

水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究*

齐述华^{1, 2} 张源沛³ 牛 铮² 王长耀² 郑 林¹

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

(2 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

(3 宁夏农林科学院资源与环境研究所, 银川 750000)

摘 要 水分亏缺指数(WDI)是建立在作物水分胁迫指数理论上,并假设陆地表面温度是冠层温度与土壤表面温度线性加权及土壤与植被冠层之间不存在感热交换的情况下,结合陆气温差与植被指数得到的区域干旱评价指标。本文利用 MODIS Terra 陆地表面温度和植被指数数据产品,采用 NDVI-Ts 空间法分别计算了 2000 年 4 月上旬和 5 月中旬气温空间分布的基础上,结合陆气温差和植被指数计算全国范围 WDI,并与表层土壤含水量进行对比。结果表明:WDI 能够比较合理地用来监测区域干旱,不仅适用于裸地条件,还能够有效地应用于完全植被或部分植被覆盖条件下的干旱监测,克服了 CWSI 只能应用于郁闭植被冠层的限制。

关键词 干旱; 遥感; 水分亏缺指数; MODIS

中图分类号 TP75 文献标识码 A

可见光和近红外遥感获取土壤水分状况一般通过建立光谱反射率与土壤湿度经验关系来实现, Liu 等^[1]的研究结果表明在一定的土壤湿度范围下,反射率随土壤湿度增加而减小,超出临界范围反射率将随土壤湿度增加而增大。刘伟东等^[2]比较分析 5 种方法探讨反射率与土壤湿度关系,对利用可见光和近红外波段反射率获取土壤湿度进行了有益探索。在这里我们试图结合可见光和近红外遥感获得的光谱植被指数和热红外遥感获取的陆地表面温度,实现全国干旱遥感监测。

实验和理论研究都表明利用植被叶片温度可以获得植被和土壤信息^[3, 4],比如建立叶片温度与土壤水分^[3, 5]、植物水分胁迫程度及冠层蒸腾速率^[6]等之间的关系。作物水分胁迫系数(Crop Water Stress Index, CWSI)是由 Jackson 等^[6]和 Idso 等^[4]提出的一个建立在冠气温差基础上评价植物受水分胁迫程度的指标。通常确定 CWSI 的方法是:利用不同气象条件下植被在完全无水分胁迫条件下最小冠气温差和完全无水分蒸腾条件下的最大冠气温差及实际冠气温差来计算, Jackson 等^[7]根据能量平衡原理和 Penman-Monteith 方程,提出了计算最大和最小

冠气温差公式。Idso^[8]认为冠气温差上下极限的差异是由水汽压差的不同所引起的,并认为冠气温差下限与水汽压差表现线性关系,并列出一系列作物这种线性关系的斜率和截距,而上限随水汽压差的变化保持相对稳定。

但遥感传感器所获得的陆地表面温度往往是陆地表面土壤和植被的混合温度, CWSI 理论应用于像元尺度时存在一定困难。因此有研究者利用双源模型计算部分植被覆盖条件下实际蒸散与潜在蒸散的比值,从而确定 CWSI,评价区域干旱^[9],但是这种方法需要输入大量难以获取的陆表参数(如植被冠层高度、土地覆盖类型等)。Moran 等^[10]建立的水分亏缺指数(Water Deficit Index, WDI)对 Idso 和 Jackson 等提出的 CWSI 应用范围进行了扩展,克服了 CWSI 只能应用于观测点尺度的郁闭植被冠层条件的缺陷。WDI 结合陆气温差(陆地表面温度和气温的差值)和植被指数估算田间相对水分状况。当以陆气温差和植被覆盖度为横纵坐标时,在研究范围足够大,并且范围内具有所有植被覆盖条件和土壤水分含量范围条件下,数据点会形成一个梯形。由于光谱植被指数能够反映植被覆盖度的相对大小,因

