

利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究

齐述华^{1,2}, 李贵才^{2,3}, 王长耀², 牛 铮²

(1. 江西师范大学鄱阳湖生态环境与资源研究重点实验室, 江西 南昌 330027;

2. 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101; 3. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 利用 MODIS 植被指数和陆地表面温度产品建立全国 3 个农业气候区 NDVFTs、NDVFT 和 NDVFATI 空间, 并由 NDVFTs、NDVFT 和 NDVFATI 空间分别建立温度植被干旱指数 (TVDI)、温差植被干旱指数 (DTVDD) 和表观热惯量植被干旱指数 (AVDI) 3 个干旱评价指标研究全国干旱分布, 利用实测土壤含水量对 3 个干旱指标进行检验评价。NDVFT 空间中的湿边基本与横坐标平行, 表明当土壤水分处于饱和状态或植被完全无水分胁迫条件下, 植被和土壤对缓冲环境温度变化的能力大体相当; 由 NDVFATI 空间看出, 随着植被覆盖增加, 表观热惯量有增加的趋势。对比 3 个干旱评价指标表明: 当监测范围较大, 区域内地形复杂时, 由 NDVFTs 空间计算的 TVDI 评价干旱最合理, 由 NDVFT 空间计算的 DTVDD 在干旱监测中也具有一定的价值, 而由 NDVFATI 空间计算的 AVDI 已经不能合理评价干旱。

关键词: 干旱监测; MODIS; 温度; 温差; 表观热惯量; 植被; 干旱指数

中图分类号: TP79; S152.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)01-0056-06

利用遥感技术监测干旱的研究已取得了一定的进展, 目前遥感监测干旱的方法主要包括: 建立在时间序列植被指数基础上的植被状态指数 (Vegetation Condition Index VCI)^[1]; 通过计算实际蒸散和潜在蒸散比值评价土壤水分状况^[2]; 建立土壤水分热惯量模型进行干旱监测等研究^[3-5], 但是热惯量模型只适用于裸土或稀疏植被覆盖^[6], 在植被覆盖条件下, 通常采用其他的方法代替; Jupp 等^[7]建立的归一化温度指数 (Normalized Difference Temperature Index NDTI), 发现 NDTI 能很好地描述土壤供水能力, 并对变化的环境反应比归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index NDVI) 更灵敏, 因为 NDVI 对环境变化反应具有滞后性^[8]。尽管 NDTI 比 NDVI 对环境变化更敏感, 但遥感获取的温度信息受土壤背景信息的影响, 在不完全植被覆盖条件下, 遥感获取的温度必然受植被覆盖度的影响, 这样就有将植被指数和陆地表面温度相结合建立 NDVFTs 空间, 从而进行遥感干旱监测的研究, 最近的研究结果也表明结合植被指数和陆地表面温度研究区域土壤水分状况会得到更加合理的结果^[9-12], 齐述华等^[13]利用 8 km 分辨率的 10 d 合成 AVHRR Pathfinder 数据通过建立 NDVFTs 空间研究全国干旱分布也证实了这一点。

本文受 NDVFTs 空间在干旱监测中原理的启发, 探讨利用 MODIS 数据将昼夜陆地表面温差和表观热惯量与植被指数相结合建立 NDVFT 空间和 NDVFATI 空间, 进行干旱监测的可行性并与 NDVFTs 空间方法进行对比。

1 原 理

1.1 温度植被干旱指数 (TVDI)

研究发现陆地表面温度与植被指数呈显著的负相关关系^[14,15]。Price^[15]和 Carlson^[16]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 T_s 和 NDVI 为横纵坐标得到的散点图呈三角形; Moran 等^[17]发现散点图呈梯形, 这就是所谓的 NDVFTs 空间。由 NDVFTs 空间提取湿边和旱边方程分别为

$$T_{s-\min} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (1)$$

收稿日期: 2003-10-10; 修订日期: 2003-12-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (G200077900); 国家科技攻关计划资助项目 (2001DFBA0005)

