

基于 4 种植被指数 TVDI 模型的三江平原土壤湿度反演

陈明星, 张玉虎

(首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要:利用遥感手段监测土壤湿度有利于分析大尺度区域的土壤干湿状况。比对分析不同植被指数计算的土壤湿度指数(TVDI)的精度能够提高 TVDI 反演土壤湿度的实际应用价值。以三江平原为研究区,基于 2013 年 5—9 月的四期 MODIS 影像,利用归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、修正土壤调节植被指数(MSAVI)、比值植被指数(RVI)分别计算 TVDI,并以地面实测土壤湿度数据及降水数据进行精度验证。结果表明:(1) 4 种植被指数计算的 TVDI 与土壤湿度数据均具有一定的负相关关系,即 TVDI 值越高,土壤湿度值越低;(2) 不同植被指数计算的 TVDI 在 5 月、6 月、9 月与土壤湿度回归分析的 R^2 数值相近,均适合用来反演这 3 个时间段的土壤湿度,在 7 月份,相较于 NDVI 和 RVI 计算的 TVDI 结果(R^2 均在 0.15 左右),基于 EVI 和 MSAVI 计算的 TVDI(R^2 均在 0.35 左右)更适合反演该时期的土壤湿度;(3) 5—9 月期间,干旱现象主要发生在三江平原的中部及西南部,干旱程度主要为轻旱,东部及东北部在不同时期基本保持在正常或轻微湿润状态。

关键词: TVDI; 植被指数; 土壤湿度; 降水量; 三江平原

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0093-08

Retrieval of Soil Moisture in Sanjiang Plain Based on TVDI Model with Four Vegetation Indices

CHEN Mingxing, ZHANG Yuhu

(College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The use of remote sensing to monitor soil moisture is conducive to the analysis of soil moisture conditions in large-scale areas. Comparing and analyzing the accuracy of the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) calculated under different vegetation indices can increase the practical value of TVDI on retrieval of soil moisture. There are four vegetation indices, including NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index), were respectively used to construct LST-VI feature space and calculate TVDI by combining with land surface temperature data. The results indicated that: (1) all the TVDI calculated by different vegetation indices presented the negative correlations with soil moisture data, that is, the higher the TVDI value, the lower the soil moisture value; (2) the values of R^2 of regression analysis between soil moisture data and TVDI based on different vegetation indices were similar in May, June and September, and they were all suitable for retrieving soil moisture in these three periods; in July, compared to the TVDI results calculated by NDVI and RVI (R^2 is around 0.15), TVDI based on EVI and MSAVI (R^2 is around 0.35) was more suitable for retrieving soil moisture in this period; (3) from May to September, the drought mainly occurred in the central and southwest parts of the Sanjiang Plain, and the degree of drought was mainly mild drought. The eastern and northeastern parts remained basically normal or slightly humid in different periods.

Keywords: TVDI; vegetation Index; soil moisture; precipitation; Sanjiang Plain

土壤湿度是水文学、气象学以及农业科学研究领域的一个重要参数。大型农灌区土壤湿度状况的监测是农业用水管理以及农作物旱情预报的一个重要内容^[1],一直以来受到学者们的广泛关注^[2-4]。遥感手段相对于传统的土壤湿度监测手段,能够快速获取大面积区域的土壤湿度状况,对于农业旱情监测具有较大的实用价值^[5]。国内外学者对土壤湿度的遥感监测方法做了许多研究,提出了不同的模型和方法,总体上分为光学遥感和微波遥感两种方式,主要有:表观热惯量法^[6-7]、温度植被干旱指数^[8-9]、植被供水指数^[10-11]、微波极化差异指数^[12]、积分方程模型^[13]、Dobson 模型^[14]等。微波遥感方式仅适合小尺度土壤湿度反演^[15],光学遥感手段中部分方法在实际应用中也具有一定的局限性,如表观热惯量方法仅适合于裸土地区土壤湿度的估算^[16]。在众多的模型与方法中,通过 LST-NDVI 特征空间计算 TVDI 反演土壤湿度的方法,由于较强的适用性在国内外得到了广泛的研究与关注。齐述华等^[17]、曹雷等^[18]研究表明 TVDI 可有效反演区域土壤水分,且精度较高, J Chen^[19]和 Li Z 等^[20]用 TVDI 方法分别研究了我国黄淮海平原和陕北半干旱黄土高原的土壤湿度状况,均得到了较好的效果; N. T. Sona 等^[21]探讨了利用 TVDI 反演的土壤湿度结果对农业干旱监测的适用性,验证结果显示该方法效果较好。NR Patel 等^[22]评估了 TVDI 监测土壤湿度状况的潜力,发现 TVDI 在植被覆盖稀疏时能够较好的监测土壤湿度的时间变化。当前大多数研究在 TVDI 模型计算中仅采用归一化植被指数,但是归一化植被指数对于不同时期植被覆盖差异的敏感性不同,影响了 TVDI 监测土壤湿度的准确性。

