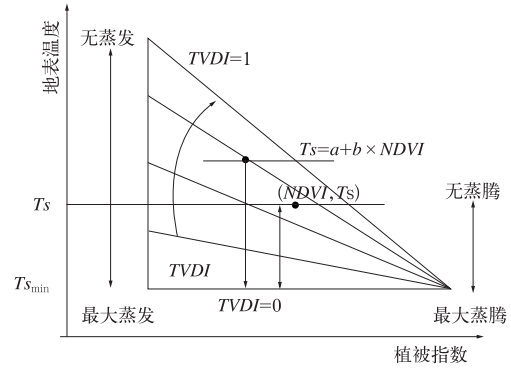


图 1 TVDI 原理示意图

Fig. 1 Rational diagram of TVDI

由 NDVI- T_s 空间提取湿边和旱边方程分别为

$$T_{s_{\min}} = a_1 + b_1 NDVI \quad (11)$$

$$T_{s_{\max}} = a_2 + b_2 NDVI \quad (12)$$

其中, $T_{s_{\min}}$ 和 $T_{s_{\max}}$ 为在相同 NDVI 下的最低和最高陆地表面温度, 亦即湿边和干边温度, a_1, b_1, a_2, b_2 为回归系数, 分别代表湿边和干边方程的截距和斜率。

Sandholt 等^[19] 以上述植被指数和地表温度的关系, 由干边和湿边方程建立温度植被干旱指数 (TVDI) 计算式, 估测土壤表层水分状况:

$$TVDI = \frac{T_s - (a_1 + b_1 NDVI)}{(a_2 + b_2 NDVI) - (a_1 + b_1 NDVI)} \quad (13)$$

式中 TVDI 越大, 土壤湿度越低, 反之则土壤湿度越高。式中考虑了植被指数与温度的相互作用, 所以 TVDI 较好地改变了单纯基于植被指数或单纯基于陆面温度进行土壤水分状态监测的不足, 有效地减小了植被覆盖度对干旱监测的影响, 提高了遥感旱情监测的准确度和实用性。

1.3.2 贵州喀斯特山区的 NDVI- T_s 特征

运用上述方法, 本文分析了 3 个较典型个例的遥感资料, 得到贵州的 NDVI- T_s 特征图(如图 2)。可以看到三张图中的干边或湿边形状分别均很相似, 呈现一种独特的“弓形”结构, 干边为一条向下开

口的曲线,两端与湿边连接,形成一条闭合曲线。形成这一分布状况与喀斯特地质地貌和空气中水汽多云量大有关,其成因有待进一步研究。

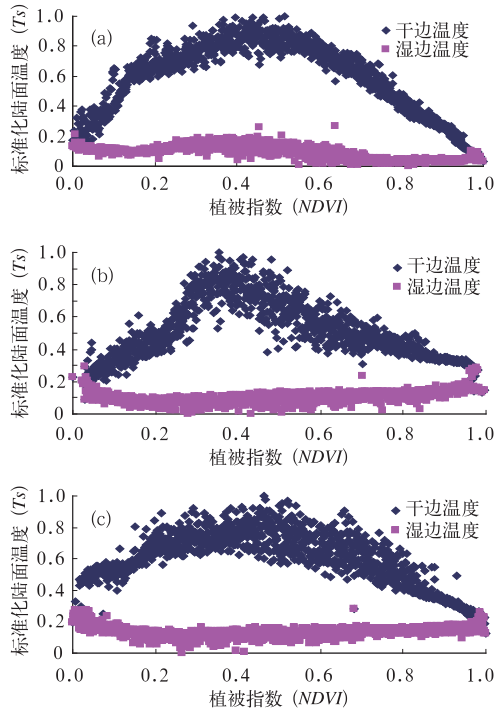


图 2 贵州的 TVDI 特征

(a) 2006 年 7 月 25 日 TERRA;

(b) 2006 年 8 月 10 日 TERRA;

(c) 2007 年 8 月 19 日 AQUA

Fig. 2 Characteristics of TVDI in Guizhou;

(a) from Terra satellite on 25 July 2006;