作者简介: 齐述华 (1973-), 男, 江西婺源人, 江西师范大学副教授, 博士, 主要从事农业遥感和生态环境遥感研究。

E-mail: qishuhual1@163.com

$$T_{s-\max} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

式中 $T_{s-\min}$ 为在相应 NDVI 下的最低陆地表面温度; $T_{s-\max}$ 为在相应 NDVI 下的最高陆地表面温度; a_1 、 b_1 、 a_1 、 b_1 为回归系数, 分别为 NDVI- T_s 空间中旱边和湿边方程的截距和斜率。

在由旱边和湿边方程建立温度植被干旱指数:

$$TVDI = \frac{[T_s - (a_1 + b_1 \times NDVI)]}{[(a_1 + b_1 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI)]} \quad (3)$$

温度植被干旱指数在应用于大区域干旱监测中取得很好的效果^[13]。

1.2 温差植被干旱指数(DTVDI)

当以昼夜陆地表面温差(T)代替 NDVI- T_s 空间中的 T_s 建立 NDVI- T 二维空间。植被对昼夜温差的影响表现在: 在相同的水分条件下, 随着植被覆盖度增加, 白天的温度上升缓慢, 而晚上的温度降低也缓慢, 昼夜温差越小; 在相同植被条件下, 随着土壤水分含量的增加, 白天的温度上升缓慢, 而晚上温度降低也缓慢, 昼夜温差也越小。由 NDVI- T 空间提取的旱边和湿边方程分别为

$$T_{\min} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (4)$$

$$T_{\max} = a_2 + b_2 \times NDVI$$

式中 T_{\min} 为在相应 NDVI 下的最低昼夜陆表温差; T_{\max} 为在相应 NDVI 下的最高陆表温差; a_2 、 b_2 、 a_2 、 b_2 为回归系数, 分别为 NDVI- T 空间中旱边和湿边方程的截距和斜率。

由此计算温差植被干旱指数为

$$DTVDI = \frac{[T - (a_2 + b_2 \times NDVI)]}{[(a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_2 + b_2 \times NDVI)]} \quad (5)$$

1.3 表观热惯量植被干旱指数(AVDI)

热惯量模型在遥感监测区域干旱中得到了广泛的应用。但是热惯量模型只适用于裸土或稀疏植被覆盖条件, 所以有必要结合热惯量和植被指数研究干旱。如果假设研究范围内气象条件一致, 表观热惯量(ATI)与真实热惯量(Real Thermal Inertia RTI)呈线性关系, 就可以利用 ATI 和植被指数建立 NDVI-ATI 空间。在 NDVI-ATI 空间中, 旱边在下, 湿边在上。提取旱边和湿边方程为

$$ATI_{\min} = a_3 + b_3 \times NDVI \quad (6)$$

$$ATI_{\max} = a_3 + b_3 \times NDVI$$

式中 ATI_{\min} 为在相应 NDVI 下的最小表观热惯量; ATI_{\max} 为在相应 NDVI 下的最大热惯量; a_3 、 b_3 、 a_3 、 b_3 为回归系数, 分别为 NDVI-ATI 空间中湿边和旱边方程截距和斜率。

由 NDVI-ATI 空间计算表观热惯量植被干旱指数(AVDI):

$$AVDI = \frac{[a_3 + b_3 \times NDVI - ATI]}{[(a_3 + b_3 \times NDVI) - (a_3 + b_3 \times NDVI)]} \quad (7)$$

