

# 基于植被 温度特征的黄土高原地表水分季节变化

李正国<sup>1,2</sup>, 王仰麟<sup>2\*</sup>, 吴健生<sup>2</sup>, 张小飞<sup>3</sup>

(1 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室 北京 100081; 2 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871;

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 地表水分是监测土地退化的一个重要指标, 是气候、水文、生态、农业等领域的主要参数。选择陕北黄土高原地区作为研究区域, 首先采用基于植被覆盖特征的植被状态指数 (Vegetation Condition Index 简称 VCI) 和基于地表温度特征 (Land Surface Temperature 简称 Ts) 的温度状态指数 (Temperature Condition Index 简称 TCI) 分别评价了区域地表水分状况的季节变化。在此基础上分析了植被指数与地表温度特征线性关系的季节变化规律, 计算了基于两者经验关系的地表干燥度指数 (Temperature-Vegetation Dryness Index TVDI)。该指数对 Ts/NDVI 特征空间的生态特征的解释, 对土壤和作物的水分含量具有综合的指示意义。文中利用该指数综合评价了研究区域地表水分状况的时空分布差异, 进一步对 VCI/TCI 与 TVDI 相关关系的季节变化进行比较分析, 并结合气候因子进行了相关验证, 从而对不同指数的应用范围做出判定。研究表明, 单独采用 TCI 或 VCI 表征地表水分会受到明显的季节影响, 而 TVDI 能在不同季节综合体现植被覆盖和地表温度特征对地表水分的影响, 从而能较好的反映区域地表水分状况的时空变化特征。各区域的 TVDI 值季节分布上皆为 4~7 月份高于 10~翌年 1 月份, 但各区 TVDI 值的季节变化则存在显著不同, 而各流域内部 TVDI 值的空间变异性也存在季节差异, 其中在 10 月份较为显著。

**关键词:** TVDI; 地表水分; 黄土高原

文章编号: 1000-0933(2007)11-4563-13 中图分类号: Q149 文献标识码: A

## Intra annual surface soil moisture change based on vegetation & temperature characteristics in Loess Plateau area

LI Zheng Guo<sup>2</sup>, WANG Yang-Lin<sup>2\*</sup>, WU Jian-Sheng<sup>2</sup>, CHANG Xiao-Fei<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture of Ministry of Agriculture (MOA), Beijing 100081, China

2 College of Urban & Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2871, Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (11): 4563 ~ 4575

**Abstract:** Vegetation coverage and surface temperature are important parameters to describe characters of land covers and can provide information on vegetation and moisture conditions at the surface. The present paper aims at demonstrating how Terra/MODIS data may be used to estimate spatial patterns of soil moisture, a key variable in distributed hydrological models. The basic approach is to interpret the so-called Ts/NDVI space in terms of surface soil moisture status. Three kinds of index, such as vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI) and a simplified land surface

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD20B07); 国家自然科学基金资助项目 (40601001); 国家自然科学基金重点研究资助项目 (40635028)

收稿日期: 2007-02-08; 修订日期: 2007-10-25

作者简介: 李正国 (1980-) 男, 江西上饶人, 博士生, 主要从事景观生态与土地利用的研究. E-mail: lzg123@263.net

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

致谢: 感谢国家农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室提供 TERRA/MODIS 数据产品

Foundation item. The project was financially supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2006BAD20B07); National Natural Science Foundation of China (No. 40601001); National Natural Science Key Foundation of China (No. 40635028)

Received date: 2007-02-08; Accepted date: 2007-10-25

Biography: LI Zheng Guo, Ph.D. candidate, mainly engaged in landscape ecology and land use. E-mail: lzg123@263.net

dryness index (Temperature Vegetation Dryness Index TVDI) based on an empirical parameterisation of the relationship between surface temperature and vegetation index are suggested. These indexes are related to soil moisture and in comparison to existing interpretations of the Ts/NDVI space are conceptually and computationally straightforward. These indexes are based on satellite-derived information only and the potential for application is therefore large.

Using 36 Terra/MODIS images from 2003 of the semiarid North Shaanxi Loess Plateau, NDVI (MOD11) and Ts (MOD13) were investigated as indicators of vegetation abundance and land surface temperature. To examine soil moisture conditions at the surface, the spatial pattern and temporal evolution in VCI, TCI and TVDI was analysed with Ts and NDVI. The results were: (1) Land surface moisture represented by VCI or TCI separately could not eliminate the effects caused from seasonal change of Ts and NDVI. However, TVDI derived from analysis of the temperature/vegetation index space and created by integrated analyses of these two kinds of data helped to determine main principles of the temporal and spatial variation of surface soil moisture. (2) From temporal evolution of TVDI, it could be inferred that the trend in TVDI is high values in the dry season (spring or autumn) and low values in the rainy season (summer or winter). (3) Spatial evolution of TVDI indicates that surface soil moisture of each region has its own seasonal rhythm. Mean TVDI in the northern region increased rapidly from winter to spring and decreased from summer to autumn in south, in the middle and west, the increment of TVDI from winter to spring was almost equal to decrement from summer to autumn. (4) Similarly, spatial variation of surface soil moisture in watersheds was seasonal. Typically, in October the variation in TVDI was greatest in most watersheds, especially in north.

Key Words: TVDI, land surface moisture, Loess Plateau

地表水分是监测土地退化的一个重要指标,是气候、水文、生态、农业等领域的主要参数,在地表与大气界面的物质和能量交换中起重要作用<sup>[1-3]</sup>。基于小范围内的采样数据来预测地表水分的程度及分布范围对于区域以及全球尺度的研究而言,可操作性不强,要实现大范围的地表水分监测,还需要借助遥感技术<sup>[4-6]</sup>。近年来,基于遥感技术的地表水分估测方法被广泛应用于森林火灾中对树木可燃性的评估<sup>[7-8]</sup>、水文模型的参数验证<sup>[9]</sup>以及沙漠化或干旱对植被的水分压力的估测等<sup>[10]</sup>。

目前遥感监测地表水分的方法主要通过实际蒸散和潜在蒸散比值计算作物缺水指数 (Crop Water Stress Index简称 CWSI)评价土壤水分状况<sup>[11-13]</sup>,但是该比值只适用于裸土或稀疏植被覆盖<sup>[14]</sup>。在植被覆盖条件下,通常采用其他的方法代替,例如利用时间序列植被指数构建的植被状态指数 (VCI)<sup>[15]</sup>,温度状态指数 (TCI)<sup>[16]</sup>,以及 McVicar等<sup>[17]</sup>建立的归一化温度指数 (Normalized Difference Temperature Index简称 NDTI),其中 NDTI能很好地描述土壤供水能力,对变化的环境反应比 NDVI灵敏<sup>[18]</sup>。最近的研究结果表明结合植被指数和地表温度研究区域地表水分状况会得到更加合理的结果<sup>[19-20]</sup>。其中具有代表性的是 Sandhol等<sup>[21]</sup>基于植被指数和地表温度的关系,提出的温度植被干旱指数 (TVDI)。

利用 TVDI反映地表水分状况的原理主要是植被状态及其水分压力可以通过热红外波段和可见光/近红外比值之间的互补性得到很好地表现<sup>[18]</sup>。大量相关研究表明样点在地表温度/植被指数空间中的位置受很多因素影响<sup>[14]</sup>,其中具有代表性的是对土壤/植被/大气传输模型 (soil/vegetation/atmosphere transfer,简称 SVAT)的模拟结果的研究<sup>[21-23]</sup>。利用 SVAT模型可以估算地表温度/植被指数特征空间的形状<sup>[23]</sup>,进而结合对该特征空间生态特征的解释可以构建对土壤和作物水分含量具有一定的指示意义的 TVDI指数<sup>[18-24]</sup>。通过与地面采样获取的地表水分比较可以发现 TVDI所表征的地表水分空间分布及细节变化更为显著<sup>[25-26]</sup>。

