

基于地表温度-植被指数特征空间的 区域土壤干湿状况

杨 曦, 武建军*, 闫 峰, 张 洁

(地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 环境演变与自然灾害教育部重点实验室
(北京师范大学), 北京 100875; 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要:土壤干湿状况是监测土地状况的重要指标之一,在水文、气候和生态等多个领域有广泛应用。地表温度-植被指数特征空间(T_s/VI)综合了传感器从可见光到近红外波段的信息,能较好地反映区域土壤干湿状况。以华北平原作为研究区,选择了研究区的云量较少的 16 幅 MODIS 产品,包括每日 500m 地表反射率产品(MOD09GA),每日 1km 地表温度产品(MOD11A1),建立温度-植被指数特征空间。首先利用线性方程拟合了特征空间的上下边界,改进了计算特征空间的干湿边的方法,并分析了干湿边参数随时间变化的趋势,比较了归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(EVI)构建的地表温度-植被指数特征空间形状的差异。基于研究区 107 个土壤湿度站点的数据,讨论分别由 $T_s/NDVI$ 和 T_s/EVI 特征空间计算得到的温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, 简称 TVDI, 分别为 $TVDI_N$ 与 $TVDI_E$)和土壤湿度的相关性,以此验证 TVDI 反映区域土壤干湿状况的能力。利用 T_s/EVI 空间计算得到的 TVDI 分析了研究区 4 个时期土壤湿度的 5 空间分布规律。同时在气象站点尺度上,讨论了 TVDI 与降水变化的相关性。研究结果表明,TVDI 能够反映土壤表层的干湿状况; T_s/EVI 空间计算得到的 TVDI 与土壤湿度的相关性比 $T_s/NDVI$ 空间计算得到的 TVDI 与土壤湿度的相关性要高。降水随时间变化的规律和 TVDI 也有明显的相关性,即:每次连续降水以后 TVDI 值下降,表明土壤湿度升高;经过一段无降水的时间之后,TVDI 值上升,土壤湿度降低。研究区不同时期的 $TVDI_E$ 图表明,TVDI_E能够有效的反映土壤湿度的时空差异,是一种有效的实时监测土壤干湿状况的手段。

关键词: TVDI; 土壤干湿状况; 华北平原

文章编号: 1000-0933(2009)03-1205-12 中图分类号: Q149 文献标识码: A

Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space

YANG Xi, WU Jian-Jun*, YAN Feng, ZHANG Jie

State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875, China

Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China

Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1205 ~ 1216.

Abstract: Soil moisture has been considered as one of the most important indicators of soil conditions, and the measurement of soil moisture has been widely used to monitor the status of soil in the fields of hydrology, meteorology and ecology. Surface temperature/vegetation index space (T_s/VI) synthesizes the information from both visible and near-infrared bands of the processed remote sensing image products. Therefore, it can be used to assess the status of soil moisture.

In this paper, the North China Plain was chosen as the study area. Sixteen MODIS/Terra images with relatively less cloud shadow contamination, including the surface reflectance daily L2G 500m and 1km product (MOD09GA) and the land surface temperature daily 1km product (MOD11A1), were used to establish the T_s/VI space. In the establishment of the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC40601091); 国家高技术研究与发展资助项目(2006AA12Z142); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD20B02)

收稿日期: 2008-08-06; 修订日期: 2008-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjj@bnu.edu.cn

T_s/VI space, Linear regression functions were used to approximately fit the lower and upper boundaries of the T_s/VI space so that the dry and wet edges of the space can be determined. Furthermore, the trend of changes in the parameters of the two edges was analyzed in the time series. Two surface temperature/vegetation index spaces were established based on the $T_s/NDVI$ and the T_s/EVI , and the difference between the characteristics of the shapes in these two spaces were investigated. Based on the data obtained from the 107 soil moisture stations in the study area, the correlation between the Temperature Vegetation Dryness Index (*TVDI*) which was calculated from the $T_s/NDVI$ and the T_s/EVI spaces and the soil moisture was developed and analyzed. The development of the correlation provides a way to use the *TVDI* to infer soil moisture status. In this paper, the *TVDI* calculated from T_s/EVI in the study area was used to assess the spatial distribution of soil moisture in the four different crop growth stages. Moreover, the relationship between the *TVDI* and rainfall was also investigated in those regions with rainfall data from the meteorological stations.

The results show that *TVDI* can be successfully used to infer the near surface soil moisture status. The *TVDI* calculated from T_s/EVI has a better correlation with soil moisture comparing to the *TVDI* calculated from $T_s/NDVI$. It is also found that there is a similar trend in the change of the *TVDI* and rainfall in the time series. Continuous rainfall for a certain time is followed by a decline in the *TVDI* which indicates the increase of soil moisture, and vice versa. The analysis of the *TVDI* and soil moisture changes of the study area in the different crop growth stages shows that the *TVDI* space calculated from T_s/EVI can effectively reflect the spatial difference of soil moisture. Therefore, it provides a useful method to monitor and assess the status of regional soil moisture.

Key Words: *TVDI*; soil moisture; North China Plain

土壤干湿状况是监测土地状况的重要指标之一,是作物生长的决定性因素,在水文、气候等领域都有广泛的应用^[1]。土壤湿度的时空分布对径流的影响十分重要,而错误地估计土壤湿度分布会对径流估计产生巨大的影响^[2]。土壤湿度同样是陆地生态系统重要的输入因子,它是地气能量和水分交换的重要因素^[3]。因此,准确地空间上和时间上估计土壤干湿状况对理解地球系统有着重要的意义^[4]。

相对于传统的土壤干湿状况监测方法,遥感技术具有监测范围广,时效性强的特点。利用热惯量、植被指数、地表温度、亮度温度、后向散射系数等变量,建立了众多的遥感信息模型以反映土壤水分含量^[1,4-17]。植被指数-地表温度特征空间综合植被指数和地表温度信息,可以增进对土壤湿度状况的理解,是近年来广泛使用的土壤水分估算模型^[18,19]。通过特征空间计算得到温度植被干旱指数 (temperature vegetation dryness index, *TVDI*) 可以反映土壤湿度状况^[13,20-22]。特征空间所需数据较少,获取方便,计算得到的植被温度干旱指数的物理意义明确。同时,由于 Terra/Aqua 卫星的重访周期较短,可以在较短时间内获取植被指数和地表温度的数据,使得快速实时地监测区域土壤湿度状况成为了可能。