2 数据处理

本文利用了 2 个时相 8 d 合成陆地表面温度产品和 16 d 合成植被指数产品, 分别对应 2000 年 3 月下旬和 5 月上旬。研究区域是全国, 但是所订购的数据都缺少了几个刈幅。首先利用 MODIS 数据产品投影变换软件 MRT 作图幅拼接和投影变换, 采用 Clark1980 地球模型和 Albers 等面积投影。利用掩膜技术滤去水体和海拔大于 5 500 m(雪线高度)以及不能有效去除云影响的区域。利用统计关系模型由第 1、2 通道反射率计算地表反照率, 进而计算表观热惯量。根据全国农业气候分区(东部季风农业气候区(ACR)); 西北干旱农业气候区(ACR)); 青藏高寒农业气候区(ACR)^[18], 分别建立各农业气候区的 NDVI- T_s 、NDVI- T 和 NDVI-ATI 空间, 根据各空间分别计算 TVDI、DTVDI 和 AVDI。并分别利用 70 多个气象观测站实地观测的表层土壤含水量对以上干旱

指标进行验证评价。

3 结果与讨论

3.1 NDVF_{Ts}、NDVF_T和NDVFATI空间

以NDVI为横坐标, 分别以 T_s 、 T 和ATI为纵坐标, 建立3个农业气候大区3月下旬和5月上旬的NDVF_{Ts}、NDVF_T和NDVFATI空间(限于篇幅文中只列出5月上旬, 见图1、图2、图3)。

从图1的NDVF_{Ts}空间可以看出随着植被指数的增加, 最大陆地表面温度和最小陆地表面温度差值有减小的趋势, 在植被覆盖度变化范围较大的情况下为梯形, 较小的情况下为三角形, 由此特征空间确定旱边和湿边方程, 旱边斜率基本都是小于0, 而湿边斜率大于0。