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-02)和江西师范大学博士启动基金资助

作者简介:齐述华(1973~),男,理学博士,副教授,主要研究方向为农业遥感和生态环境遥感。E-mail: qishuhua@163.com

收稿日期:2004-06-07;收到修改稿日期:2004-10-12

此可以直接利用光谱植被指数替代植被覆盖度。事实上, 大量的研究采用类似的方法, 建立陆地表面温度为横坐标, 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)为纵坐标的NDVI-Ts空间, 通过NDVI-Ts空间计算温度植被干旱指数(Temperature/Vegetation Dryness Index, TVDI)^[11, 12], 实现区域干旱监测, 但陆地表面温度受纬度地带性和垂直地带性的影响, 评价我国这样纬度跨度大和地形复杂的土壤水分状况存在一定的缺点。而陆气温差能够反映陆地生态系统中水汽运动驱动力大小, 在一定程度上克服地带性影响, 因此WDI比TVDI有更强的理论依据。

本文采用Terra卫星MODIS传感器8天合成的陆地表面温度产品(MOD11A2)和16天合成的植被指数产品(MOD13A2), 以WDI为干旱评价指标, 研究我国2000年4月上旬和5月中旬干旱发生情况, 并利用120个气象观测站收集的表层土壤水分评价以WDI作为干旱指标的可行性。

1 理 论

1.1 作物水分胁迫系数

Jackson等^[6]在利用Penman-Monteith方程分别计算冠层实际蒸散与潜在蒸散的基础上提出:

$$CWSI = 1 - (L_c) / (L_p) = [\gamma(1 + r_c/r_a) - \gamma'] / [\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)] \quad (1)$$

式中, L_c 为实际蒸散量, L_p 为潜在蒸散量, $\gamma' = \gamma(1 + r_{cp}/r_a)$, r_{cp} 是植被在潜在蒸腾速率蒸腾时的冠层阻力(此时蒸腾速率等于潜在蒸腾); Δ 是饱和水汽压与温度关系曲线的斜率; γ 为干湿表常数(kPa K^{-1}); r_a 是空气动力学阻力(s m^{-1}); r_c 是冠层对水汽向空气中传输阻力(s m^{-1})。对(1)式的一个等价的方法是分别计算冠气温差的上下限:

$$CWSI = [(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{\min}] / [(T_c - T_a)_{\max} - (T_c - T_a)_{\min}] \quad (2)$$

式中, T_c 是冠层温度, T_a 为气温。在忽略光合作用固定的太阳能和冠层内部所保存能量情况下, 根据冠层能量平衡原理, 冠气温差可以表达为表达式为:

$$(T_c - T_a) = [r_a R_n / C_v] [\gamma(1 + r_c/r_a) / \{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)\}] - [VPD / \{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)\}] \quad (3)$$

式中, R_n 是净辐射通量, G 是土壤热通量, H 为感热通量; C_v 是空气体积热容(J K m^{-3}); VPD 是水汽压

差(kPa)。这样就可以根据式(3)分别计算冠层阻力最大和最小时的冠气温差上下限, 根据实测冠气温差, 由式(2)可以得到作物水分胁迫系数。根据式(3)可以获得植被冠层阻力最大和最小时的冠气温差。

在裸土条件下, 利用CWSI理论同样可以得到评价裸土条件下衡量土壤湿度的指标, 有研究者称其为土壤干旱指数(Soil Water Stress Index, SWSI)^[13]:

$$SWSI = 1 - E / E_p \quad (4)$$

式中, E 为实际土面蒸发, E_p 是土壤潜在蒸发。与CWSI相似, SWSI可以表达为:

$$SWSI = \frac{\gamma(1 + r_s/r_a) - \gamma'}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (5)$$

式中, r_s 是土壤水汽扩散阻力, 根据CWSI的表达式, SWSI同样可以表达为:

$$SWSI = [(T_o - T_a)_m - (T_o - T_a)_{\min}] / [(T_o - T_a)_{\max} - (T_o - T_a)_{\min}] \quad (6)$$