本文选择陕北黄土高原地区作为研究区域,首先采用基于植被覆盖特征的 VC指数和基于地表温度特征的 TC指数分别评价了区域地表水分状况的季节变化;其次分析了植被覆盖与地表温度特征线性关系的季节变化,在此基础上采用能同时反映植被/温度特征的 TVDI指数,从而综合评价了植被/温度特征对黄土高原区地表水分状况季节变化的影响。

## 1 研究区概况

研究区地处陕西省北部, 东经  $107^{\circ}28'$  至  $111^{\circ}15'$ , 北纬  $35^{\circ}21'$  至  $39^{\circ}34'$  间, 东隔黄河, 与山西省相望; 西以子午岭为界, 与宁夏、甘肃接壤; 北邻内蒙; 南接渭南、铜川、咸阳三市。全区总面积  $80606 \text{ km}^2$ , 分属延安和榆林市, 下辖 25 个县、385 个乡镇、9110 个行政村。全区属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候, 四季分明。区域内不同地区的气温除随纬度的增加而降低外, 地势高低也具有显著的影响。通常高温出现在黄土高原的东南部和低平地区, 低温出现在西北部和较高的山区。区内东南部, 年均气温一般在  $12.5^{\circ}\text{C}$  以上, 局部地区可达  $14.3^{\circ}\text{C}$ , 西北部和北部地区一般在  $2.5^{\circ}\text{C}$  以下。7 月份平均气温大多超过了  $22^{\circ}\text{C}$ , 1 月份平均气温各地变化在  $-1 \sim 16^{\circ}\text{C}$  之间<sup>[27, 28]</sup>。

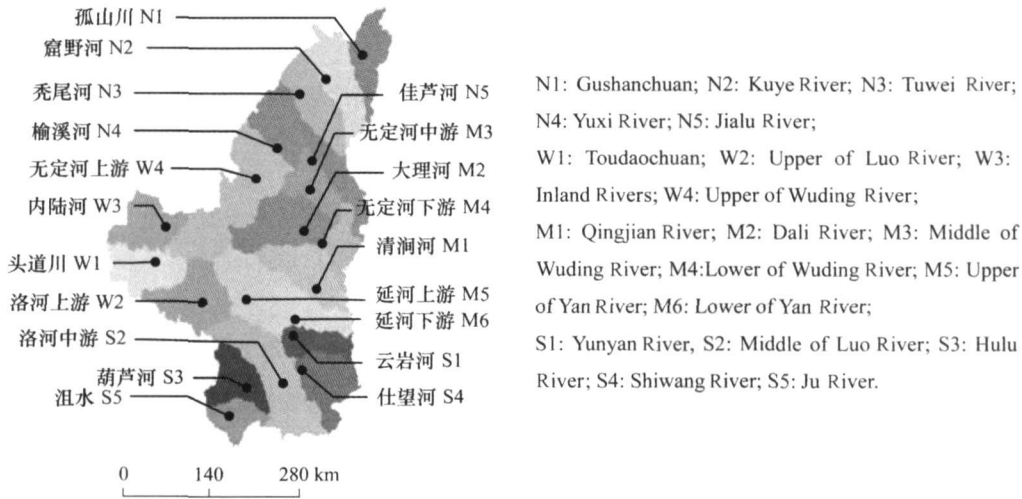


图 1 研究区流域划分

Fig 1 The location of study area and identification of watershed

本区植被类型多样, 具有明显的过渡性特点。随着气候特征的带状更迭, 植被变化从东南向西北, 由森林草原、干草原、荒漠草原依次出现。森林草原主要分布在洛河中游地区, 植被为白羊草、铁杆蒿、艾蒿、长芒草为优势组成的草甸草原或草原。沙棘、荆条、酸枣、狼牙刺等较耐旱的灌木比较发达, 侧柏、油松等耐旱树种在林地中分布十分普遍。干草原主要分布在窟野河、无定河中下游、洛河上游等地区。荒漠草原分布在孤山川、无定河上游等地区。由于该区人类活动历史悠久, 强度大, 自然植被破坏比较严重。目前该区的森林覆盖率不足 10%, 坡耕地面积所占比例较大, 导致水土流失十分严重<sup>[29]</sup>。

由于流域具有相对明确的自然边界, 同时也是完整的景观生态系统<sup>[26, 27]</sup>。为更好地反映景观格局及过程的动态变化, 本文以流域作为基本研究单元。首先基于 1:5 万的数字地形图, 利用 ArcGIS 平台的水文分析功能划分了研究区的主要流域, 依次为北部区域内的孤山川、窟野河、秃尾河、佳芦河、榆溪河流域, 西部区域的无定河上游、头道川、洛河上游及部分内陆河流域, 中部区域的清涧河、大理河、无定河中、下游、延河上、下游流域及南部区域的云岩河、仕望河、洛河中游、葫芦河、沮水流域等(图 1)。

## 2 数据及处理方法

### 2.1 数据预处理

在研究中, 为了精确评价研究区植被 温度特征的空间分布, 本研究使用国家农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室提供的 Terra/MODIS 数据产品, 包括地表温度和 NDVI 植被指数两种产品格式, 空间分辨率分别为  $1000 \text{ m}$  和  $250 \text{ m}$ , 影像为 2003 年逐旬合成数据。数据预处理主要利用 ENVI 遥感影像处理平台, 对照 1:5 万地形图选取控制点, 进行几何精校正, 误差在半个象元以内。采用双标准纬线等积圆锥投影 (ALBERS), 椭球体为 KRASOVSKY, 坐标系为 Beijing954。通过与陕北黄土高原区行政边界掩膜 (MASKING) 处理, 得到研究区范围内各时相的遥感影像。

## 2.2 基于植被指数的地表水分估测模型

由于从植被指数反演出的土地表面绿度与植物的生长状态及其密度密切相关,因此,植被指数可用于监测对作物生长的环境条件,尤其是对地表水分环境的监测<sup>[4]</sup>。影响植物生长的因素很多,主要有气候、土壤、天气和人类活动等,在这些因素中,在一定的连续时间内,可以认为气候和土壤处于相对不变的状态,只有天气变化对植物生长具有短期的效应。因此,植被指数可用于表示植物的水分状况<sup>[14]</sup>。在应用植被指数测量地表水分状况的研究中,较有代表性的为植被状态指数 VCI应用 VC动态监测地表水分变化的范围比应用其它方法如 NDVI和降水量的监测更有效,同时认为 NDVI适用于研究大尺度范围的气候变异,而 VC适用于估算区域级的干旱程度<sup>[6]</sup>。植被状态指数的定义为<sup>[15]</sup>:

$$VCI = \frac{NDVI_t - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad (1)$$

式中, NDVI为某一特定年第  $t$  个时期的 NDVI值,  $NDVI_{max}$ 和  $NDVI_{min}$ 分别代表所研究年限内第  $t$  个时期 NDVI的最大值和最小值。

式中的分母部分是在研究年限内第  $t$  个时期植被指数的最大值和最小值之差,它在一定意义上代表了 NDVI的最大变化范围,反映了当地植被的生境;分子部分在一定意义上表示了某一特定年第  $t$  个时期的当地气象信息,若 NDVI和  $NDVI_{min}$ 之间差值小,表示该时段植物长势很差,此时 VC偏低,地表水分状况较差。