(b) from Terra on 10 August 2006; and

(c) from Aqua Satellite on 19 August 2007

图中当 NDVI 取一定值时陆地表面温度最大值达到最大,偏离这一值时,陆地表面温度最大值均逐渐减小,尤其是随着 NDVI 值的增大,陆地表面温度的最大值与 NDVI 呈较好的线性关系,而陆地表面温度的最小值则变化不大,总体呈略微增加的趋势。

2 数据处理

2.1 研究区域

本研究区域为贵州全境。贵州省位于 $24^{\circ}37' \sim 29^{\circ}13'N$ 、 $103^{\circ}36' \sim 109^{\circ}35'E$ 之间,为中国西部喀斯特高原山区省份,山地和丘陵占全省面积的 90% 以上。地势最高处在西北部的威宁、赫章两县,达 2900 m,形成向北、东、南三个方向的斜坡,最低处为黎平县 137 m。贵州属亚热带季风气候区,水汽

丰富,水热同季,日照偏少。崎岖陡峭的地形地势,形成丰富多样的气候类型,使得水热资源分布复杂,垂直差异明显。

2.2 数据来源

本文的数据来源于国家气象局卫星中心 DVBS 遥感地面接收系统接收的 2006 年 7 月 25 日、8 月 10 日和 2007 年 8 月 19 日的 MODIS 数据,并通过该系统进行解压、几何纠正,并采用等经纬度投影生成 Id2 文件,然后提取其中 1、2、31 和 32 波段的数据。

2.3 具体步骤

(1) 1、2 波段的数据用于计算 NDVI;

(2) 31、32 波段的数据通过 Becker 的热辐射方程,计算陆地表面温度值[式(4)~式(10)];

(3) 在 VB 编程环境下,编程求取每个植被指数对应的陆地表面温度的最大值和最小值;

(4) 分别建立陆地表面温度的最大值和最小值与植被指数的线性方程 $T_s = a + b \times NDVI$,得到干边和湿边方程中的 a 、 b 值[式(11)~(12)];

(5) 运用 TVDI 模型公式(13),计算出区域内的 TVDI 并进行 0、1 化处理,得到全省干旱等级及其分布。

(6) 最后与野外同步采集的土壤湿度数据进行相关性分析。

3 处理结果和分析

3.1 贵州特殊的 NDVI-Ts 特征空间的计算处理

利用 NDVI 数据集合劈窗算法计算陆地表面温度,再将 NDVI 数据加密以提高精度和级数,以此提取每个 NDVI 数据点上的最大和最小陆地表面温度,得到 NDVI-Ts 特征空间。计算干湿边方程时先是将图 2 中的弓形分布数据利用非线性模拟,但反演的地面干旱结果较差(过程略)。原因是图 2 中左侧数据是受云层覆盖影响的区域,空气中水分含量高,遥感辐射透过率低,使得反演的地面温度低,同时植被指数也低,不符合 NDVI-Ts 的规律。鉴于此最终还是按照图 1 所示 T_s 与 NDVI 的关系,干边的地面温度与植被指数呈现较好的线性负相关,以图 2 中干边顶点为界,选取干边右侧单调下降的这部分干湿边数据进行计算,取得很好的效果(见图 3)。

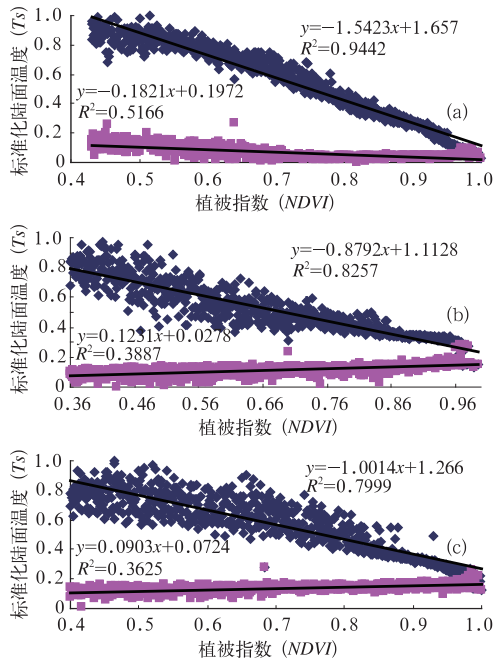


图 3 选取的特征空间数据及其干湿边的确定
(a) 2006年7月25日 TERRA;
(b) 2006年8月10日 TERRA;
(c) 2007年8月19日 AQUA