其中 T_o 为土壤表面温度。根据能量平衡原理分别计算干土(土壤水汽扩散阻力为 ∞)和湿土(土壤水汽扩散阻力为0)的土气温差:

$$(T_o - T_a)_{\min} = [r_a(R_n - G) / C_v] [\gamma / (\Delta + \gamma)] - [VPD / (\Delta + \gamma)] \quad (7)$$

$$(T_o - T_a)_{\max} = [r_a(R_n - G) / C_v] \quad (8)$$

1.2 水分亏缺指数

由于遥感传感器所获得陆地表面温度往往是陆表土壤和植被的混合温度, 因此有研究者利用双源模型从理论上计算部分植被覆盖条件下实际蒸散与潜在蒸散的比值实现区域干旱监测^[9]。但是这样的方法需要输入难以获取的大量气象和地表特征参数(如土地覆盖类型、植被高度等), 而且在计算部分植被覆盖下的冠层阻力和空气动力学阻力也很复杂, 这限制了机理模型在大区域干旱监测中的应用。Moran等^[10]考虑到以下两个方面的原因:(1)CWSI的多数理论参数与植被覆盖度有近线性关系;(2)完全植被覆盖和裸土条件下的很多属性参数相对容易获取, 以CWSI理论为基础, 结合植被指数和陆地表面温度评价部分植被覆盖条件下土壤湿度的VIT(Vegetation Index/Temperature)法(见图1)。在图1中的四个顶点的 F 、 G 、 D 、 E 分别代表冠层阻力最大郁闭冠层、冠层阻力最小郁闭冠层、湿裸地和干裸地条件下的陆气温差($T_s - T_a$)。它们可以分别由式(3)、式(7)、式(8)式计算获取, 这样对于任意生长条件下的植被就可以由测定的植被覆盖度和陆地表面温度获取水分亏缺指数。

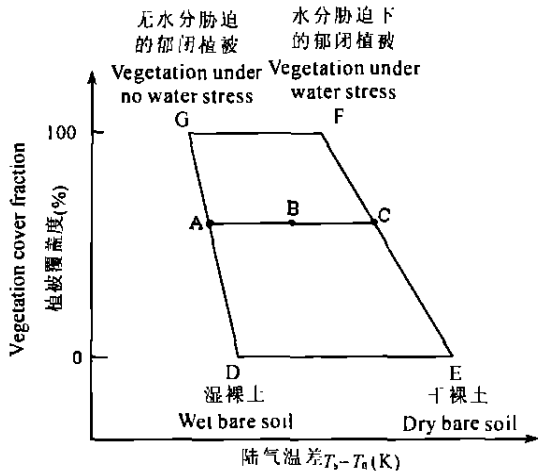


图1 WDI 示意图解

Fig. 1 A sketch map for WDI

事实上,当研究范围大的情况下,假定研究区存在各种植被覆盖条件和土壤水分条件时,可以由直角坐标系下研究区内的陆气温差和植被覆盖度散点图确定 D 、 E 、 F 、 G 点的坐标值。

此外 CWSI 理论扩展为 WDI 过程中存在以下几点假设:

(1) 陆气温差与植被覆盖度呈线性关系:

$$T_s - T_a = f_c(T_c - T_a) + (1 - f_c)(T_o - T_a) \quad (9)$$

式中, T_s 为陆地表面温度。该式经常用来描述陆地表面温度、植被冠层温度和土壤温度关系的简单表达式^[14]。这样就确保图1中的 D 和 G 点、 E 和 F 点之间能以直线连接。事实上由上式所引起的误差也是很小的($< 0.5 \text{ K}$)^[15];

(2) 在一定的气象条件下,冠气温差、土气温差分别与植被蒸腾速率、土面蒸发速率成线性关系:

$$\begin{aligned} T_c - T_a &= a + b(T) \\ T_o - T_a &= a' + b'(E) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 a 、 a' 、 b 、 b' 分别是经验系数, T 和 E 分别是冠层蒸腾速率和土面蒸发速率。在植被全覆盖或裸土条件下,该假设是成立的^[16],在部分植被覆盖条件下,如果不存在土壤与植被之间的对流热交换,这个假设也能成立。这样 WDI 可以表达为:

$$WDI = 1 - L_c/L_p = [(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_r] / [(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_{\min}] \quad (11)$$