## 2.3 基于地表温度的地表水分估测模型

地表温度是控制地球表面大多数物理、化学和生物过程的参数之一,对裸土来说地表温度指的是土壤表面温度,浓密植被覆盖的地表温度可以认为是植物冠层的表面温度。植物冠层温度升高是植物受到水分胁迫和干旱发生的指示器,这是因为植物叶片气孔的关闭可以降低由于蒸腾所造成的水分损失,进而造成地表潜热通量的降低,从而将导致地表感热通量的增加,而感热通量的增加又进一步造成植被冠层温度的升高<sup>[11-12]</sup>。因此,地表温度可用于对地表水分状况的监测,其中较有代表性的为 TCI与 NDTI<sup>[4,19]</sup>。TCI的定义与 VC的定义相似,但它强调了温度与植物生长的关系,即高温对植物生长不利。TCI的定义为<sup>[16]</sup>:

$$TCI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} \quad (2)$$

式中,  $T_s$ 为某一特定年第  $t$  个时期的地表温度值,  $T_{s_{max}}$ 和  $T_{s_{min}}$ 分别表示所研究年限内第  $t$  个时期地表温度的最大值和最小值。TCI愈大,表示愈干旱。TCI的缺点是未考虑白天的气象条件,如净辐射、风速、湿度等对红外遥感的影响及地表温度的季节性变化<sup>[28]</sup>。

## 2.4 基于 $T_s$ NDVI特征空间的地表水分估测模型

如果单独以遥感获取的地表温度作为指标,在植被覆盖不完全条件下,较高的土壤背景温度会严重干扰土壤湿度信息<sup>[4]</sup>。植被指数提供了绿色植物的生长状况和覆盖度信息,如果结合光谱植被指数和地表温度的综合信息监测土壤湿度,可消除土壤背景的影响<sup>[33]</sup>。

国内外学者研究了各种空间尺度和时间分辨率的地表温度和植被指数的关系,发现  $T_s$ 和 NDVI之间存在明显的负相关关系<sup>[34-35]</sup>。从理论的角度来看,对于水分条件良好的地表,地表温度和 NDVI的关系与地表土壤水分(土壤水分增加可以加大土壤的热惯量)更为直接相关,而不是作为对潜在热能的限制性控制<sup>[36]</sup>。相关研究表明,以 NDVI和  $T_s$ 为横纵坐标的散点图呈三角形<sup>[34-35]</sup>或梯形<sup>[14]</sup>。Sandhol等基于上述关系,提出了温度植被干旱指数(TVDI)估测土壤表层水分状况<sup>[18]</sup>。相关研究认为,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  $T_s$ NDVI斜率和截距<sup>[20]</sup>。

图2展示了  $T_s$ NDVI特征空间的概念框架,主要体现了  $T_s$ 与 NDVI的关系。左侧边代表了不同湿度的裸土的温度变化,横轴代表随着植被绿度的上升,最大地表温度下降。斜边表示在干旱条件下,对于某一给定的地表类型和气候条件,地表温度所能达到的极限,可通过在  $T_s$ NDVI特征空间中定义等值线来代表不同的干旱程度。例如, TVDI值为1是干边(Dry edge),代表有限的水分供应; TVDI值为0则是湿边(Wet edge),具有最大的土壤蒸发蒸腾总量和无限的水分供应。TVDI的计算公式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{a + bNDVI - T_{s_{min}}} \quad (3)$$

式中,  $T_{s_{min}}$ 为三角形中最小的地表温度, 定义了相应的湿边,  $T_s$ 为给定像元的观测温度,  $NDVI$ 为观测的归一化植被指数值,  $a$ 和  $b$ 分别为定义干边的线性拟合方程 ( $T_{s_{max}} = a + bNDVI$ )中的参数,  $T_{s_{max}}$ 为给定  $NDVI$ 值下的最大地表温度。通过在从湿到干、从裸土到全植被覆盖的各种条件下, 对大范围区域内的像元采样来估算参数  $a$  和  $b$

需要指出的是, 像元在  $T_s/NDVI$ 特征空间位置受到诸多因素的影响。首先,  $TVDI$ 的计算主要取决于  $T_s$ 和  $NDVI$ ;而稀疏植被地区的  $T_s$ 和  $NDVI$ 的提取同时受到土壤和植被的影响而变得更为复杂<sup>[18-19]</sup>, 更重要的是  $T_{s_{max}}$ 与  $NDVI$ 的线性关系随着季节不同发生显著的变化(图3), 直接影响对参数  $a$ 和  $b$ 的估计。

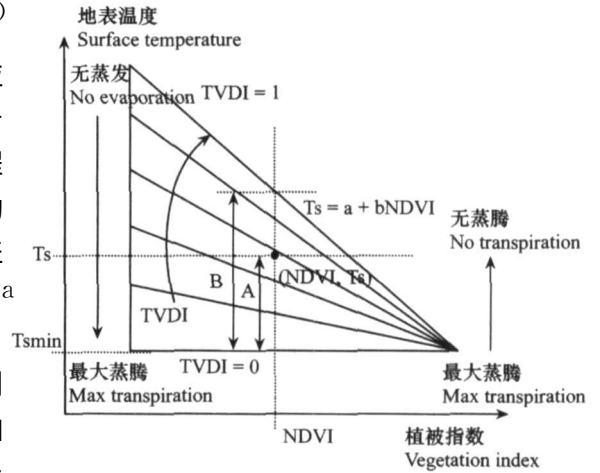


图2 TVDI原理示意图<sup>[14]</sup>  
Fig. 2 Definition of the TVDI<sup>[14]</sup>

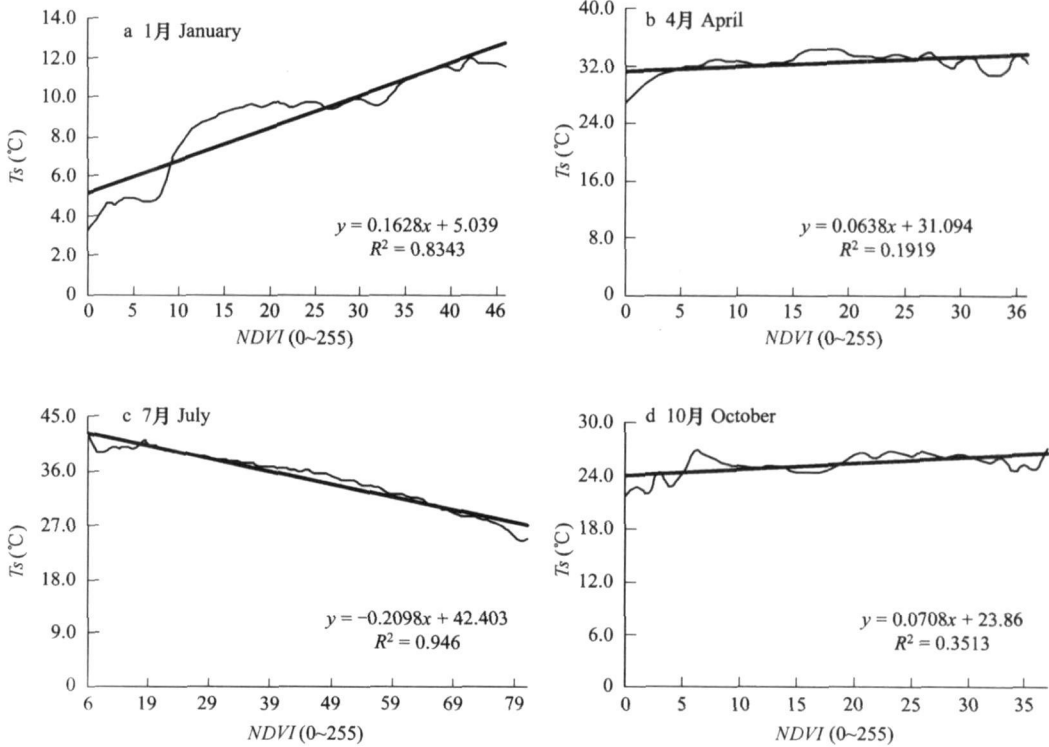


图3  $T_{s_{max}}$ 与  $NDVI$  各月线性关系  
Fig. 3 Linear relationships between  $T_{s_{max}}$  and  $NDVI$  in months