特征空间的关键参数包括地表温度,植被指数,干边和湿边参数。植被指数最常用的是 *NDVI*,近年来研究发现增强型植被指数 (enhanced vegetation index, *EVI*) 相比 *NDVI* 有诸多优势^[12]。在前人对特征空间的研究中,植被指数的选择以 *NDVI* 为主^[13,20,21],利用 $T_s/NDVI$ 和 T_s/EVI 构建的特征空间的优劣尚未有人比较过。此外,在计算湿边时,以前的方法比较主观,可重复性差,而且一般将其视为平行于植被指数轴的一条直线^[13,23],而实际湿边往往是一条倾斜的直线^[24,25]。因此,特征空间的参数需要通过更合理的方式确定,从而能更好地反映地表干湿状况。

本文以华北平原为研究区,首先分析比较利用两种植被指数 (*NDVI*, *EVI*) 构建的特征空间参数的特征。此后比较了二者在反映土壤干湿状况时的差异,然后利用土壤墒情站点的实测结果作了验证。在气象站点尺度上,分析了 *TVDI* 与降水的关系。最后在研究区尺度上,分析了 *TVDI* 的空间分布规律。

1 研究区概况

本文选择的研究区属于华北平原的一部分,如图 1 所示,为了避免地形高程对植被指数的影响^[25],选择

了平均海拔 100m 以下的区域。由于气象和土壤湿度站点是以行政区划为单位分布,在选择研究区时同时考虑了行政区划的因素。本文的研究区包括山东省全省,河北省南部,河南省东部和中部以及江苏省和安徽省北部,位于东经 110°59′至 122°34′,北纬 31°1′至 39°59′间。总面积 453262.9km²。研究区暖温带大陆性气候,四季变化明显,为干旱易发区,年均温 8~15℃,年降水量 600~800mm。

2 数据及研究方法

2.1 数据预处理

研究所使用的遥感数据为来自于美国 NASA EOS Data Gateway 的 MODIS 产品,包括 2002 年研究区每日反射率 500m 分辨率产品 (MOD09A1),每日地表温度 1km 分辨率产品 (MOD11A1)。该产品经过几何校正、大气校正等处理,已经可以用于科学实验^[26]。反射率产品共有 7 个波段,本文利用反射率数据计算了归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, *NDVI*) 和增强型植被指数 (*EVI*)^[12]:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

$$EVI = G \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + C_1 \times \rho_1 - C_2 \times \rho_3 + L} \quad (2)$$

式中, ρ_1, ρ_2, ρ_3 分别是 MODIS 传感器的第 1 波段 (620~670nm),第 2 波段 (841~876 nm),第 3 波段 (459~479 nm) 反射率。系数 $G=2.5, C_1=6, C_2=7.5, L=1$ 。

由于 MODIS 反射率产品的分辨率是 500m,而地表温度产品分辨率是 1km,为了统一二者的分辨率,首先将反射率产品计算所得的植被指数将合成为 1km 分辨率的植被指数。然后,通过 MODIS 产品自带的质量检测文件,剔除所有受云污染的像元。MODIS 产品原始的投影为正弦投影 (sinusoidal projection),本文中利用 NASA 研发的 MODIS reprojection tool (MRT) 将投影转为 lambert conformal conic 投影 (中央经线东经 105 度,两条标准纬线为北纬 25°和北纬 47°)。

研究所使用的气象数据和土壤湿度数据来自于中国气象科学数据共享服务网。研究区共有 107 个土壤墒情站点,64 个气象站点 (图 1)。土壤墒情站点的土壤湿度数据包括 2002 年生长季 (4 月至 10 月) 每旬的 10cm 和 20cm 的土壤含水量数据 (%)。气象站点提供了 2002 年全年的日降水量数据 (mm)。

2.2 植被指数-地表温度特征空间

植被指数与地表温度关系最早被用于计算区域植被阻抗和蒸散^[27,28]。此后,首先将植被指数-地表温度之间的关系与土壤干湿状况联系起来的是 Moran 等人,他们经过多次农田试验,提出了水分亏缺指数 (water deficit index, *WDI*)^[29]。Wan 等利用 MODIS 数据构建了特征空间,并计算了植被温度条件指数 (vegetation temperature condition index, *VTCI*),该指数与月总降水量的相关关系较好^[23]。李正国等利用地表温度-植被指数特征空间分析了黄土高原地表水分季节变化,并指出 *T_s/NDVI* 比单一利用温度或者植被指数来反映地表干湿状况能取得更好效果^[30]。江东等人分析了特征空间的生态学意义,认为 *T_s/NDVI* 特征空间是区域土壤水分含量和作物水分状况的较为敏感的指标^[31]。特征空间也和一些模型结合使用^[22,32]。特征空间也存在一定缺点,研究表明,*NDVI* 受土壤背景的影响较大,另外在高植被覆盖的区域 *NDVI* 值会出现饱和现象^[12]。因此,在 *NDVI* 饱和后,如果地表蒸散继续增加,*NDVI* 也无法反映地表干湿状况,此时需要用其他参量来弥补^[33]。而 *EVI* 可以有效去除土壤背景的影响,同时也增强了在高植被覆盖区域的敏感性。对特征空间来说,

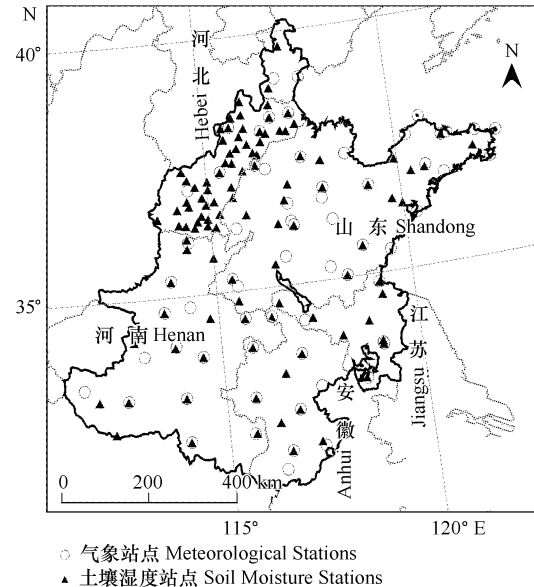


图 1 研究区气象站点和土壤湿度站点分布图

Fig. 1 Study area and the distribution of meteorological stations and soil moisture stations