这样 WDI 就可以由 VI 中的线段长度的比值计算

获得(如图1):

$$WDI = \frac{|AB|}{|AC|} \quad (12)$$

如果不存在土壤与植被之间的对流热交换,WDI 与 CWSI 相等。

有很多研究表明在大区域范围内光谱植被指数与植被覆盖度存在显著线性关系^[17],这样图1中的植被覆盖度可以由植被指数代替,任何植被指数条件下的最大和最小陆气温差都可以获取:

$$\begin{aligned} (T_s - T_a)_{\max} &= c_0 + c_1(VI) \\ (T_s - T_a)_{\min} &= d_0 + d_1(VI) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 c_0 、 c_1 、 d_0 、 d_1 分别是图1中线段 EF 和 DG 线性回归系数, VI 是植被指数(Vegetation Index)。

2 数据处理

利用空间分辨率为 1 km 的 8 d 合成 MOD11A2 陆地表面温度产品和 16 d 合成 MOD13A2 植被指数产品,计算2000年4月上旬、5月中旬全国范围水分亏缺指数。具体处理过程为:

(1) 利用 MODIS 数据产品处理软件 MRT 做图像拼接,并采用 Albers 投影;

(2) 利用研究区内 $NDVI-T_s$ 空间计算气温的空间分布⁽¹⁾;

(3) 计算陆气温差;

(4) 以较小植被指数步长分别提取三个农业气候区(西北干旱农业气候区、东部季风农业气候区和青藏高原农业气候区)在不同植被指数下的最大和最小陆气温差;

(5) 利用式(11)计算全国水分亏缺指数。

3 结果与讨论

图2是全国2000年4月上旬和5月中旬的水分亏缺指数空间分布情况,可以看出我国4月份受旱范围很广,到5月上旬受旱范围减少。中国版图中白色区域是由于受云的影响,没有获得白天陆地表面温度的区域。图3是 WDI 与表层土壤含水量的比较。尽管 WDI 与土壤含水量相关性显著,从图3的两个时相的对比看出,干旱指标在4月份与土壤水分含量的相关性比5月份更显著。这可能是由于

(1) 齐述华,王军邦,王长耀,等. 利用 MODIS 遥感影像获取近地层气温的方法研究. 遥感学报. (已接受)

在五月份土壤表面温度与冠层温度之间的差异更大,

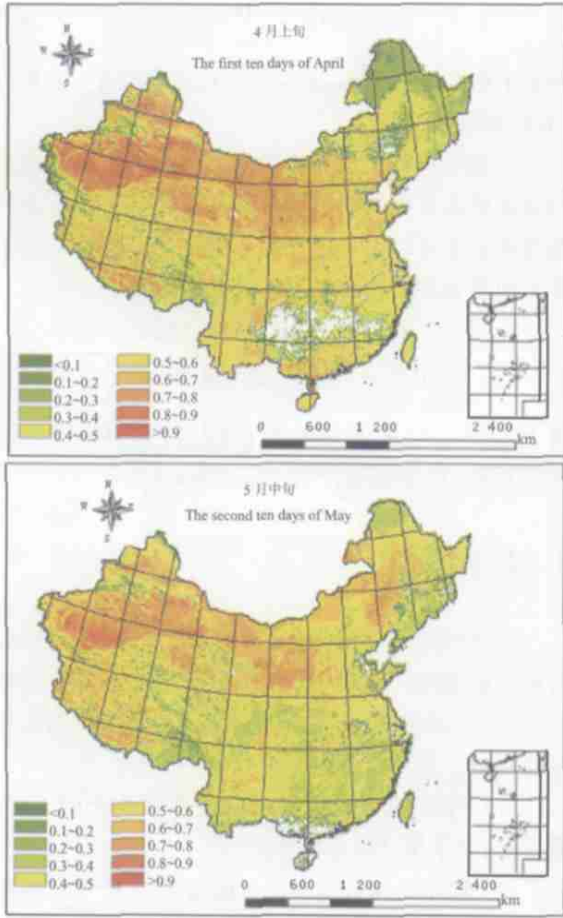


图2 2000年4月上旬和5月中旬 WDI 空间分布 (白色区域为云覆盖区)

Fig. 2 The WDI spatial pattern for the first ten days of April and second ten days of May in 2000