### 3 结果与分析

#### 3.1 VC的时空分布

本文基于 MODIS数据的植被指数产品, 计算了研究区逐旬的  $VC$ 数据集(图4)。统计结果表明(表1),  $VC$ 均值的季节变化并不显著, 其中在植被生长季节(5~8月份)均处于  $0.2 \sim 0.4$ 之间, 表明期间植被生长均不同程度受到水分条件的约束; 另一方面,  $VC$ 均值的季节变化也不甚明显, 仅在植被生长季节略高于其他月份, 表明期间植被生长受约束程度空间差异较大。

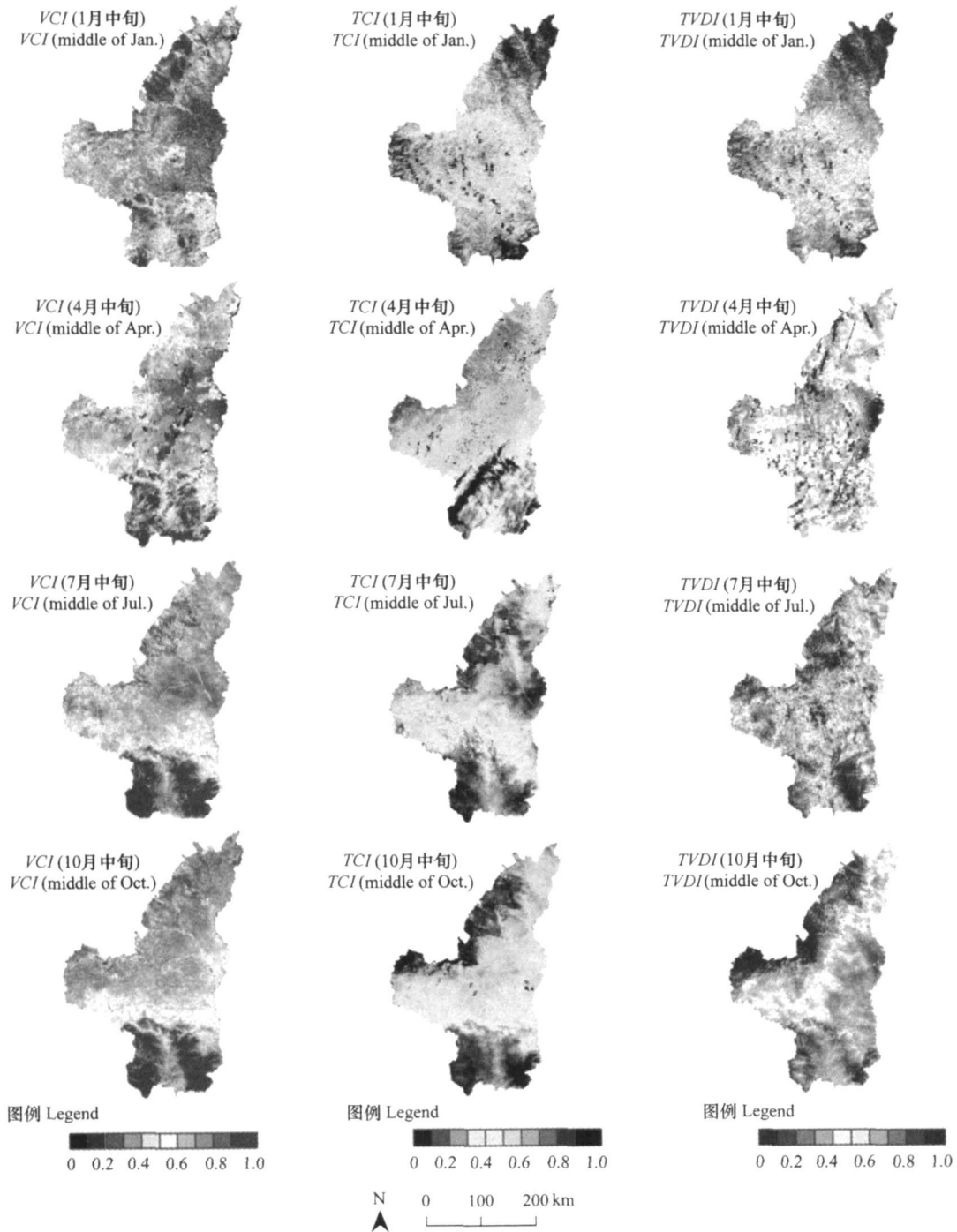


图 4 研究区地表土壤水分特征的空间分布 (2003)

Fig 4 Distribution of land surface water status in study area (2003)

为研究 VC 的时空分布规律, 对各流域 VC 的均值和方差的统计结果表明 (表 1), 北部区域秃尾河和榆溪河流域一月的 VC 均值高于其他流域, 变化范围多在 0.20~0.45 间, 各流域 VC 方差值均在 0.1 左右; 4 月份各流域均值维持在 0.25~0.35 间, 方差值下降到 0.05 左右; 7 月份各流域均值基本在 0.25 左右, 方差值保持不变; 10 月份除佳芦河流域有所上升外, 均值保持在 0.25 左右, 方差值稍有下降。南部区域各流域 1 月份的 VC 均值多在 0.45 左右, 方差值也在 0.10 左右; 4 月份均值略有下降至 0.40 左右, 方差值基本保持不变; 7 月份均值则大幅上升至 0.60~0.70 间, 方差值也有所上升; 10 月份各流域的均值下降至 0.60 左右, 而方差

值回复至 0.10 左右。西部区域各流域 1 月份均值多在 0.30~0.40 间, 方差值也在 0.1 左右; 4 月份均值下降至 0.25~0.30 间, 方差值亦降至 0.05 以下; 7 月份均值回升至 0.30 左右, 方差值略有上升; 10 月份均值基本维持不变, 方差值维持在 0.05 左右。中部区域各流域 1 月份均值多在 0.20~0.30 间, 方差值也在 0.10 以下; 4 月份均值略有下降, 方差值亦降至 0.05 以下; 7 月份均值进一步上升至 0.30~0.40 左右, 方差值在 0.10 以下; 10 月份均值略有上升, 方差值则小幅下降。

表 1 研究区各流域 VCI 的统计值

Table 1 Statistics of VCI in watersheds in study area

项目 Item		北部区域 North Part					南部区域 South Part				
		孤山川 N <sub>1</sub>	窟野河 N <sub>2</sub>	秃尾河 N <sub>3</sub>	榆溪河 N <sub>4</sub>	佳芦河 N <sub>5</sub>	云岩河 S <sub>1</sub>	洛河中游 S <sub>2</sub>	葫芦河 S <sub>3</sub>	仕望河 S <sub>4</sub>	沮水 S <sub>5</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.27	0.32	0.45	0.51	0.22	0.40	0.47	0.47	0.43	0.53
	方差 Variance	0.09	0.11	0.15	0.11	0.07	0.08	0.10	0.07	0.10	0.12
4月 Apr	均值 Mean	0.31	0.32	0.28	0.27	0.24	0.34	0.40	0.40	0.38	0.45
	方差 Variance	0.05	0.06	0.05	0.03	0.06	0.06	0.08	0.06	0.07	0.09
7月 Jul	均值 Mean	0.26	0.27	0.26	0.29	0.25	0.51	0.60	0.69	0.66	0.74
	方差 Variance	0.04	0.04	0.08	0.11	0.04	0.13	0.12	0.09	0.15	0.09
10月 Oct	均值 Mean	0.25	0.25	0.26	0.26	0.30	0.49	0.55	0.60	0.62	0.70
	方差 Variance	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05	0.09	0.10	0.07	0.11	0.10