从(5)式看出,特征空间的关键在于干边和湿边的确定。根据特征空间的原理,干边和湿边为界定特征空间散点图上下边界的直线。本文提取干湿边的方法如下: VI 值从 0 到 1, 以 $0.01 + n \times 0.02$ ($n = 1, 2, \dots, 49$) 为中心, 取 0.02 宽度的区间中 T_s 的最大值和最小值, 分别与其对应的 VI 值组成点对 (如: $[VI_1, T_{smax1}]$), 最后采用最小二乘线性拟合的方式将点对拟合, 形成干边和湿边。此过程采用 IDL (Interactive Data Language) 语言编写, 可以自动提取干湿边。这种干湿边提取方法将特征空间上下边缘的点对都加入到拟合过程中, 可以在一定程度上克服噪声点的影响, 能更好地接近真实的干湿边。

3 结果与分析

3.1 特征空间参数

研究区主要土地利用类型为耕地, 因此选择了 4~10 月研究区受云影响较少的 16 幅影像绘制地表温度-植被指数特征空间, 选择的标准是: 在 MODIS 产品的质量保证 (quality assurance, QA) 数据中, 标记为云的像元占研究区像元的总数小于 10%。绘制出了用 $NDVI$ 和 EVI 构成的特征空间 (图 3 和图 4)。可以看到, 研究区土壤干湿状况各异, 从而能够较好的形成三角形形状。比较两种特征空间, 同一天的 $NDVI$ 和 EVI 构成的特征空间形状相似, 但 EVI 构成的特征空间散点更为集中。主要表现在高植被覆盖区的点对 EVI 值较小 (0.6~0.7), $NDVI$ 值较大 (0.7~0.8), 证明了 $NDVI$ 较之 EVI 更容易饱和。

线性拟合的参数如表 1 和表 2 所示。 a_{min} 和 a_{max} 为干湿边拟合方程的常数项, 在特征空间中是干湿边在 Y 轴 (地表温度轴) 的截距。其生态学意义是, 裸土像元在水分充足时 (a_{min}) 和水分匮乏时 (a_{max}) 的地表温度值。从表中可以看出, $T_s/NDVI$ 特征空间和 T_s/EVI 特征空间的干湿边截距都随着季节变化在发生相应的改变: 在春季和秋季温度相对较低时, 截距较小, 干边截距 < 320K, 湿边截距 < 280K; 在夏季温度相对较高时, 截

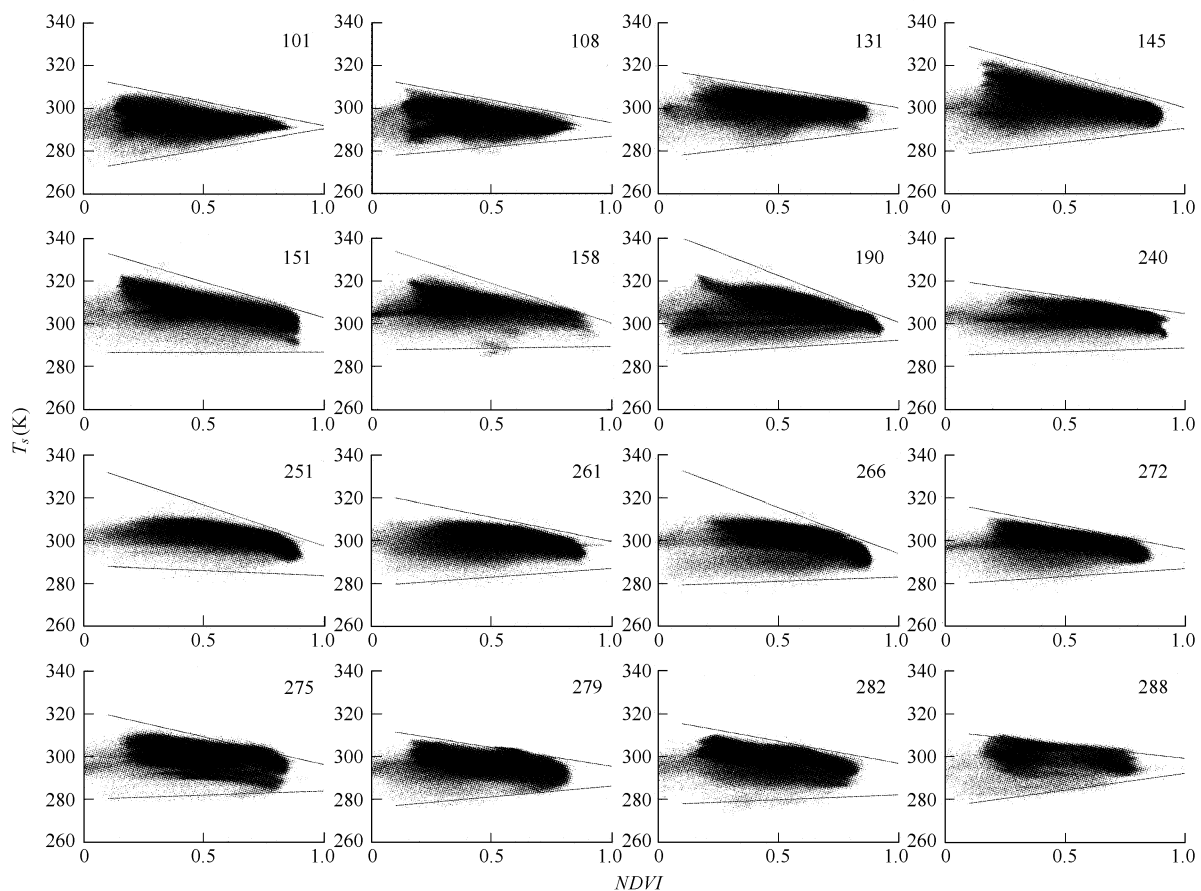
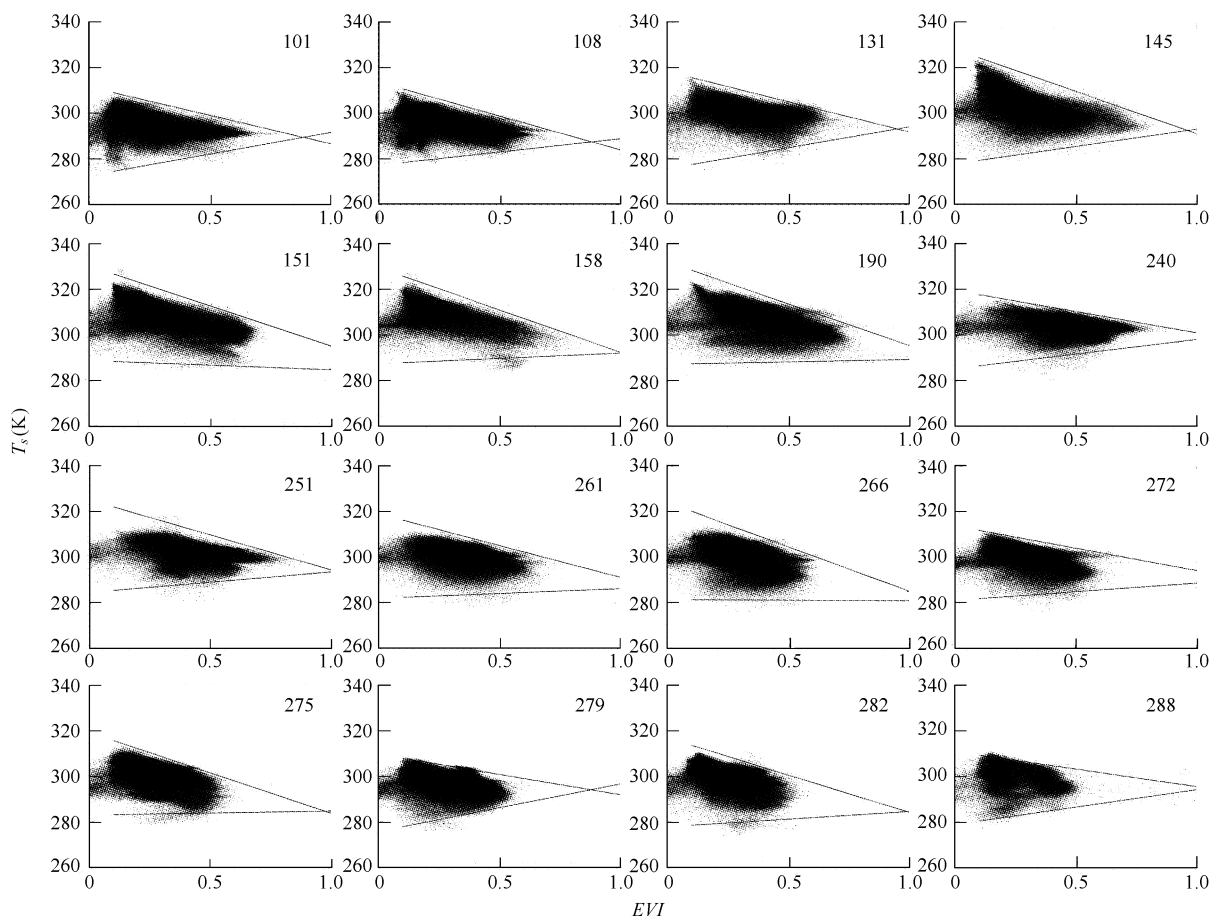