土壤与冠层之间有更多的感热交换发生,从而引起 WDI 偏离 CWSI 更大所引起的。从这个原因看, WDI 更适用于春秋季节的干旱监测,在夏季引起的误差会比较大。在稀疏植被覆盖条件下,土壤和植被与大气之间的能量交换不是孤立地进行的,在干旱的土壤表面具有较高的温度(相对植被冠层),这样就有感热通量进入植被冠层。为了解释土壤—植被—大气之间的这种能量传输关系,建立多源模型分别解释各组元的能量交换关系。这种模型都是建立在温度和各组元间(土壤—植被—大气)的感热传输阻力的基础上的^[18],这时的感热通量表达为:

$$H = C_v \{ (T_c - T_a) / r_c + (T_{soil} - T_a) / r_{soil} \} / [1 + r_a / r_c + r_a / r_{soil}] \quad (14)$$

由这样的多源模型同样可以得到 CWSI 计算式:

$$1 - L_c / L_p = [T_{sm} - T_{sr} + (r_{oo} / r_{co} - 1) f_c (T_{sm} - T_{sr})] / [T_{sm} - T_{sx} + (r_{oo} / r_{co} - 1) f_c (T_{em} - T_{cx})] \quad (15)$$

其中 r_{oo} 和 r_{co} 分别是单位陆地面积上的土壤阻力和冠层阻力,下标 m, x, r 分别代表最大、最小和测定值,可以发现式(12) WDI 是式(14)中 $f_c = 1, f_c = 0$ 或土壤和植被之间没有感热通量时的特例。虽然 Norman 等^[19]认为在植被稀疏并且分布不均匀的条件下,冠层与土壤的相互作用比在密闭条件下弱,地表蒸发与冠层蒸腾在中等风速下只有微弱的耦合(Coupling)作用,但 Moran 等^[7]在假设土壤和植被之间不存在感热通量情况下,计算的 WDI 和实际的 $1 - L_c / L_p$ 做比较发现二者还是存在一定的差别的。

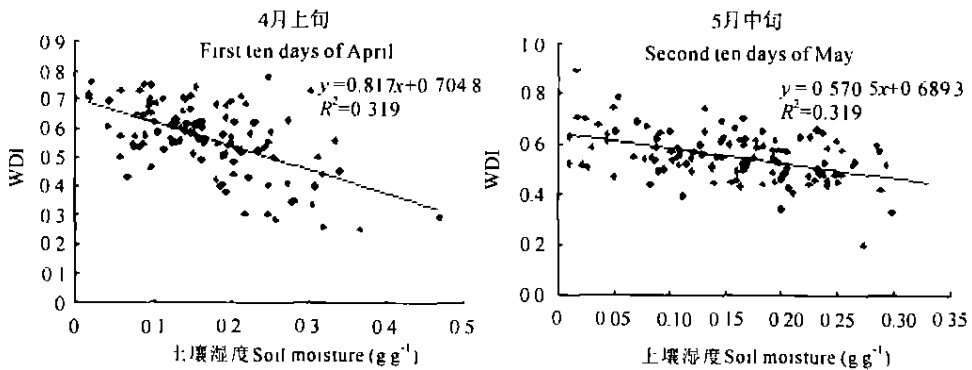


图3 4月上旬和5月中旬 WDI 与表层土壤水分含量比较

Fig. 3 The comparison between WDI and topsoil moisture

4 结 论

本文根据作物水分胁迫指数理论,在假定陆地表面温度是冠层温度与土壤表面温度线性加权及土壤与植被冠层之间不存在感热交换的情况下,结合陆气温差与植被指数,分别计算 2000 年 4 月上旬和 5 月中旬全国范围水分亏缺指数,并与表层土壤含水量对比。结果表明水分亏缺指数能够比较合理地评价干旱的发生,但从 4 月上旬和 5 月中旬 WDI 与表层土壤湿度相关性进行比较表明,在稀疏植被覆盖条件下,由于 5 月份具有较高的土壤背景温度与冠层温度差,忽略土壤与冠层之间感热通量导致 WDI 与 CWSI 有较大的差异,从而降低了 WDI 在干旱炎热夏季的适用性。