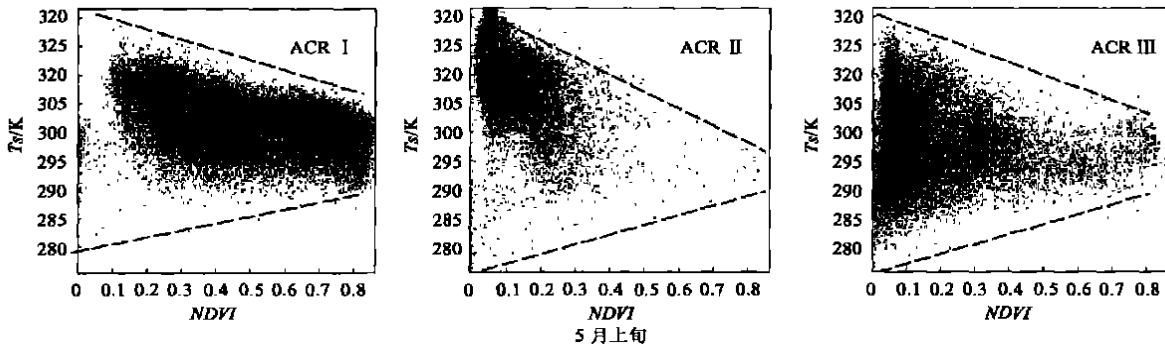


图1 2000年5月上旬各农业气候区的NDVF_{Ts}空间

Fig.1 NDVF_{Ts} spaces for every ACRs in China for the first ten day in May 2000

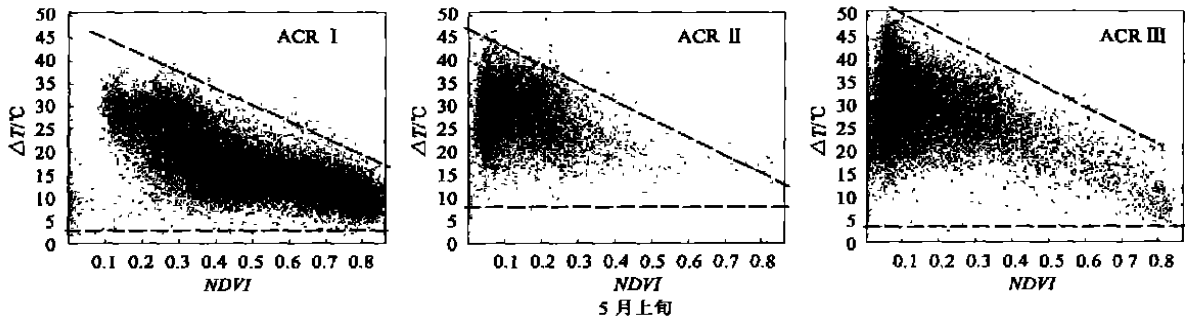


图2 2000年5月下旬各农业气候区的NDVF_T空间

Fig.2 NDVF_T spaces for every ACRs in China for the first ten day in May 2000

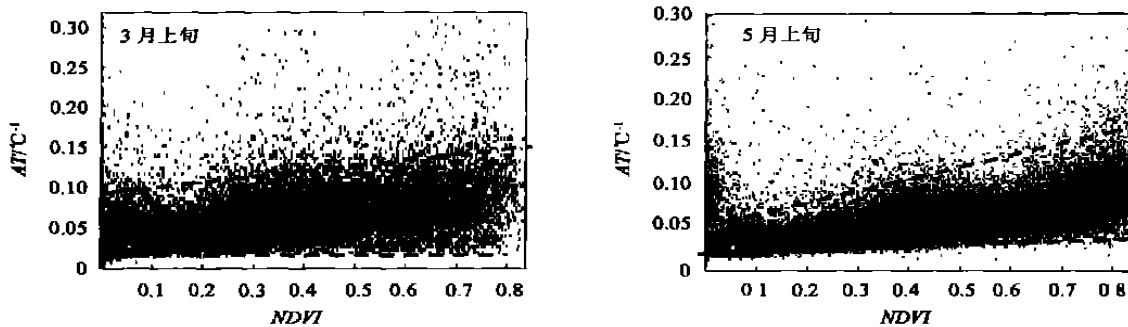


图3 2000年3月下旬和5月上旬全国范围的NDVFATI空间

Fig.3 NDVFATI spaces for China in the last ten day in March and first ten days in May 2000

从图 2 的 NDVI-T 空间可看出，随着植被指数增加，昼夜温差有降低的趋势，且昼夜温差的变化范围变小，说明植被具有缓冲环境温度变化的作用。此外 NDVI-T 中的湿边基本都与横坐标平行，这表明当土壤水分处于饱和状态或植被完全无水分胁迫条件下，植被和土壤缓冲环境温度变化的能力大体相当。

由于 3 个气候区的 NDVI-ATI 空间中旱边方程基本相同，而且西北干旱气候区难以建立典型的 NDVI-ATI 空间，在这里对 NDVI-ATI 不采取分区方案，直接建立全国范围的 NDVI-ATI 空间。NDVI-ATI 中，旱边在下，湿边在上，旱边和湿边方程斜率都大于 0，表明无论在完全无水分胁迫还是完全无水分蒸发的条件下，随着植被覆盖增加，表观热惯量有增加的趋势，这可以由两个方面进行解释：在相同的土壤水分条件下，随着植被覆盖度的增加，白天用于蒸散发所消耗的潜热增加，白天升温相对较小，表观热惯量有增加的趋势；植被冠层本身的热惯量大于土壤热惯量。此外发现在图示的湿边之上的像素点除了分布在水体范围之外主要分布在热带雨林覆盖区，这些地区降水非常丰富，所以认为在湿边之上的像素点处于完全无水分胁迫状态，即 $AVDI = 0$ 。

3.2 TVDI、DTVDI 和 AVDI 及其与表层土壤含水量的比较

图 4 分别为 3 月下旬和 5 月上旬 TVDI、DTVDI 和 AVDI 的空间分布。图中空白区域为缺数据区和没有有效去除云影响的地区。TVDI 与 DTVDI、AVDI 的空间分布模式存在较大的差异。由于在青藏高寒农业气候区控制昼夜温差的主要因素不只是土壤水分或植被覆盖，由于地区海拔较高，昼夜温差本身就很大，DTVDI 和 AVDI 有增加的趋势，从而高估干旱严重性。在东部季风农业气候区，由于北方昼夜温差普遍高于南方，这样也掩盖了土壤水分和植被覆盖条件对陆地表面温度的影响。