图 3 $T_s/NDVI$ 特征空间

Fig. 3 $T_s/NDVI$ Space

每幅图的数字表示每年的第几天 (日序数) The number is DOY

图4 T_s/EVI 特征空间Fig. 4 T_s/EVI Space

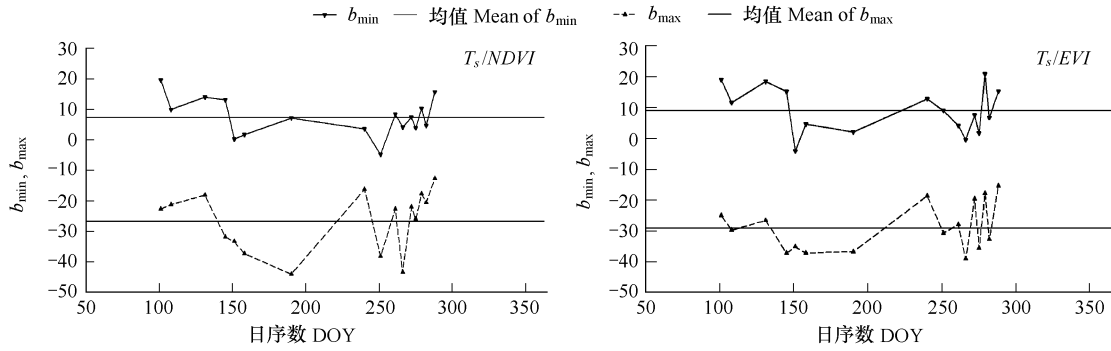
每幅图的数字表示每年的第几天(日序数) The number is DOY

距较大,干边截距 $>320K$,湿边截距 $>280K$ 。 b_{min} 和 b_{max} 为干湿边拟合方程的斜率,干湿边斜率的变化可以归因于蒸散^[35],冠层传导度^[27]以及土壤湿度^[19]。从图中看出,干湿边斜率随时间变化较为随机,缺乏明显的规律,主要原因是斜率受到上述多种因素的影响。另外,许多人的研究结果也证明了这一点^[13,36,37]。同时,干湿边斜率的变化规律是一致的:当干边斜率增加(即负得越少,越接近于零)时,湿边斜率也在增加;同样,当干边斜率减少时,湿边斜率也在减少。结合图3和图4可以看到,所有时期的特征空间均保持较稳定的三角形形状。从线性拟合的效果来看,干边线性拟合的效果很好, $T_s/NDVI$ 空间和 T_s/EVI 空间干边的拟合系数有14d大于-0.90,另外2d大于-0.80;湿边拟合的整体效果也较好, $T_s/NDVI$ 空间和 T_s/EVI 空间湿边的拟合系数分别有9d和7d大于0.50。在某些时段拟合精度较低的原因主要是MODIS产品计算不准带来的精度误差会形成噪声点,从而影响线性拟合的精度。