参 考 文 献

- [1] Liu W D, Baret F, Gu X F, *et al.* Reflecting soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 81(2/3): 238~ 246
- [2] 刘伟东, Baret F, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. *土壤学报*, 2004, 41(5): 700~ 706. Liu W D, Baret F, Zhang B, *et al.* Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 700~ 706
- [3] Jackson R D. Canopy temperature and crop water stress. *Adv. Irrig.*, 1982, 1: 43~ 85
- [4] Idso S B, Clawson K L, Anderson M G. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assessment and CO₂ effects of climate. *Water Resource Reserch*, 1986, 22: 1702~ 1716
- [5] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.*, 1977, 13: 651~ 656
- [6] Jackson R D, Idso D B, Reginato R J, *et al.* Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 1981, 17: 1133~ 1138
- [7] Jackson R D, Kustas W P, Choudary B J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 1988, 9: 309~ 317
- [8] Idso S B. Non-water stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 1982, 27: 59~ 70
- [9] 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. *遥感学报*, 1997, 1(3): 220~ 224. Sui H Z, Tian G L, Li F Q. The application of a dual-layer evapotranspiration modeling in drought monitoring with remote sensing (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3): 220~ 224
- [10] 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. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 49: 246~ 263
- [11] Inge S, Kjeld R, Jens A. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 79: 213~ 224
- [12] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被干旱指数(TVDI)进行全国旱情监测研究. *遥感学报*, 2003, 7(5): 420~ 427. Qi S H, Wang C Y, Niu Z. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI) (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 420~ 427
- [13] 李韵珠, 陆锦文, 吕梅, 等. 作物干旱指数(CWSI)和土壤干旱指数(SWSI). *土壤学报*, 1995, 32(2): 202~ 209. Li Y Z, Lu J W, Lv M, *et al.* Crop Water Stress Index (CWSI) and Soil Water Stress Index (SWSI) (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 202~ 209
- [14] 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. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 224~ 240
- [15] Anderson M C, Noman J M, Diak G R, *et al.* A two-source time integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60: 195~ 216
- [16] Vidal A, Perrier A. Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 1327~ 1337
- [17] Huete A R, Jackson R D. Soil and atmosphere influence on the spectra of partial canopies. *Remote Sens. Environ.*, 1988, 25: 89~ 105
- [18] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quart. J. Roy Meteor. Soc.*, 1985, 111: 839~ 855
- [19] Noman J M, Kustas W P, Humes K S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 1995, 77: 263~ 293

APPLICATION OF WATER DEFICIT INDEX IN DROUGHT MONITORING IN CHINA WITH REMOTE SENSING

Qi Shuhua^{1, 2} Zhang Yuanpei³ Niu Zheng² Wang Changyao² Zheng Lin¹

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

(2 The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3 Institute of Soil and Fertilizer, Ningxia Academy of Agricultural Science, Yinchuan 750000, China)

Abstract Crop Water Stress Index (CWSI) that was firstly suggested by Jackson and Idso to evaluate water status was expressed as a function of $(T_s - T_a)$. Since remote sensed thermal radiation is a mixture information of soil and canopy, CWSI is not applicable at the pixel scale. On the assumption that land surface temperature (T_s) is a linear function of canopy temperature (T_c), soil surface temperature (T_{soil}) and vegetation cover fraction (f_v) and that there is no coupling between soil and canopy, Water Deficit Index (WDI) that was extended from CWSI was used to evaluate regional drought. In the paper, air temperature (T_a) spatial patterns in the first ten days of April and second ten days of May in 2000 were firstly figured out with $NDVI-T_s$ (where $NDVI$ is Normalized Difference Vegetation Index) space with Terra MODIS land surface temperature and vegetation index product. Then Water Deficit Index (WDI) was calculated based on $(T_s - T_a)$ and $NDVI$. The comparison between WDI and topsoil moisture show that WDI can reach a satisfactory estimation of field water deficit for both full-covered and partially vegetated sites and have overcome the shortage of CWSI that can only work for the site of fully covered by vegetation.

Key words Drought; Remote sensing; Water Deficit Index (WDI); MODIS