文中获取的 TVDI 空间分布与利用 NOAA pathfinder 数据建立的 NDVI-Ts 空间计算的 TVDI 结果基本一致^[13]，在 2000 年 3 月下旬全国受旱区域主要分布在西北干旱农业气候区的准葛尔盆地和塔里木盆地及青藏高寒气候区中的柴达木盆地，到 5 月份受旱范围扩展到东北的部分地区和华南和华东的大部分地区。

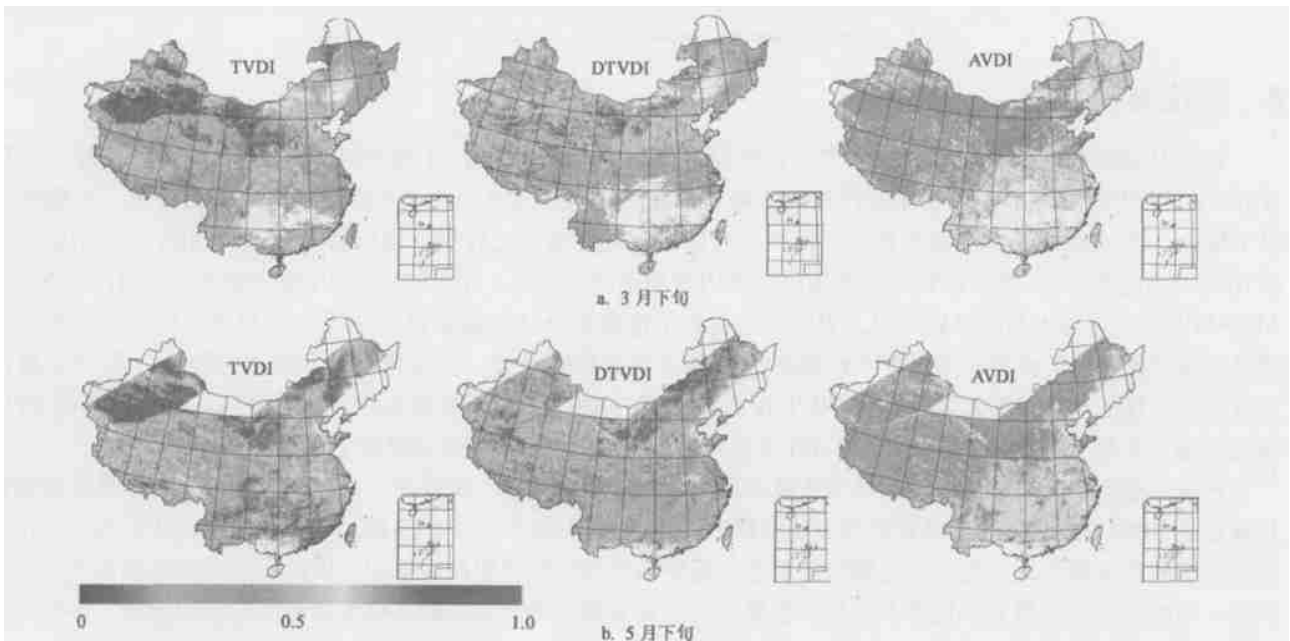


图 4 2000 年 3 月下旬和 5 月上旬 TVDI、DTVDI 和 AVDI 空间分布示意图(白色区域为缺数据或云覆盖区域)

Fig. 4 TVDI, DTVDI and AVDI spatial pattern for China in the last ten day in March and the first ten day in May in 2000 (white space are cloudy covered or scare to data)

图 5 分别对这 3 个干旱评价指标与实测的表层土壤水分进行对比，结果表明：TVDI 与表层土壤水分之间极显著相关，也就是利用 TVDI 作为干旱评价最合理；尽管 DTVDI 与表层土壤含水量之间表现显著相关，表明在干旱监测的应用中具有一定的价值，但其相关水平显然不如 TVDI，而 AVDI 就根本不能胜任干旱评价的任务