项目 Item		西部区域 West Part				中部区域 Middle Part					
		头道川 W <sub>1</sub>	洛河上游 W <sub>2</sub>	内陆河 W <sub>3</sub>	无定河上游 W <sub>4</sub>	清涧河 M <sub>1</sub>	大理河 M <sub>2</sub>	无定河中游 M <sub>3</sub>	无定河下游 M <sub>4</sub>	延河上游 M <sub>5</sub>	延河下游 M <sub>6</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.33	0.33	0.40	0.40	0.27	0.27	0.23	0.23	0.30	0.29
	方差 Variance	0.06	0.08	0.10	0.13	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.08
4月 Apr	均值 Mean	0.27	0.29	0.26	0.26	0.25	0.23	0.23	0.23	0.26	0.28
	方差 Variance	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06
7月 Jul	均值 Mean	0.31	0.34	0.32	0.28	0.31	0.23	0.25	0.24	0.31	0.38
	方差 Variance	0.06	0.07	0.08	0.09	0.04	0.04	0.08	0.05	0.07	0.08
10月 Oct	均值 Mean	0.30	0.36	0.26	0.28	0.31	0.28	0.29	0.33	0.34	0.38
	方差 Variance	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06

### 3.2 TC 的时空分布

基于 MODIS 数据提取的地表温度, 计算了研究区逐旬的 TC 数据集 (图 4)。TC 均值的季节变化则较为显著, 在植被生长季节均处在 0.4 以上, 其中 5 月份达 0.55 表明期间地表蒸发强烈, 导致地表水分条件较差, 而其他月份均在 0.25 左右, 此时地表水分相对较为湿润; 另一方面, TC 方差在植被生长季节较高, 普遍在 0.15 以上, 表明期间地表水分状况的区域内部差异较大。

为研究 TC 的时空分布规律, 对各流域 TC 的均值和方差的统计结果表明 (表 2), 北部区域各流域 1 月份的 TC 均值在 0.10~0.20 间, TC 方差值均在 0.05 左右; 4 月份各流域均值上升至 0.50 左右, 方差值上升到 0.05~0.10 间; 7 月份各流域均值基本维持不变, 方差值则略有下降; 10 月份回落至 0.40 以下, 方差值上升至 0.10~0.25 间。南部区域各流域 1 月份均值为 0.30~0.35 间, 方差值均在 0.05 左右; 4 月份各流域均值上升至 0.55~0.60 间, 方差值略有上升; 7 月份各流域均值明显回落至 0.35 以下, 方差值则基本不变; 10 月份进一步降至 0.10~0.2 间, 方差值差别较大, 取值在 0.05~0.15 间不等。西部区域各流域 1 月份均值多在 0.25~0.35 间, 方差值也在 0.1 以下; 4 月份均值上升至 0.50~0.55 间, 方差值则基本不变; 7 月份均值除无定河上游流域外均下降至 0.50 以下, 方差值变化很小; 10 月份均值则进一步降至 0.36 以下, 方差值上升至 0.10 以上。中部区域各流域 1 月份均值多在 0.20~0.30 间, 方差值均在 0.05 左右; 4 月份均值则大幅上升至 0.40 以上, 方差值轻微上升至 0.05~0.10 间; 7 月份清涧河与延河流域的 TC 均值有所下降, 其他流域

均继续上升,而方差值基本维持不变;10月份各流域均值明显下降,方差值保持在 0.10 以下。

表 2 研究区各流域 TC 的统计值  
Table 2 Statistics of TCI in watersheds in study area

项目 Item		北部区域 North Part					南部区域 South Part				
		孤山川 N <sub>1</sub>	窟野河 N <sub>2</sub>	秃尾河 N <sub>3</sub>	榆溪河 N <sub>4</sub>	佳芦河 N <sub>5</sub>	云岩河 S <sub>1</sub>	洛河中游 S <sub>2</sub>	葫芦河 S <sub>3</sub>	仕望河 S <sub>4</sub>	沮水 S <sub>5</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.09	0.11	0.13	0.17	0.18	0.31	0.33	0.33	0.35	0.36
	方差 Variance	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07	0.04	0.07	0.04
4月 Apr	均值	0.51	0.54	0.53	0.54	0.48	0.56	0.57	0.58	0.56	0.56
	方差	0.05	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.07	0.06
7月 Jul	均值	0.42	0.50	0.56	0.58	0.56	0.34	0.25	0.19	0.27	0.17
	方差	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.09	0.04
10月 Oct	均值	0.31	0.37	0.31	0.22	0.25	0.14	0.17	0.15	0.12	0.16
	方差	0.23	0.21	0.19	0.12	0.19	0.04	0.15	0.09	0.09	0.12

项目 Item		西部区域 (West Part)				中部区域 (Middle Part)					
		头道川 W <sub>1</sub>	洛河上游 W <sub>2</sub>	内陆河 W <sub>3</sub>	无定河上游 W <sub>4</sub>	清涧河 M <sub>1</sub>	大理河 M <sub>2</sub>	无定河中游 M <sub>3</sub>	无定河下游 M <sub>4</sub>	延河上游 M <sub>5</sub>	延河下游 M <sub>6</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.35	0.31	0.33	0.24	0.28	0.27	0.18	0.23	0.31	0.29
	方差 Variance	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06
4月 Apr	均值	0.53	0.54	0.51	0.51	0.53	0.49	0.50	0.44	0.54	0.56
	方差	0.08	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.06	0.09	0.07	0.08
7月 Jul	均值	0.40	0.35	0.47	0.54	0.44	0.51	0.53	0.58	0.34	0.38
	方差	0.07	0.06	0.07	0.09	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.07
10月 Oct	均值	0.27	0.24	0.35	0.36	0.14	0.24	0.20	0.13	0.23	0.14
	方差	0.11	0.09	0.13	0.16	0.07	0.10	0.09	0.03	0.09	0.07

### 3.3 $T_{s,max}$ 与 NDVI 线性关系的季节变化

采用光谱植被指数和地表温度的综合信息监测地表水分,必须首先确定在不同的季节,某一植被覆盖条件下,最大可能的地表温度,从而确立定义干边的线性拟合方程参数。

从对研究区像元随机采样的统计结果分析来看,在一月,NDVI与  $T_{s,max}$ 呈现正相关关系(图 3 a),当 NDVI 值每上升 10 (0~255),  $T_{s,max}$ 升高 1.6°C,两者相关系数高达 0.83,表明在冬季月份,植被覆盖较好的地区,地表温度相应也较高。这主要是因为期间南部的平均气温要明显高于北部,而植被覆盖良好的南部地区其水分条件也相应较好,从而起到了保温的作用,两者叠加使得  $T_{s,max}$ 与 NDVI 呈现正相关关系。

