基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化

李正国¹²,王仰麟^{2,*},吴健生²,张小飞³

(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。研究结果表明,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^{1,2}, WANG Yang-Lin^{2,*}, WU Jian-Sheng², CHANG Hsiao-Fei³

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

收稿日期 2007-02-08;修订日期 2007-10-25

作者简介 字正国 (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 lzg. 123@ 263. net

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

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 lzg. 123@263. net

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)

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)

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^[~3]。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,要实现大范围内的地表水分监测,还需要借助遥感技术^[4~6]。 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^[7,8]、水文模型的 参数验证^[9]以及沙漠化或干旱对植被的水分压力的估测等^[10]。

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^[11~13],但是该比值只适用于裸土或稀疏植被覆盖^[14]。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)^[15],温度状态指数 (TCI)^[16],以及 McVicar 等^[17]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^[18]。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^[19 20]。其中具有代表性的是 Sandholt 等^[21]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^[18]。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^[14],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^[21 22]。利用 SVAT 模型可以估算地表温度/植被指数特征空间的形状^[23],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^[18 24]。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^[25 26]。

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 VCI 指数和基于地表温度特征的 TCI 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°28 '至111°15',北纬35°21 '至39°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80606km²,分属延安和 榆林市,下辖25 个县区、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℃以上,局部 地区可达14.3℃,西北部和北部地区一般在2.5℃以下。7 月份平均气温大多超过了22℃,1 月份平均气温各 地变化在 – 1~16℃之间^[27,28]。



N1: Gushanchuan; N2: Kuye River; N3: Tuwei River;
N4: Yuxi River; N5: Jialu River;
W1: Toudaochuan; W2: Upper of Luo River; W3:
Inland Rivers; W4: Upper of Wuding River;
M1: Qingjian River; M2: Dali River; M3: Middle of
Wuding River; M4:Lower of Wuding River; M5: Upper of Yan River; M6: Lower of Yan River;
S1: Yunyan River, S2: Middle of Luo River; S3: Hulu
River; S4: Shiwang River; S5: Ju River.

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^[29]。

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^[26 27]。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 AreGIS 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 1000m 和 250m,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 Beijing1954。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^{译1}。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¹¹⁴¹。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 VCI 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 VCI 适用于 估算区域级的干旱程度¹⁶¹。植被状态指数的定义为¹⁰⁵¹:

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

式中 *NDVI*_i为某一特定年第 i 个时期的 *NDVI* 值 *,NDVI*_{max}和 *NDVI*_{min}分别代表所研究年限内第 *i* 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 i 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 i 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 VCI 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^[11,12]。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*^[4,19]。*TCI*的定义与*VCI*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^[6]:

$$TCI = \frac{Ts_i - Ts_{\min}}{Ts_{\max} - Ts_{\min}}$$
(2)

式中 ,*Ts*_i为某一特定年第 *i* 个时期的地表温度值 ,*Ts*_{max}和 *Ts*_{min}分别表示所研究年限内第 *i* 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、湿度等对热红外遥感的影响及地表温度的季节性变化 ^[28]。

2.4 基于 Ts/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^[4]。植被指数提供了绿色植被的生长状况和覆盖度信息,如果结合光谱植被指数和陆表温度 的综合信息监测土壤湿度,可消除土壤背景的影响^[33]。

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 *Ts* 和 *NDVI* 之间存在 明显的负相关关系^[4,35]。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^[6]。相 关研究表明,以 *NDVI* 和 *Ts* 为横纵坐标的散点图呈三角形^[4,35]或梯形^[14]。Sandholt 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^[18]。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 *Ts/NDVI* 斜率和截距^[20]。

图 2 展示了 *Ts/NDVI* 特征空间的概念框架,主要体现了 *Ts* 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 *Ts/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: 式中 , Ts_{min} 为三角形中最小的地表温度 ,定义了相应的湿边 ,Ts 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 ($Ts_{max} = a + bNDVI$)中的参数 , Ts_{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_{o}

需要指出的是,像元在 *Ts/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 *Ts* 和 *NDVI* ;而稀疏植被地区的 *Ts* 和 *NDVI* 的提取同时受到 土壤和植被的影响而变得更为复杂^[18,19],更重要的是 *Ts*_{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 3 Tsmax 与 NDVI 各月线性关系

Fig. 3 Linear relationships between Tsmax and NDVI in months

3 结果与分析

3.1 VCI 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 VCI 数据集 (图 4)。统计结果表明 (表 1), VCI 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 ~ 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,VCI 方差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 VCI 的时空分布规律,对各流域 VCI 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 VCI 均值高于其他流域,变化范围多在0.20~0.45 间,各流域 VCI 方差值均在0.1 左右 升月 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 VCI 均值多在0.45 左右,方差值也在0.10 左右 升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