本文考虑对植被覆盖度敏感性不同的 4 种植被指数,以三江平原为研究区,计算不同植被指数下的 TVDI,并用土壤相对湿度和降水量数据对 TVDI 监测土壤湿度状况的效果进行验证。对比不同植被指数下 TVDI 模型对土壤湿度状况的监测效果,确定反演土壤湿度效果最佳的植被指数,为三江平原地区土壤湿度的监测提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

三江平原位于中国黑龙江省东北部,介于 $43^{\circ}50'02''$ — $48^{\circ}24'41''$ N, $129^{\circ}11'49''$ — $134^{\circ}46'37''$ E, 地理位置如图 1 所示。是由松花江、黑龙江和乌苏里江冲积形成的低平

原,土地面积为 $1.09 \times 10^5 \text{ km}^2$,地势总体特征是西南高东北低。本区属于温带季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。1 月份平均气温低于 -18°C , 7 月平均气温 $21 \sim 22^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $500 \sim 650 \text{ mm}$, 且集中在夏季,属于湿润、半湿润气候区。行政区域包括佳木斯、鸡西、鹤岗、双鸭山、七台河等地级市以及牡丹江市所属的穆稜县和哈尔滨所属的依兰县,共计 23 个县(市、区)。三江平原是我国重要的粮食产区,主要农作物为水稻、玉米、大豆等。

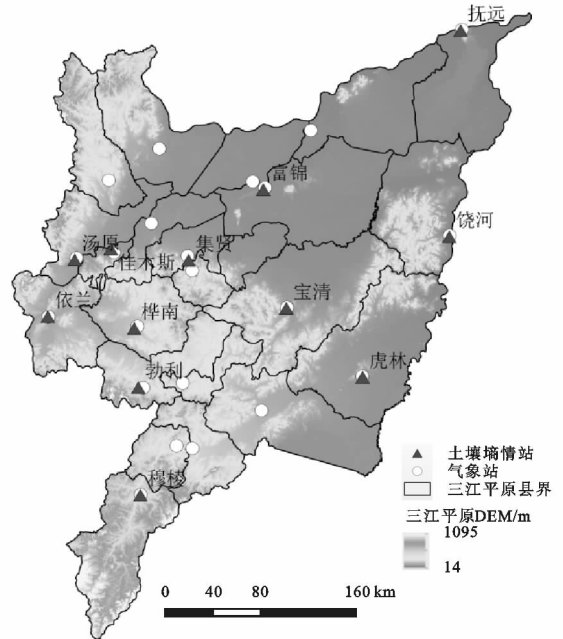


图 1 研究区位置

1.2 原理和方法

温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 最早是由 Sandholt 等^[23]提出, TVDI 主要考虑了归一化植被指数 (NDVI) 和地表温度 (LST) 这两个描述土壤表层特征的重要参数^[24], 以此构建 NDVI—LST 的特征空间, Sandholt 等认为 NDVI-LST 的特征空间中存在一系列反映土壤湿度的等值线, 据此提出了温度植被干旱指数 (TVDI) 的概念 (图 2)。其公式^[25-26]为:

$$\text{TVDI} = \frac{\text{LST} - \text{LST}_{\min}}{\text{LST}_{\max} - \text{LST}_{\min}} \quad (1)$$