在 4 月份,NDVI与  $T_{s,max}$ 呈现的相关程度较低(图 3 b),当 NDVI 值每上升 10,  $T_{s,max}$ 升高 0.6°C,两者相关系数仅 0.19。主要是因为此时研究区北部的气温要略高于南部,一定程度上抵消了南部植被覆盖的保温效果,两者共同作用导致  $T_{s,max}$ 与 NDVI 几乎不相关。

在 7 月份,NDVI与  $T_{s,max}$ 呈现负相关关系(图 3 c),当 NDVI 值上升每上升 10,  $T_{s,max}$ 下降 2.0°C,两者相关系数高达 0.95。表明在夏季月份,植被覆盖较好的地区,地表温度相应也较低。这主要是因为此时研究区北部的气温要显著高于南部,而植被覆盖良好的南部地区水分条件也相应较好,其蒸发效应起到了降温的作用,两者共同作用使得  $T_{s,max}$ 与 NDVI 呈现显著的负相关关系。

在 10 月份,NDVI与  $T_{s,max}$ 的相关关系亦偏低(图 3 d),当 NDVI 值每上升 10,  $T_{s,max}$ 升高 0.7°C,两者相关系数仅 0.35。表明在秋季月份,植被覆盖的程度与地表温度的线性关系并不明显。这主要是因为此时研究区南北的气温差异并不显著,而植被的凋零使得植被覆盖的差异也不缩小,两者共同作用导致  $T_{s,max}$ 与 NDVI 几乎不相关。

### 3.4 TVD 的时空分布

基于 MODIS 数据提取的植被指数与地表温度数据,参照其对地表水分的指示意义,计算研究区逐旬的



TVD数据集(图4)。TVD均值的季节变化非常显著,在植被生长季节均在0.5以上,其中6月份达0.70表明期间地表水分状况较差;另一方面,TVD方差也表现为在植被生长季节较高,普遍在0.15以上,表明期间地表水分状况的区域差异较大。

为研究地表水分特征的时空分布规律,对不同区域内各流域TVD的均值和方差加以统计分析(表3)。结果表明,北部区域内的各流域TVD值变化的趋势主要表现为在冬季(如1月份)整体均值最低,同时空间差异性最小;到4月份时均值达到较高的水平(0.50~0.55),空间差异仍较小;至7月份则进一步上升至0.65左右,方差值保持不变;10月份TVD的均值下降到0.35以下,方差值上升到0.1~0.2间。南部区域各流域1月份的TVD均值多在0.35左右,方差值也在0.05左右;4月份TVD的均值上升到0.55~0.60间,方差值基本保持不变;7月份均值基本维持在0.60左右,方差值均不足0.10;10月份各流域的均值下降至0.20~0.25间,方差值基本维持不变。西部区域各流域1月份均值多在0.30~0.40间,方差值也在0.1以下;4月份均值上升到0.50以上,方差值保持不变;7月份均值进一步上升至0.70左右,方差值维持不变;10月份均值下降到0.40以下,方差值也上升到0.10~0.15间。中部区域各流域1月份均值多在0.20~0.30间,方差值也在0.10以下;4月份均值上升到0.50以上,方差值维持不变;7月份均值进一步上升至0.60左右,方差值不变;10月份均值下降到0.20~0.30间,方差值不变。

表3 研究区各流域TVD的统计值

Table 3 Statistics of TVDI in watersheds in study area

项目 Item	北部区域 North Part					南部区域 South Part				
	孤山川 N <sub>1</sub>	窟野河 N <sub>2</sub>	秃尾河 N <sub>3</sub>	榆溪河 N <sub>4</sub>	佳芦河 N <sub>5</sub>	云岩河 S <sub>1</sub>	洛河中游 S <sub>2</sub>	葫芦河 S <sub>3</sub>	仕望河 S <sub>4</sub>	沮水 S <sub>5</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.09	0.12	0.14	0.18	0.19	0.32	0.34	0.33	0.35
	方差 Variance	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.07	0.04	0.04
4月 Apr	均值	0.53	0.55	0.54	0.56	0.49	0.57	0.58	0.59	0.56
	方差	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.07
7月 Jul	均值	0.63	0.65	0.68	0.74	0.67	0.61	0.60	0.60	0.56
	方差	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06
10月 Oct	均值	0.34	0.39	0.34	0.27	0.29	0.21	0.25	0.23	0.20
	方差	0.20	0.18	0.16	0.10	0.16	0.03	0.13	0.08	0.09

项目 Item	西部区域 West Part				中部区域 Middle Part					
	头道川 W <sub>1</sub>	洛河上游 W <sub>2</sub>	内陆河 W <sub>3</sub>	无定河上游 W <sub>4</sub>	清涧河 M <sub>1</sub>	大理河 M <sub>2</sub>	无定河中游 M <sub>3</sub>	无定河下游 M <sub>4</sub>	延河上游 M <sub>5</sub>	延河下游 M <sub>6</sub>
1月 Jan	均值 Mean	0.37	0.33	0.34	0.26	0.30	0.28	0.20	0.24	0.32
	方差 Variance	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06
4月 Apr	均值	0.54	0.56	0.52	0.52	0.54	0.51	0.51	0.46	0.56
	方差	0.09	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.06	0.09	0.08
7月 Jul	均值	0.70	0.68	0.72	0.70	0.62	0.64	0.67	0.62	0.62
	方差	0.04	0.05	0.04	0.08	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05
10月 Oct	均值	0.32	0.29	0.37	0.38	0.21	0.28	0.26	0.20	0.28
	方差	0.09	0.08	0.11	0.14	0.06	0.08	0.08	0.02	0.08

### 3.5 VCI、TCI与TVD的相关关系

为比较各地表水分指标的相关性,对各月VCI、TCI及TVD的相关系数进行统计分析(表4)。计算结果表明,VCI与TCI的相关系数有明显的季节变化,在春夏季(如1~6月份)及秋冬季(如11~12月份),两者均表现为相关关系不明显,表明在上述季节采用植被覆盖与温度表征地表水分的差异较大;而在夏秋季(如7~9月份),两者则表现为较强的负相关关系,其中9月份的相关系数值达-0.81,表明在该季节两者对地表水分的表征能力基本相当。

TVDI与 VC的相关系数总体偏低,并存在一定程度的季节变化。在冬春季(如11~3月份),两者表现为微弱的负相关关系,表明在上述季节两者对地表水分的表征能力差异较大;在夏秋季(如5~9月份),两者相关程度较高,其中9月份达-0.70表明在该季节两者对地表水分状况的表征能力大致相当。

TVDI与 TC的相关系数全年均在0.70以上,部分月份甚至达0.85以上,表明两者对地表水分状况的表征能力完全相当。总的来看,单独采用TC与VC表征地表水分会受到明显的季节影响,而TVDI虽然和TCI关系更为密切,但能在不同季节综合体现植被覆盖和地表温度特征对地表水分的影响,从而能较好地反映区域地表水分状况的时空变化特征。

表4 VC、TCI与TVDI各月相关系数  
Table 4 Correlation coefficients of VCI, TCI and TVDI in months

项目 Item	1月 Jan	2月 Feb	3月 Mar	4月 Apr	5月 May	6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug	9月 Sep	10月 Oct	11月 Nov	12月 Dec
VC与TC相关系数 <sup>①</sup> *	0.11	0.15	0.21	0.20	0.16	0.05	-0.24	-0.48	-0.81	-0.34	0.11	0.09
VC与TVDI相关系数 <sup>②</sup>	-0.06	-0.09	-0.12	-0.27	-0.39	-0.47	-0.40	-0.33	-0.70	-0.28	-0.10	-0.06
TCI与TVDI相关系数 <sup>③</sup>	0.88	0.79	0.86	0.87	0.79	0.85	0.86	0.87	0.76	0.79	0.78	0.75