			北部	区域 North	part		南部区域 South Part					
项目 Item		孤山川 N1	窟野河 N2	秃尾河 N3	榆溪河 N4	佳芦河 N5	云岩河 S1	洛河中游 S2	葫芦河 S3	仕望河 S4	沮水 S5	
1月	均值 Mean	0.27	0.32	0.45	0.51	0.22	0.40	0.47	0.47	0.43	0.53	
Jan.	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	均值	0.31	0.32	0.28	0.27	0.24	0.34	0.40	0.40	0.38	0.45	
Apr.	方差	0.05	0.06	0.05	0.03	0.06	0.06	0.08	0.06	0.07	0.09	
7月	均值	0.26	0.27	0.26	0.29	0.25	0.51	0.60	0.69	0.66	0.74	
Jul.	方差	0.04	0.04	0.08	0.11	0.04	0.13	0.12	0.09	0.15	0.09	
10月	均值	0.25	0.25	0.26	0.26	0.30	0.49	0.55	0.60	0.62	0.70	
Oct.	方差	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05	0.09	0.10	0.07	0.11	0.10	
		西部区域 West part					中部区域 Middle part					
项目 Ite	em -	头道川 W1	洛河上游 W2	内陆河 W3	无定河 上游 W4	清涧河 M1	大理河 M2	无定河中游 M3	无定河下游 M4	• 延河上游 M5	延河下游 M6	
1月	均值 Mean	0.33	0.33	0.40	0.40	0.27	0.27	0.23	0.23	0.30	0.29	
Jan.	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	均值	0.27	0.29	0.26	0.26	0.25	0.23	0.23	0.23	0.26	0.28	
Apr.	方差	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06	
7月	均值	0.31	0.34	0.32	0.28	0.31	0.23	0.25	0.24	0.31	0.38	
Jul.	方差	0.06	0.07	0.08	0.09	0.04	0.04	0.08	0.05	0.07	0.08	
10月	均值	0.30	0.36	0.26	0.28	0.31	0.28	0.29	0.33	0.34	0.38	
Oct.	方差	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06	

表1 研究区各流域 VCI 的统计值 Table 1 Statistics of VCI in watersheds in study area

3.2 TCI 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 TCI 数据集 (图 4)。TCI 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,TCI 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 TCI 的时空分布规律,对各流域 TCI 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 TCI 均值在 0.10~0.20间,TCI 方差值均在 0.05 左右 # 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 # 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 # 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 # 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*TCI*均值有所下降,其他流域

4569

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。

Table 2 Statistics of TCI in watersheds in study area																
			北部	区域 North	part			南部	邹区域 South Part							
项目 Item		孤山川 N1	窟野河 N2	秃尾河 N3	榆溪河 N4	佳芦河 N5	云岩河 S1	洛河中游 S2	葫芦河 S3	仕望河 54	沮水 S5					
1月	均值 Mean	0.09	0.11	0.13	0.17	0.18	0.31	0.33	0.33	0.35	0.36					
Jan.	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	均值	0.51	0.54	0.53	0.54	0.48	0.56	0.57	0.58	0.56	0.56					
Apr.	方差	0.05	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.07	0.06					
7月	均值	0.42	0.50	0.56	0.58	0.56	0.34	0.25	0.19	0.27	0.17					
Jul.	方差	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.09	0.04					
10月	均值	0.31	0.37	0.31	0.22	0.25	0.14	0.17	0.15	0.12	0.16					
Oct.	方差	0.23	0.21	0.19	0.12	0.19	0.04	0.15	0.09	0.09	0.12					
			西部区域(West part)			中部区域 (Middle part)									
项目 Ite	em -	头道川 W1	洛河上游 W2	内陆河 W3	无定河 上游 W4	清涧河 M1	大理河 M2	无定河中游: M3	无定河下游 M4	延河上游 M5	延河下游 M6					
1月	均值 Mean	0.35	0.31	0.33	0.24	0.28	0.27	0.18	0.23	0.31	0.29					
Jan.	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	均值	0.53	0.54	0.51	0.51	0.53	0.49	0.50	0.44	0.54	0.56					
Apr.	方差	0.08	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.06	0.09	0.07	0.08					
7月	均值	0.40	0.35	0.47	0.54	0.44	0.51	0.53	0.58	0.34	0.38					
Jul.	方差	0.07	0.06	0.07	0.09	0.06	0.06	0.05	0.07	0.06	0.07					
10月	均值	0.27	0.24	0.35	0.36	0.14	0.24	0.20	0.13	0.23	0.14					
Oct.	方差	0.11	0.09	0.13	0.16	0.07	0.10	0.09	0.03	0.09	0.07					

表 2 研究区各流域 TCI 的统计值

3.3 *Ts*_{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 *Ts*_{max}呈现正相关关系(图 3a),当 *NDVI* 值每上升10 (0~255),*Ts*_{max}升高1.6℃,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*Ts*_{max}与 *NDVI* 呈现正相关关系。

在 4 月份, NDVI 与 Ts_{max}呈现的相关程度较低 (图 3b),当 NDVI 值每上升 10, Ts_{max}升高 0.6℃, 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 Ts_{max}与 NDVI 几乎不相关。

在 7 月份 ,NDVI 与 Ts_{max}呈现负相关关系 (图 3 c) ,当 NDVI 值上升每上升 10 ,Ts_{max}下降 2.0℃,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 Ts_{max}与 NDVI 呈现显著的负相关关系。