Fig. 3 Determination of dry and wet edges by picking up the data from the eigenspace
(a) from TERRA satellite on 25 July 2006;
(b) from TERRA on 10 August 2006; and
(c) from AQUA Satellite on 19 August 2007

3.2 干旱等级分布

利用式(11),计算全省的 TVDI 分布,并以 TVDI 作为干旱分级指标,将干旱划分湿润($0 < TVDI < 0.2$),正常($0.2 < TVDI < 0.4$),轻旱($0.4 < TVDI < 0.6$)和重旱($0.8 < TVDI < 1.0$)4级,得到干旱等级分布图(如图4所示)。图4a是贵州省2006年7月25日的 TVDI 等级分布图,时值贵州北面的川渝正遭受50年一遇的高温干旱天气。由图可见,与之接壤的贵州北部的部分地区亦有不同程度干旱发生。图4b是2007年8月19日干旱等级分布图。如图4所示:贵州省北部地区处于重庆干旱区域的南部边缘,持续的干旱少雨天气,使得该区域出现一定旱情,其中赤水、沿河、绥阳等县干旱较重。

3.3 验证评价

在全省43个土壤湿度观测站中,挑选出晴空云少的站点0~10 cm土壤湿度重量百分比数据,以土壤湿度重量百分比为横坐标, TVDI 值为纵坐标,形成土壤含水量-TVDI的散点图。如图5所示,两

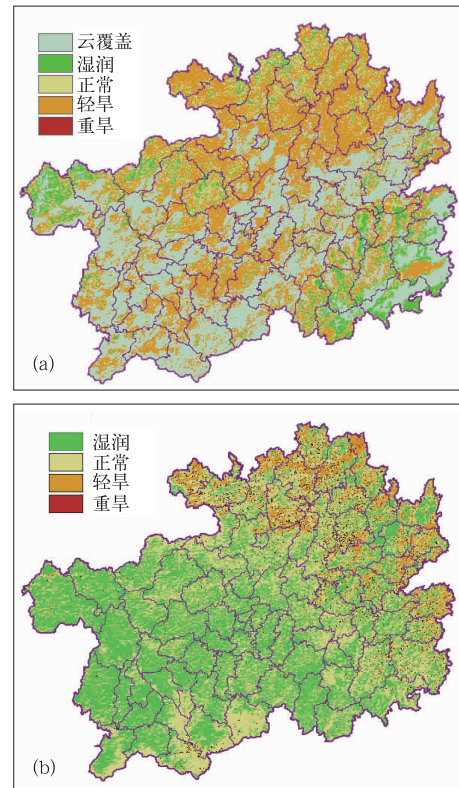


图 4 干旱等级分布图

(a) 2006年7月25日 TERRA;
(b) 2007年8月19日 AQUA

Fig. 4 Grade distribution of drought
(a) from TERRA satellite on 25 July 2006; and
(b) from AQUA Satellite on 19 August 2007

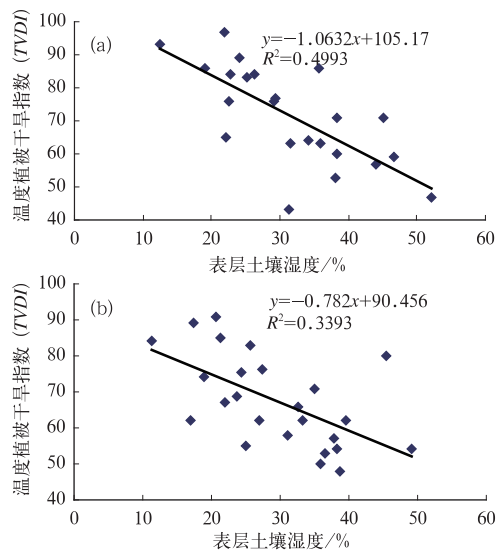


图 5 表层土壤含水量和温度植被干旱指数(TVDI)关系

(a) 2006年7月25日 TERRA;
(c) 2007年8月19日 AQUA

Fig. 5 Relationship of temperature vegetation drought index (TVDI) with surface soil moisture based on the data
(a) from TERRA satellite on 25 July 2006; and
(b) from AQUA Satellite on 19 August 2007