3.2 $T_s/NDVI$ 与 T_s/EVI 与土壤湿度相关性比较

土壤墒情站点的旬土壤湿度数据是每旬的第8天提取(如4月8号,4月18号,4月28号),因此选择了与测量土壤湿度最近时间的无云MODIS数据,分别计算 $TVDI_N$ 与 $TVDI_E$ 。然后提取土壤墒情站点所在像元的 $TVDI$ 值与站点10cm和20cm土壤湿度进行相关分析(表3)。 $TVDI_N$ 与 $TVDI_E$ 同土壤湿度表现为负相关关系,即 $TVDI$ 值越高,土壤湿度越低,满足 $TVDI$ 值越接近1土壤水分状况越干的原理(图2)。

在进行 $TVDI$ 与土壤湿度相关分析的10天中, $TVDI_E$ 与土壤湿度的相关关系 $p < 0.01$ 的天数为2d, $p < 0.05$ 的天数为3d, $p < 0.1$ 的天数为1d;而 $TVDI_N$ 与土壤湿度的相关关系中,对应的天数分别为1,2,2d。因

图5 特征空间干($b_{\max}$)湿($b_{\min}$)边斜率随时间变化趋势图Fig. 5 Trends of dry($b_{\max}$) and wet($b_{\min}$) edge表1 $T_s/NDVI$ 特征空间参数Table 1 Parameters for $T_s/NDVI$ space

	日序数 DOY							
	101	108	131	145	151	158	190	240
$a_{\min}$	270.94	277.12	276.73	277.62	286.54	287.74	285.19	285.14
$b_{\min}$	19.57	9.92	14.03	13.07	0.22	1.71	7.19	3.57
$R_{\min}$	0.95	0.79	0.83	0.91	0.04	0.19	0.86	0.25
$a_{\max}$	314.55	314.44	318.47	332.16	336.16	337.55	344.57	320.99
$b_{\max}$	-22.71	-21.20	-18.13	-31.88	-33.33	-37.32	-44.02	-16.24
$R_{\max}$	-0.98	-0.98	-0.98	-0.96	-0.94	-0.97	-0.98	-0.94
	日序数 DOY							
	251	261	266	272	275	279	282	288
$a_{\min}$	288.42	278.81	278.89	279.54	280.02	276.03	277.46	276.52
$b_{\min}$	-4.75	8.31	4.16	7.46	3.93	10.25	4.69	15.75
$R_{\min}$	-0.39	0.50	0.42	0.51	0.31	0.63	0.27	0.91
$a_{\max}$	335.70	322.21	337.18	317.93	322.19	313.21	317.46	311.85
$b_{\max}$	-38.19	-22.64	-43.44	-22.03	-25.98	-17.75	-20.58	-12.71
$R_{\max}$	-0.98	-0.93	-0.93	-0.94	-0.87	-0.96	-0.95	-0.81

$a_{\max}$, $b_{\max}$ 为干边参数, $R_{\max}$ 为干边拟合决定系数, $a_{\min}$, $b_{\min}$ 为湿边参数, $R_{\min}$ 为湿边拟合决定系数 $a_{\max}$, $b_{\max}$ is dry edge parameter; $a_{\min}$, $b_{\min}$ is wet edge parameter; $R_{\max}$ and $R_{\min}$ is coefficient of determination for dry and wet edge, respectively

表2 T_s/EVI 特征空间参数Table 2 Parameters for T_s/EVI space

	日序数 DOY							
	101	108	131	145	151	158	190	240
$a_{\min}$	272.61	277.14	275.57	277.74	288.84	287.41	287.19	285.25
$b_{\min}$	19.00	11.62	18.48	15.26	-4.09	4.66	2.07	12.84
$R_{\min}$	0.89	0.84	0.85	0.86	-0.34	0.35	0.30	0.52
$a_{\max}$	311.50	313.66	318.31	328.12	330.29	329.64	332.11	319.60
$b_{\max}$	-25.01	-29.78	-26.56	-37.16	-35.12	-37.18	-36.76	-18.63
$R_{\max}$	-0.99	-0.99	-0.99	-0.98	-0.97	-0.99	-0.93	-0.99
	日序数 DOY							
	251	261	266	272	275	279	282	288
$a_{\min}$	284.47	281.96	281.33	281.07	283.10	275.83	277.90	278.92
$b_{\min}$	9.06	4.19	-0.41	7.54	1.70	20.88	6.74	15.28
$R_{\min}$	0.47	0.21	-0.02	0.30	0.07	0.79	0.25	0.82
$a_{\max}$	325.08	319.06	324.06	313.72	319.39	309.84	317.02	310.91
$b_{\max}$	-30.72	-27.93	-39.03	-19.64	-35.57	-17.85	-32.80	-15.39
$R_{\max}$	-0.95	-0.99	-0.92	-0.98	-0.96	-0.91	-0.88	-0.89

$a_{\max}$, $b_{\max}$ 为干边参数, $R_{\max}$ 为干边拟合决定系数, $a_{\min}$, $b_{\min}$ 为湿边参数, $R_{\min}$ 为湿边拟合决定系数 $a_{\max}$, $b_{\max}$ is dry edge parameter; $a_{\min}$, $b_{\min}$ is wet edge parameter; $R_{\max}$ and $R_{\min}$ is coefficient of determination for dry and wet edge, respectively

此总体上, $TVDI_E$ 与土壤湿度的相关性比 $TVDI_N$ 要高。因为, 4~10 月份的作物生长季是植被覆盖变化最大的时期, 植物生长旺盛, 因此遥感影像中存在高植被覆盖度的区域。而根据研究表明, EVI 对高植被覆盖区域的变化较之 $NDVI$ 更为敏感。因此, 在特征空间中能体现出植被覆盖状况的变化, 而这种变化导致的像元在特征空间中位置的变化增强了 $TVDI$ 的敏感性, 从而能更好地反映土壤湿度的变化。比较不同深度土壤湿度与 $TVDI$ 的关系, 总体上 10cm 土壤湿度与 $TVDI$ 相关性较好。说明通过遥感方式得到的 $TVDI$ 能够反映表层土壤干湿状况变化情况。

表 3 $TVDI$ 与土壤湿度不同时间相关系数Table 3 Correlation coefficients between $TVDI$ and soil moisture content