了。这主要是由于研究范围较大的情况下，陆地表面接收的净太阳辐射并不一致，加上地形和气候因素的影响，在青藏高寒气候区由于海拔高，地表接收的净辐射能量大，晚上地表能量很容易辐射散失，引起该地区普遍昼夜温差大，从而影响昼夜温差在干旱评价中的应用。也许研究范围内气候条件一致而且地形变化不大的情况下，DTVDI和AVDI可以用于干旱评价。

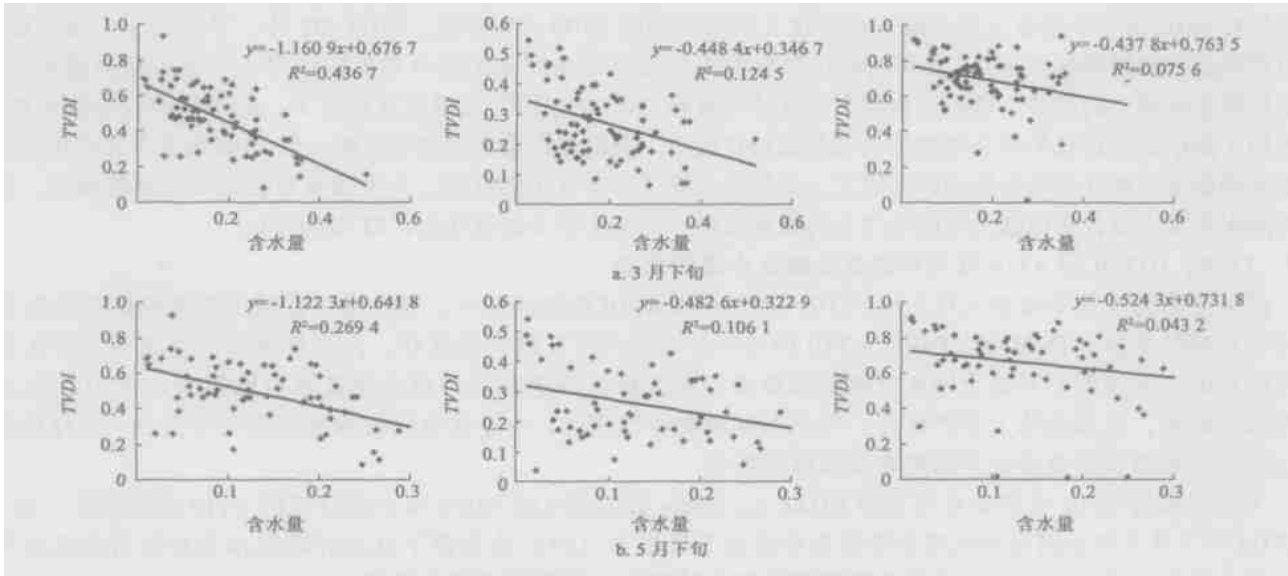


图5 实测表层土壤湿度与 TVDI、DTVDI 和 AVDI 的比较

Fig. 5 Comparison between topsoil moisture and TVDI, DTVDI, AVDI

4 结论与展望

利用 MODIS 温度和植被指数数据产品，分别建立 NDVF_{Ts}、NDVF_T 和 NDVF_{ATI} 空间，在此基础上分别计算 TVDI、DTVDI 和 AVDI 3 个干旱评价指标对 2000 年 3 月下旬和 5 月上旬全国干旱分布进行评价，主要得到以下结论：在西北干旱农业气候区，由于 3 月份高植被覆盖区比较少，难以建立典型的 NDVF_{Ts}、NDVF_T 和 NDVF_{ATI} 空间；由于研究区域范围内气象因素的空间异质性，NDVF_{Ts} 空间中湿边斜率大于 0；NDVF_T 空间中的湿边基本与横坐标平行，表明当土壤处于饱和和水分状态或植被完全无水分胁迫条件下，植被和土壤对环境温度变化的抑制作用强度大体相当；随着植被指数增加，表观热惯量有增加的趋势；当监测范围较大，并且区域内地形复杂时，由 NDVF_{Ts} 空间计算的 TVDI 评价干旱最合理，由 NDVF_T 空间计算的 DTVDI 也具有一定的应用价值，而由 NDVF_{ATI} 空间计算的 AVDI 已经不能合理评价干旱。