图中除了个别的数据外,可以看出土壤湿度和温度植被干旱指数表现出明显负相关关系,对线性拟合结果经过 t 检验发现线性回归方程达到显著水平,这说明温度植被干旱指数能够反映地表土壤水分状况,作为干旱评价指标有一定的合理性,表明用 TVDI 进行表层土壤水分干旱监测具有一定的应用价值。

4 结 论

本文根据 NDVI-Ts 空间分布特征,利用陆地表面温度和植被指数建立 NDVI-Ts 空间,分析了 3 个较为典型遥感资料,揭示出贵州 NDVI-Ts 空间独特的弓形结构特征,并利用温度植被干旱指数 (TVDI) 方法反演 2006 年 7 月 25 日贵州省全境的地表干旱情况,对 2007 年 8 月 19 日的全省性土壤水份状况进行监测,并用各地气象局表层土壤湿度同步观测信息对结果进行定量验证。结果表明, TVDI 与土壤湿度显著相关,与实地同步野外采集的土层湿度数据结果相一致,表明该方法可以用来对大区域干旱进行监测。虽然该方法在干旱监测中具有突出的优势,但由于陆地表面温度受到地带性影响,尤其是贵州地形复杂,空气潮湿,阴雨天多,云量大,在经验模式中未能综合考虑这些因素,会引起一定的偏差,尚需进一步研究完善。

参考文献

- [1] 何永坤,王勇. 基于水热条件下干旱实时动态监测研究[J]. 气象,2006,32(8):102-106.
- [2] 杨大明,陈金华,李龙澍. 安徽省干旱灾害监测及预警服务系统研究[J]. 气象,2006,32(3):114-118.
- [3] 陈怀亮,冯定原,邹春辉. 河南省干旱遥感监测信息系统[J]. 气象,1999,25(6):50-53.
- [4] 张春桂,李文. 福建省干旱灾害卫星遥感监测应用研究[J]. 气象,2004,30(3):22-25.
- [3] 李星敏,王钊,刘安麟. 陕西省干旱遥感监测业务化及应注意的问题[J]. 气象,2005,31(12):73-76.
- [5] 肖乾广,陈维英. 用气象卫星遥感监测土壤水分的试验研究[J]. 应用气象学报,1994,5(3):312-317.
- [7] 申广荣,田国良. 基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究作物缺水指数模型的实现[J]. 生态学报,2000,20(2):224-228.
- [8] 刘伟东,Baret F,张兵,等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J]. 土壤学报,2004,41(5):700-706.
- [9] Boegh E H, Soegaard N, Hanan P, et al. A remote sensing study of the NDVI-Ts relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Sahel based on high-resolution satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 69: 224-240.
- [10] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J. Normalizing the stress degree-day parameter for environmental variability [J]. Agric & Fores Meteorol, 1981, 24: 45-55.
- [11] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy temperature as a drought stress indicator [J]. Water Resour Res, 1981, 17: 1133-1138.
- [12] 张月维,何全军,赵晓利. 2005 年 7 月珠三角地表温度场的遥感监测分析[J]. 气象,2006,32(9):23-27.
- [13] 张春桂. 用 MODIS 植被指数研究福州城区空间扩展变化[J]. 气象,2006,32(10):20-26.
- [14] 齐述华,李贵才. 利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究[J]. 水科学进展,2005(1):56-61.
- [15] Coward S N, Cruickshanks G D, Hope A S. Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 18: 137-147.
- [16] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28: 940-948.
- [17] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. Remote Sensing Review, 1994, 52: 45-59.
- [18] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. Remote Sensing Environment, 1994, 49(3): 246-263.
- [19] 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 environment, 2002, 79(2): 213-224.