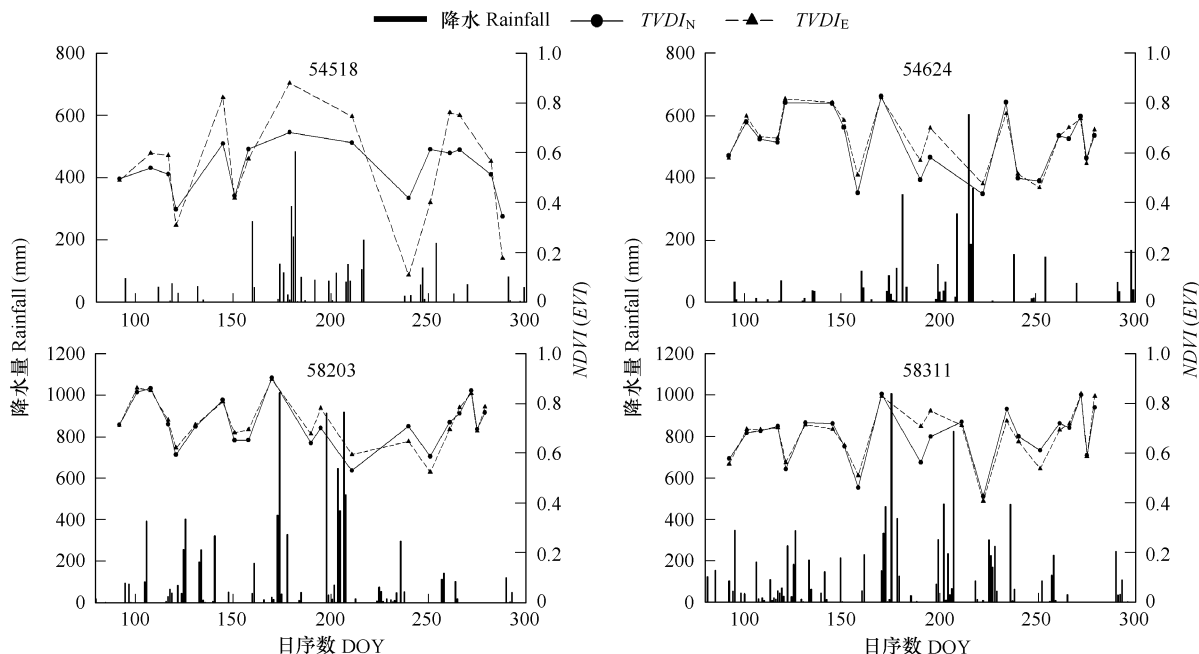
	日序数 DOY									
	101	108	131	151	158	190	240	251	261	288
$TVDI_N:SM_{10}$	-0.008	-0.433 ***	0.284	-0.221	-0.093	-0.313 *	-0.302 *	-0.216 **	-0.213 **	-0.159
$TVDI_N:SM_{20}$	-0.101	-0.346 **	-0.070	-0.197	-0.068	-0.243	-0.172	-0.137	-0.217 **	-0.037
$TVDI_E:SM_{10}$	-0.055	-0.481 ***	-0.068	-0.356 **	-0.194	-0.435 **	-0.330 *	-0.355 ***	-0.262 **	-0.151
$TVDI_E:SM_{20}$	-0.112	-0.389 **	-0.322	-0.304 *	-0.207	-0.386 **	-0.183	-0.188 *	-0.248 **	-0.020

SM_{10} 和 SM_{20} 分别是 10cm 和 20cm 处的土壤湿度; *** 代表通过 0.01 显著性检验; ** 代表通过 0.05 显著性检验; * 代表通过 0.1 显著性检验 $TVDI_N$ 是 calculated from $T_s/NDVI$ space, $TVDI_E$ 是 calculated from T_s/EVI space. SM_{10} and SM_{20} are soil moisture in 10cm and 20cm depth; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$

3.3 $TVDI$ 与降水的关系

在气象站点尺度上, 讨论了 $TVDI$ 值与降水变化趋势的关系。首先选择了 4 个站点, 满足以下 3 个条件: (1) 该站点所在像元在选择的 16 幅图像中没有受到云的污染; (2) 在空间上这 4 个站点分布较为均匀; (3) 各站点所在区域降水量有明显差异。根据每个气象站点所在像元, 取得了该气象站点各时期的 $TVDI$ 值。

总体上, $TVDI$ 对降水变化是敏感的 (图 6)。所选择的 4 个站点在 DOY170 之后的连续降水造成土壤湿度

图 6 降水量与 $TVDI$ 在站点尺度随时间变化关系图Fig. 6 Trends of rainfall and $TVDI$ from the station scale

$TVDI_N$ 代表由 $T_s/NDVI$ 空间计算得到的 $TVDI$, $TVDI_E$ 代表由 T_s/EVI 空间计算得到的 $TVDI$ (54518 河北霸州 (116.38°E, 39.12°N) 54624 河北黄骅 (117.35°E, 38.37°N) 58203 江苏阜南 (115.73°E, 32.87°N) 58311 江苏六安 (116.5°E, 31.75°N)) $TVDI_N$ is calculated from $T_s/NDVI$ space, and $TVDI_E$ is calculated from T_s/EVI space. (54518: Bazhou, Hebei Province (116.38°E, 39.12°N), 54624: Huanghua, Hebei Province (117.35°E, 38.37°N), 58203: Fuyang, Jiangsu Province (115.73°E, 32.87°N), 58311: Liuan, Jiangsu Province (116.5°E, 31.75°N))

上升,植被受胁迫的情况缓解,而这一过程在 $TVDI$ 变化趋势上表现为 $TVDI$ 值的降低,即气象站点所在像元向“湿边”接近。在黄骅站点 DOY220 以后,阜阳 DOY200 以后以及六安在 DOY200 以后的连续降水过程中同样可以看到,降水伴随着 $TVDI$ 值的降低。在降水减少时,土壤湿度降低,植被受胁迫情况加剧, $TVDI$ 值升高,气象站点所在像元向“干边”接近。在黄骅站点 DOY230 以后,阜阳站点 DOY220 以后的 15d 内没有降水,这两个站点所在像元的 $TVDI$ 值升高。因此,降水和与 $TVDI$ 呈现负相关关系。此现象在 5 月入夏至 9 月最为明显,是由于夏季温度较高,土壤湿度波动较大的原因。

比较 $TVDI_N$ 和 $TVDI_E$,二者随降水的变化趋势是一致的。但 $TVDI_E$ 较之 $TVDI_N$ 的波动幅度更大,这点在降水较少的站点(霸州)更为明显($TVDI_E$ 的标准差 0.138, $TVDI_N$ 的标准差 0.105), $TVDI_E$ 对降水以及土壤湿度变化更为敏感。