这些方法应用于地形条件一致的小区域范围的合理性还有待进一步研究。此外结合加权真实热惯量与植被指数建立 NDVF_{RTI} 空间，依据相似的方法获取 RVDI 干旱指标将是一个很有前景的干旱监测方法，因为 RTI 是生态系统的固有属性，不受研究范围气象因素、地形条件等空间异质性的影响，因此不受研究区域范围大小的限制。当然这种方法需要其他更多的辅助数据来计算真实热惯量，同时需要白天和晚上的瞬时影像，不是合成数据产品能做的。

参考文献：

- [1] 冯强. 中国干旱遥感监测系统的研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2001.
- [2] 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[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 220 - 224.
- [3] 薛勇. 用热惯量方法监测土壤含水量的研究[D]. 北京: 北京大学, 1989.
- [4] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟. 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): 8.
- [5] Xue Y, Cracknell A P. Advanced thermal inertial modeling[J]. Int J Remote Sensing, 1995, 16(3): 431 - 446.

- [6] 宋连春, 邓振镛, 董安祥, 等. 全球变化热门话题丛书—干旱[M]. 北京:气象出版社, 2003. 30.
- [7] Jupp D L B, Tian G, McVicar T R, *et al.* Monitoring soil moisture and drought using AVHRR satellite data, I: theory[A]. CSIRO Earth Observation Technical Report[C]. Canberra, ACT. 1998.
- [8] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 79(2):213 - 224.
- [9] Goetz S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15):71 - 94.
- [10] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurement: a exploration with the simplified biosphere model[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 79(2) 225 - 242.
- [11] Friedl M A, Davis F W. Source of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie[J]. *Remote Sens Environ*, 1994, 48(1):1 - 17.
- [12] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeastern Australia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(10):2021 - 2044.
- [13] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. *遥感学报*, 2003, 7(5):420 - 427.
- [14] Goward 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 SENS. ENVIRON*, 1994, 49:246 - 263.
- [18] 中国地图出版社. 中国自然地理图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1998. 48.

Study on monitoring drought in China with MODIS product^{*}

QI Shu-hua^{1,2}, LI Gui-cai^{2,3}, WANG Chang-yao², NIU Zheng²

(1. Key Lab. of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China;

2. LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the 16 days composite Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and 8 days composite land surface temperature product in China are used to establish NDVI-Ts, NDVI-T and NDVI-FATI space. From these spaces, temperature vegetation dryness index (TVDI), difference temperature vegetation dryness index (DTVDI) and apparent thermal inertia vegetation dryness index (AVDI) are suggested respectively to evaluate drought in every three agricultural climatic regions in China. The measured topsoil moisture is used to compare with TVDI, DTVDI and AVDI. From NDVI-T spaces, we found that the wet edges are all parallel to the abscissa and the wet soil has the same power to hold back temperature change with the vegetation non-water stress. In NDVI-FATI space, ATI increases with the increase of NDVI. After we compare the measured topsoil moisture with TVDI, DTVDI and AVDI, the result shows that TVDI has a more significant linear correlation with soil moisture than the other two, and TVDI is the most promising method in monitoring drought for large region; DTVDI still has the potential on monitoring drought while AVDI is not competent for monitoring drought.

Key words: drought monitoring; temperature; difference temperature; apparent thermal inertia; vegetation; dryness index

* The project is supported by the National Basic Research Program of China (G20077900).