① Correlation coefficients between VCI and TCI; ② Correlation coefficients between VCI and TVDI; ③ Correlation coefficients between TCI and TVDI. \*通过0.05显著性水平检验 Significant (0.01 < P < 0.05)

### 3.6 TVDI的相关检验

上文的分析表明TVDI相对于其他指数能较好地体现地表水分的分布特征,为了进一步验证其与地表水分的对应关系,本文通过利用相关的气候因子对TVDI进行了空间验证。首先对各月TVDI进行累积并求取其均值,进一步对该计算结果按密度分级,共划分为10级(图5a)。结合该地区年均降雨量、年均温以及相应的湿润系数(图5b)的空间插值结果,统计了不同分级内各指标的均值与方差(表5)。结果表明,随着TVDI值增加,地表干燥度随之升高,表现为年均温从2.36℃持续上升到12.03℃,且空间变异有所加大;年均降雨量从556.93mm下降至349.35mm;而湿润系数则从-5.54降低至-25.70。上述指标的变化规律表明,TVDI能有效地反映研究区地表温度、降水以及植被覆盖对地表水分空间分布的综合影响。

表5 TVDI与验证因子的关系  
Table 5 Relationship of TVDI and its validating factors

分级 Class	TVDI		年均温 Average annual temperature		年均降雨量 Average annual precipitation		湿润系数 Moisture Index	
	均值 Mean	方差 Variance	均值(°C) Mean	方差 Variance	均值(mm) Mean	方差 Variance	均值 Mean	方差 Variance
1	0.18	0.03	2.36	0.81	556.93	0.45	-5.54	0.14
2	0.25	0.02	3.63	0.95	529.48	0.59	-8.82	0.25
3	0.30	0.01	4.86	0.89	515.51	0.56	-11.14	0.28
4	0.35	0.02	6.12	0.93	491.50	0.60	-13.36	0.26
5	0.41	0.02	6.77	0.88	457.63	0.50	-15.87	0.19
6	0.47	0.02	7.41	0.84	434.35	0.38	-17.54	0.17
7	0.53	0.02	8.19	0.94	407.39	0.28	-20.23	0.13
8	0.60	0.02	9.07	1.01	390.24	0.22	-22.08	0.09
9	0.66	0.02	10.55	0.96	375.86	0.26	-23.26	0.08
10	0.75	0.05	12.03	1.10	349.35	0.33	-25.70	0.10

## 4 结论与讨论

从利用植被指数测量地表水分状况的结果来看,各区域VC均值的季节分布上存在较大差异,其中在北部区域表现为4月份较高,10月份较低分布规律;中部区域与北部恰恰相反,为4月份偏低,10月份较高;南部区域与之类似,仅7月份偏高;西部区域则基本是4月份较低而1月份偏高。同时各区地表水分状况的

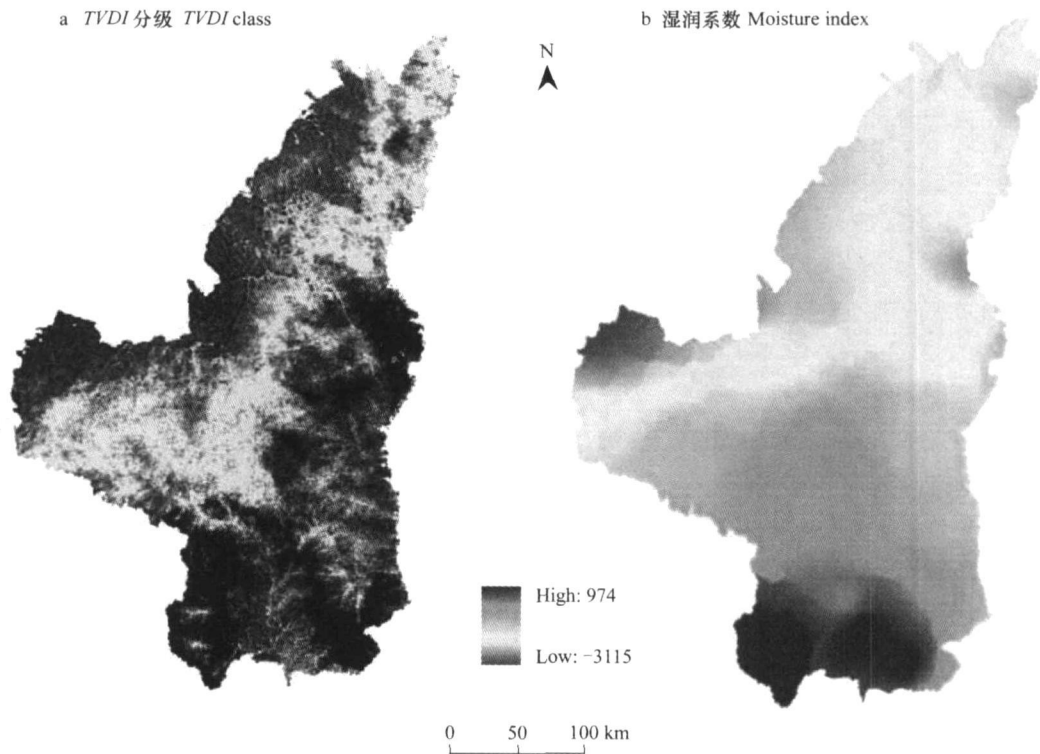


图 5 TVDI 分级及其相关验证因子

Fig 5 Classification of TVDI and its validating factors

季节变化亦存在不同的特点, 其中北部区域中秃尾河和榆溪河在 1~4 月份的 VC 均值下降最为明显, 反映期间上述流域地表水分状况有明显变干的趋势; 南部区域的地表水分状况则是在 4~7 月份上升最为显著; 西部及中部区域地表水分状况全年均处于偏低的水平。地表水分特征的空间变异性也存在季节差异, 区内大部分流域在 1 月份的 VC 方差值达 0.10 以上, 其中北部区域尤为明显, 反映了各流域内部地表水分状况差异在冬季较为显著。

从利用地表温度测量地表水分状况的结果来看, 各区域的 TC 均值皆为 4~7 月份高于 10~翌年 1 月份, 表现了区域地表水分状况的季节分布规律。但各区地表水分状况的季节变化存在不同的特点, 其中北部区域 1~4 月份的 TC 均值上升最为明显, 反映期间区域地表水分状况明显变干; 南部及中部区域的地表水分状况则在 7~10 月份间显著趋湿; 而西部区域地表水分状况在 1~4 月份的变化幅度与 7~10 月份大致相当。

从植被指数与地表温度的线性关系来看, 在 1~7 月份, 区域植被覆盖的分布格局会进一步增加南部与北部气温的差异; 而 4 月份和 10 月份, 则会缩减南北气温的差异。因此, 采用 TVDI 评价地表水分状况时, 必须考虑地表气温与植被覆盖线性关系的季节变化。同时地表水分特征的空间变异性也存在季节差异, 区内大部分流域在 10~翌年 1 月份的 TVDI 方差值达 0.10 以上, 其中北部区域尤为突出, 表明期间各流域内部地表水分状况差异较为显著。

从综合反映植被覆盖和地表温度特征的 TVDI 的时空分布来看, 各区域的 TVDI 均值皆为 4~7 月份高于 10~翌年 1 月份, 表现了区域地表水分状况的季节分布规律。但各区地表水分状况的季节变化存在不同的特点, 其中北部区域 1~4 月份的 TVDI 均值上升最为明显, 反映期间区域地表水分状况明显变干; 南部区域的地表水分状况则在 7~10 月份间显著趋湿; 而西部及中部区域地表水分状况在 1~4 月份的上升幅度与 7~10 月份的下降幅度大致相当。同时地表水分特征的空间变异性也存在季节差异, 区内大部分流域在 10 月份的 TVDI 方差值达 0.10 以上, 其中北部区域尤为突出, 反映期间各流域内地表水分状况差异较显著的特征。