3.4 $TVDI$ 时空分布

本文计算了研究区每日的 $TVDI$ 。由于 T_s/EVI 较之 $T_s/NDVI$ 的优越性,分析时仅选择了 T_s/EVI 空间计算的 $TVDI$ 。选择了 4 幅作物生长不同时期(4,5,8,10 月份)的 $TVDI$ 图分析其空间分布规律(图 7)。图中研究区域内白色部分为云。

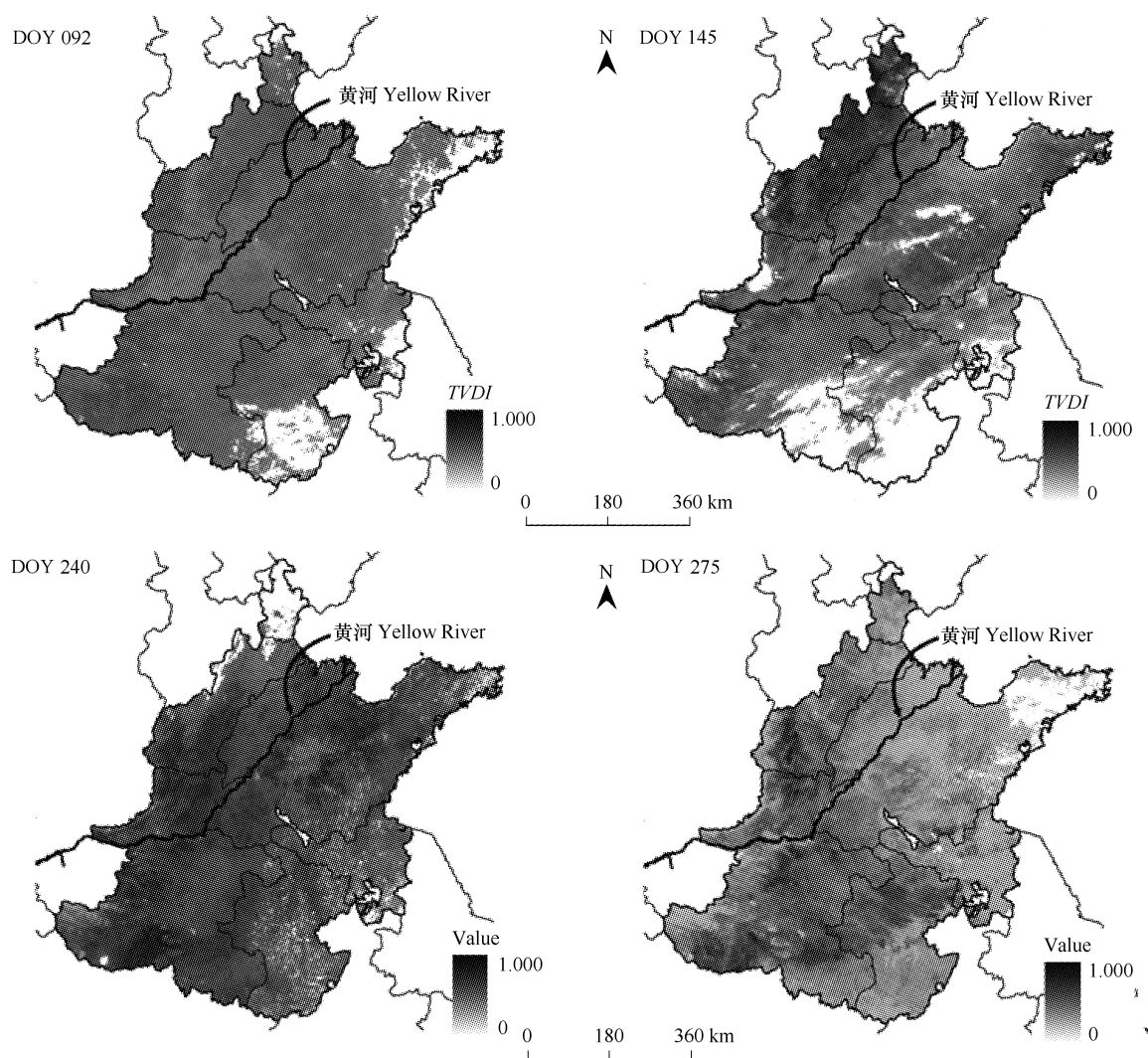


图 7 研究区地表水分空间分布(由 T_s/EVI 空间计算)

Fig. 7 Soil moisture status in study area calculated from T_s/EVI space

第 92 天(4 月 2 日),研究区大部分地区 $TVDI$ 值 >0.70 ,研究区西北部 and 西南部地区 $TVDI$ 值高,土壤湿度较低,研究区仅黄河沿岸地区 $TVDI$ 值较低($0.40 < TVDI < 0.55$),但整体干旱情况是 4 个时期中最低的;第 145 天(5 月 25 日),研究区北部出现较重旱情:在河北省境内华北平原部分 $TVDI > 0.80$ 。土壤湿度较高区域分布在黄河沿岸地区;第 240 天(8 月 28 日),研究区整体呈现较为干旱状况,大部分地区 $TVDI > 0.75$;与第 92 天相似,研究区西部和西南部区域土壤湿度低;第 275 天(10 月 2 日),研究区西部和南部地区干旱程度严重, $TVDI > 0.75$ 。而研究区北部水分条件较好, $TVDI < 0.55$ 。

4 结论与讨论

采用改进后的植被指数-地表温度特征空间算法,可以形成三角形的植被指数-地表温度特征空间。本文改进了该空间对湿边的确定方法,即湿边不是一条平行于 X 轴(植被指数轴)的直线,而是一条根据实际情况变化的斜线。采用线性拟合的方式提取了干湿边,该方法不需要人为干扰,较为客观,且运算快捷。干边为一条向下倾斜的直线,斜率为负;湿边为一条向上倾斜的直线,斜率为正。干湿边斜率随时间变化规律一致,即干边斜率增加时,湿边斜率也在增加,干边斜率减少也同时伴随湿边斜率的减少,因此能较好地形成稳定的三角形形状;而干湿边在 Y 轴(即地表温度轴)上的截距也有随季节变化的趋势:在春秋两季,截距较小,夏季截距较大,这与地表热量平衡有很大关系。