在 10 月份 ,NDVI 与 Ts_{max}的相关关系亦偏低 (图 3d),当 NDVI 值每上升 10 ,Ts_{max}升高 0.7℃,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 Ts_{max}与 NDVI 几 乎不相关。

3.4 *TVDI* 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

TVDI 数据集 (图 4)。TVDI 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,TVDI 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 TVDI 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 TVDI 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 TVDI 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 TVDI 均值多在 0.35 左右,方差值也在 0.05 左右 # 月份 TVDI 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 # 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 # 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。

Table 5 Statistics of Typh in watersheas in study area												
			北部	区域 North	part		南部区域 South Part					
项目 Item		孤山川 N1	窟野河 N2	秃尾河 N3	榆溪河 N4	佳芦河 N5	云岩河 S1	洛河中游 S2	葫芦河 S3	仕望河 54	沮水 S5	
1月	均值 Mean	0.09	0.12	0.14	0.18	0.19	0.32	0.34	0.33	0.35	0.35	
Jan.	方差 Variance	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.07	0.04	0.07	0.04	
4月	均值	0.53	0.55	0.54	0.56	0.49	0.57	0.58	0.59	0.56	0.56	
Apr.	方差	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.07	0.06	
7月	均值	0.63	0.65	0.68	0.74	0.67	0.61	0.60	0.60	0.56	0.59	
Jul.	方差	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	
10月	均值	0.34	0.39	0.34	0.27	0.29	0.21	0.25	0.23	0.20	0.24	
Oct.	方差	0.20	0.18	0.16	0.10	0.16	0.03	0.13	0.08	0.09	0.10	
		西部区域 West part					中部区域 Middle part					
项目 Ite	em -	头道川 W1	洛河上游 W2	内陆河 W3	无定河 上游 W4	清涧河 M1	大理河 M2	无定河中游 M3	无定河下游 M4	[:] 延河上游 M5	延河下游 M6	
1月	均值 Mean	0.37	0.33	0.34	0.26	0.30	0.28	0.20	0.24	0.32	0.31	
Jan.	方差 Variance	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	
4月	均值	0.54	0.56	0.52	0.52	0.54	0.51	0.51	0.46	0.56	0.58	
Apr.	方差	0.09	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.06	0.09	0.08	0.07	
7月	均值	0.70	0.68	0.72	0.70	0.62	0.64	0.67	0.62	0.62	0.62	
Jul.	方差	0.04	0.05	0.04	0.08	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	
10月	均值	0.32	0.29	0.37	0.38	0.21	0.28	0.26	0.20	0.28	0.21	
Oct.	方差	0.09	0.08	0.11	0.14	0.06	0.08	0.08	0.02	0.08	0.06	

表 3 研究区各流域 TVDI 的统计值

Table 2

Statistics of TVDL in watersheds in study and

3.5 VCI、TCI 与 TVDI 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 TVDI 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。

27 卷

TVDI 与 VCI 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 TCI 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 TCI 与 VCI 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。

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.
VCI 与 TCI 相关系数 ^{①*}	0.11	0.15	0.21	0.20	0.16	0.05	-0.24	-0.48	-0.81	-0.34	0.11	0.09
VCI 与 TVDI 相关系数 ^②	-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 ³	0.88	0.79	0.86	0.87	0.79	0.85	0.86	0.87	0.76	0.79	0.78	0.75

表4 VCI、TCI 与 TVDI 各月相关系数

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。

Table 5 Relationship of TVDI and its validating factors											
	TVDI		年均	温	年均降	雨量	湿润系数 Moisture Index				
分级 _			Average annua	l temperature	Average annua	precipitation					
Class	均值	方差	均值 (℃)	方差	均值 (mm)	方差	均值	方差			
	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	Variance	Mean	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			

表 5 TVDI 与验证因子的关系

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 VCI 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月份较低的分布规律;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 VCI 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 VCI 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*TCI*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*TCI*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 TCI 与 VCI 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,TVDI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。

TVDI 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,TVDI 等值线间距变小,导致 TVDI 不确定性增加;其次,TVDI 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,TVDI 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 TVDI 的高估。另外,由于 TVDI 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 TVDI 的应用水平。

References :

- 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 #63-487.
- [6] Liu W, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17:2761-2782.
- [7] Verbesslt J, Fleck S, Coppin P. Estimation of fuel moister towards risk assessment : A review. Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Viegas (ed.). Rotterdam :Miupress, 2002 :1 -11.
- [8] Chuvieco E, Aguado I, 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 I, 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] Karnieli A, Dall'Olmo 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, Reginato 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 nor-homogeneous 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] McVicar 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. B6.1 – B6.6.
- [18] Sandholt I, Rasmussena K, Andersenb 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, Gui 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 semiarid rangeland 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 Shaanbei 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 System, 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, 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.
- [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 涨增祥,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.
- [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, Wan Zheng Ming, 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 涨小飞. 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) #21~427.
- [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.

http://www.ecologica.cn