从分析结果来看, 单独采用 TC 与 VC 表征地表水分会受到明显的季节影响, 而 TVDI 虽然和 TC 关系更

为密切,但能在不同季节综合体现植被覆盖和地表温度特征对地表水分的影响,从而能较好的反映区域地表水分状况的时空变化特征。从与气候因子的相互验证来看,TVD能有效地反映研究区地表温度、降水及植被覆盖对地表水分空间分布的综合影响。

TVD原理简单,应用性较强,但尚存在不足之处,主要表现在,在较高的NDVI值下,TVD等值线间距变小,导致TVD不确定性增加;其次,TVD方法将Ts/NDVI特征空间由梯形简化为三角形更增加了在NDVI高值情况下,TVD的不确定性;再次,其将湿边看作水平直线,而不是在梯形特征空间中的斜线,也导致在NDVI低值区对TVD的高估。另外,由于TVD方法的内在限制,其提取的水分信息同时包含了地表土壤水分和植被表层水分,因此,在未来研究中应通过对地表覆盖类型的细分、地面采样数据的时空匹配等途径来提升TVD的应用水平。

## References

- [ 1 ] 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
- [ 2 ] Ran Q, Zhang Z X, Zhang G P, et al. DEM correction using TVDI to evaluate soil moisture status in China. *Science of Soil and Water Conservation* 2005, 3(2): 32-36
- [ 3 ] Fu B J, Wang J, Ma K M. Effect of land use on soil water in loess hill area. *Science Foundation in China* 1999, 13(4): 225-227
- [ 4 ] Wang P X, Wan Z M, Gong J Y, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products. *Advance in Earth Sciences* 2003, 18(8): 527-533
- [ 5 ] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature-vegetation index for land cover and land cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing* 1996, 17: 463-487.
- [ 6 ] Liu W, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing* 1996, 17: 2761-2782
- [ 7 ] Verbeest J, Fleck S, Coppin P. Estimation of fuel moisture towards risk assessment: A review. *Forest Fire Research and Wildland Fire Safety* Viçegas (ed.), Rotterdam: Mupress, 2002: 1-11
- [ 8 ] Chuvpilo E, Aguado J, Cocero D, et al. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA AVHRR images in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing* 2003, 24: 1621-1637
- [ 9 ] Andersen J, Sandholt J, Jensen K H, et al. Perspectives in using a remotely sensed dryness index in distributed hydrological models at river basin scale. *Hydrological Processes* 2002, 16: 2973-2987
- [ 10 ] Kamari A, Dall'olio G. Remote sensing monitoring of desertification: Phenology and droughts. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 2003, 14: 22-38.
- [ 11 ] Jackson R D, Idso S B, Reginald R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research* 1981, 17: 1133-1138
- [ 12 ] Zhang R H. A new model for estimating crop water stress based on infrared radiation information. *Science in China B* 1986, 7: 776-784
- [ 13 ] Tian Guoliang. Estimation of evapotranspiration and soil moisture and drought monitoring using remote sensing in north China plain. *Space and Environment* IAF, Graz Austria, 1993: 128-135.
- [ 14 ] 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 Sensing of Environment* 1994, 49: 246-263.
- [ 15 ] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing* 1990, 11: 1405-1419
- [ 16 ] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* 1995, 15: 91-100
- [ 17 ] M'cVicar T R, Jupp D L B, Yang X, et al. Linking region water balance models with remote sensing. In: *Proceeding of the 13th Asian Conference on Remote Sensing Ulaanbaatar, Mongolia* 1992, Pt. 1-Pt. 6.
- [ 18 ] Sandholt J, 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: 213-224.
- [ 19 ] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over southeastern Australia. *International Journal of Remote Sensing* 1991, 12(10): 2021-2044
- [ 20 ] Goetz S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing* 1997, 18(15): 71-94

- [ 21] Gillies R R, Carlson T N, Gu J, et al. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing* 1997, 18 (15): 3145-3166.
- [ 22] Moran M S, Clarke T, Kustas W P, et al. A. Evaluation of hydrologic parameters in a semi arid range land using remotely sensed spectral data. *Water Resources Research* 1994, 30 (5): 1287-1297.
- [ 23] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology* 1997, 77: 191-205.
- [ 24] Friedl M A, Davis F W. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment* 1994, 48: 1-17.
- [ 25] Wang G S, Xia J, Niu C W. Flow routing method and its application in distributed hydrological modeling. *Geographical Research* 2004, 23(2): 175-182.
- [ 26] Zheng H X, Liu C M, Wang Z G. Simulation of hydrological processes in Lushi Basin basing distributed hydrological model. *Geographical Research* 2004, 23(4): 447-454.
- [ 27] Loess Plateau Integrated Survey Group of Chinese Academy of Sciences. Soil resources and its reasonable use on Loess Plateau. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1991.
- [ 28] Loess Plateau Integrated Survey Group of Chinese Academy of Sciences. Data Atlas of Resources, Environment, Society and Economy in Loess Plateau. Beijing: China Economy Press, 1992.
- [ 29] Li Z G, Wang Y L, Chang H F. Landscape fragmentation and soil bareness study in north Shaanxi Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* 2005, 25(3): 421-427.
- [ 30] Fu B J. The spatial pattern analysis of agricultural landscape in the loess area. *Acta Ecologica Sinica* 1995, 15(2): 113-119.
- [ 31] Yan N L, Yu X G. Goals, principles and systems of eco-functional regionalization in China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* 2003, 12(6): 579-585.
- [ 32] McVicar T R, Jupp D L B. The current and potential operational use of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: A review. *Agricultural Systems* 1998, 57: 399-468.
- [ 33] Qi S H, Li G C, Wang C Y, et al. Study on monitoring drought in China with MODIS product. *Advances in Water Science* 2005, 16(1): 56-61.
- [ 34] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1990, 28: 940-948.
- [ 35] Carlson T N, Gillies R R, Penry 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.
- [ 36] Friedl M A, Davis F W. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment* 1994, 48: 1-17.

#### 参考文献:

- [ 1] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法 (TVD) 反演新疆土壤湿度. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473-478.
- [ 2] 冉琼, 张增祥, 张国平等. 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.
- [ 3] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. *中国自然科学基金*, 1999, 13(4): 225-227.
- [ 4] 王鹏新, 王正国, 龚健雅等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(8): 527-533.
- [ 21] 王纲胜, 夏军, 牛存稳. 分布式水文模拟汇流方法及应用. *地理研究*, 2004, 23(2): 175-182.
- [ 22] 郑红星, 刘昌明, 王中根. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. *地理研究*, 2004, 23(4): 447-454.
- [ 23] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤资源及其合理利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.
- [ 24] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区资源环境社会经济数据集. 北京: 中国经济出版社, 1992.
- [ 25] 李正国, 王仰麟, 张小飞. 陕北黄土高原景观破碎化及其土壤裸露效应研究. *生态学报*, 2005, 25(3): 421-427.
- [ 26] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析. *生态学报*, 1995, 15(2): 113-120.
- [ 27] 燕乃玲, 虞孝感. 我国生态功能区划的目标、原则与体系. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 579-585.
- [ 29] 齐述华, 李贵才, 王长耀等. 利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究. *水科学进展*, 2005, 16(1): 56-61.