本文比较了 $TVDI_N$ 和 $TVDI_E$ 与实测土壤湿度的相关性。从结果来看,二者均能够体现土壤湿度状况(负相关关系)。 T_s/EVI 特征空间计算所得的 $TVDI$ 能更好地表征土壤湿度状况。 $TVDI$ 与 10cm 土壤湿度相关性较好,说明 $TVDI$ 能反映地表土壤干湿状况的变化。

在气象站点尺度上,降水导致土壤湿度升高,植被受胁迫程度下降, $TVDI$ 值降低,像元在植被指数-地表温度空间中的位置更靠近湿边。反之,降水减少时,土壤湿度降低, $TVDI$ 值升高。这个现象在 5~9 月份这段时间较为明显。

植被指数-地表温度特征空间是一种简便而又不失其物理意义的反映地表土壤湿度状况的方法。但还存在一定不足之处,主要表现在:(1)由于计算出的 $TVDI$ 为 1km 分辨率的数据,而土壤湿度站点所测土壤湿度为点数据,二者在空间尺度上的不一致性和土壤湿度的较大空间变异性导致了验证精度不高,今后可以考虑采用分辨率更高的影像进行分析。(2)尽管进行了质量控制(如云检测等),植被指数-地表温度特征空间中存在一些质量较差的像元,会影响到线性拟合干湿边的精度,在今后研究中需要进一步分析剔除无效像元的方法。

References:

- [1] Jackson T, Mansfield K, Saafi M, *et al.* Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement*, 2007, 41(4): 381–390.
- [2] Perry M A, Niemann J D. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3-4): 388–404.
- [3] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, *et al.* A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505–531.
- [4] Chauhan N S, Miller S, Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(22): 4599–4622.
- [5] Tian G L. Thermal remote sensing. Beijing: Publishing house of Electronic Industry, 2006.
- [6] Engman E T, Chauhan N. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 189–198.
- [7] Wang X, Zhang Z X, Zhao X L, *et al.* A review on researches on monitoring of soil moisture by remote sensing. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 157–163.
- [8] Yao C S, Zhang Z X, Wang X. Evaluating soil moisture status in XinJiang Using the temperature vegetation dryness index (TVDI). *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(6): 473–478.

- [9] Tansey K J, *et al.* Monitoring soil moisture dynamics using satellite imaging radar in northeastern Jordan. *Applied Geography*, 1999, 19(4): 325—344.
- [10] Njoku E, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 18 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37: 79—93.
- [11] Cracknell A P, Xue Y. Thermal inertia determination from space: a tutorial review. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(3): 431—461.
- [12] Huete A, *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 195—213.
- [13] Sandholt I, Rasmussen K, Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 213—224.
- [14] Deng H. Study on monitoring soil moisture of large region with MODIS data. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [15] Liu Q H, Xin J F, Xin X Z, *et al.* Monitoring agricultural drought by vegetation index and remotely sensed temperature. *Science and Technology Review*, 2007, 25(6): 12—18.
- [16] Bayarjargal Y, Kamieli A, Bayasgalan M, *et al.* A comparative study of NOAA AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1): 9—22.
- [17] Park S, Feddema J J, Egbert S L. Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(1): 53—62.
- [18] 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. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9: 161—173.
- [19] Carlson T N. An overview of the “triangle method” for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery. *Sensors*, 2007, 7: 1612—1629.
- [20] Qi S H, Wang C Y, Niu Z. Evaluating soil moisture status in China Using the temperature/vegetation dryness index (TVDI). *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 420—428.
- [21] Wang P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation- temperature condition index and its application for drought monitoring. *Geomatics and Information of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412—418.
- [22] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3-4): 191—205.
- [23] Wan Z, Wang P, Li X. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 61—72.
- [24] Zhang R H, Sun X M, Wang W M, *et al.* Physical foundations for an operational regional scale two-layer model to estimate land surface flux. *Science in China: Series D*, 2004, 34(S2): 200—216.
- [25] Ran Q. Retrieval of soil moisture status in China and analysis of its spatial and temporal distribution characteristics. Beijing: Institute of remote sensing applications of Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [26] Justice C O, *et al.* An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 3—15.
- [27] Nemani RR, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28: 276—284.
- [28] 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.
- [29] Moran M S, *et al.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246—263.
- [30] Li Z G, Wang Y L, Wu J S, *et al.* Intra-annual surface soil moisture change based on vegetation and temperature characteristics in Loess Plateau in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 11: 4563—4575.
- [31] Jiang D, Wang N B, Yang X H, *et al.* Ecological connotation and application of the vegetation index- surface temperature feature space. *Progress in Geography*, 2001, 20(2): 146—152.
- [32] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 225—242.

- [33] Han L J, Wang P X, Wang J D, *et al.* Research on the Vegetation index-land surface temperature space. *Science in China: Series D*, 2005, 35 (4): 371–377.
- [34] Gillies R R, Carlson T N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34: 745–756.
- [35] Hope A S, *et al.* Simulating canopy reflectance and thermal infrared emissions for estimating evapotranspiration. *Water Resources Bulletin*, 1987, 22(6): 1011–1019.
- [36] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60: 335–346.
- [37] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1): 71–94.

参考文献:

- [5] 田国良, 热红外遥感. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] 汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述. *土壤学报*, 2007, 44(1): 157–163.
- [8] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473–478.
- [14] 邓辉. 基于 MODIS 数据的大区域土壤水分遥感监测研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2005.
- [15] 柳钦火, 辛景峰, 辛晓洲, 等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法. *科技导报*, 2007, 25(6): 12–18.
- [20] 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. *遥感学报*, 2003, 7(5): 420–428.
- [21] 王鹏新, 龚建雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(5): 412–418.
- [24] 张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 等. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 200–216.
- [25] 冉琼, 全国土壤湿度及其变化的遥感反演与分析. 北京: 中国科学院遥感应用研究所硕士学位论文, 2005.
- [30] 李正国, 王仰麟, 吴健生. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化. *生态学报*, 2007, 11: 4563–4575.
- [31] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. 植被指数-地面温度特征空间的生态学内涵及其应用. *地理科学进展*, 2001, 20(2): 146–152.
- [33] 韩丽娟, 王鹏新, 王锦地, 等. 植被指数-地表温度构成的特征空间研究. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(4): 371–377.