式中: LST_{\min} 为 NDVI 相同值对应的最低地表温度, 为 NDVI-LST 特征空间的湿边, LST_{\max} 为 NDVI 相同值对应的最高地表温度, 为 NDVI-LST 特征空间的干边。根据影像像元构造的特征空间, 通过线性拟合获得特征空间中的干边和湿边方程, 其公式^[25]为:

$$\text{LST}_{\max} = \alpha_1 + b_1 \times \text{NDVI} \quad (2)$$

$$\text{LST}_{\min} = \alpha_2 + b_2 \times \text{NDVI} \quad (3)$$

式中: $\alpha_1, b_1, \alpha_2, b_2$ 分别是特征空间中拟合的干边和湿边方程的系数。TVDI 值在 $0 \sim 1$ 之间, 在干边上

TVDI 为 1,在湿边上 TVDI 为 0。TVDI 越趋向于 0,表示土壤湿度越高;TVDI 越趋向于 1,表示土壤湿度越低。

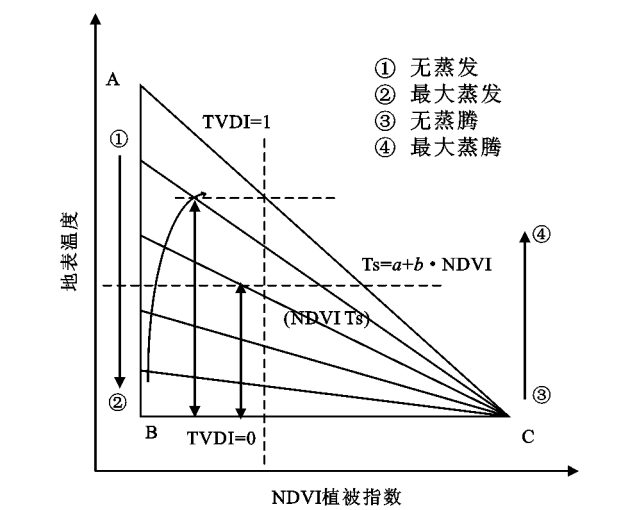


图 2 LST-NDVI 特征空间

1.3 数据来源及处理

本研究采用的遥感数据来自于美国 USGS 网站提供的 MODIS Terra 产品数据 (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis),包括每 8 d 合成的空间分辨率为 1 000 m 的地表温度产品(MOD11A2)和空间分辨率为 500 m 的地表反射率数据(MOD09A1)。数据时相覆盖了 2013 年 5—9 月

不同作物生长期的植被覆盖情况(东北地区植被覆盖度在一年内呈先上升后下降趋势,最高的时间段为 7—8 月份^[27])。本次研究使用的气象数据和土壤湿度数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>),时间为 2013 年 5 月至 9 月。研究区共有 12 个土壤墒情站和 22 个气象站(图 1),选取 12 个与土壤墒情站对应的气象站。土壤墒情站提供了每旬的 20 cm 深度的土壤相对湿度数据,气象站提供了逐日降水量数据。遥感影像的选取尽可能保证与土壤相对数据时间上的对应,并覆盖 5—9 月的每个月份。

将 MOD09A1,MOD11A2 影像进行预处理后得到 500 m 分辨率的地表反射率和地表温度数据,反射率数据包括:红光波段(Red)和近红外(NIR)波段和蓝光波段(Blue)波段。使用 ArcGIS 软件分别计算得到归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、改进的修正土壤调整植被指数(MSAVI)以及比值植被指数(RVI),在 ENVI 中采用基于 IDL 语言开发的 TVDI 计算工具,输入植被指数和地表温度数据获取构建特征空间的植被指数和地表温度值及计算出的 TVDI 数字影像。不同植被指数^[25,28]的计算公式见表 1。在预处理过程中,由于 8 月份的遥感影像云量较大,经去云处理后影像缺失范围较大,故不做分析。

表 1 不同植被指数计算公式

植被指数	计算公式
归一化植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
增强型植被指数(EVI)	$EVI = 2.5 \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \right)$
改进的修正土壤调整植被指数(MSAVI)	$MSAVI = \frac{1}{2} \left[(2\rho_{RED} + 1) - \sqrt{(2\rho_{RED} + 1)^2 - 8((\rho_{NIR} - \rho_{RED}))} \right]$
比值植被指数(RVI)	$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$

注:ρ_{NIR}为近红光波段反射率,ρ_{RED}为红光波段反射率,ρ_{BLUE}为蓝光波段反射率。

2 结果与分析

2.1 不同植被指数构造的特征空间

TVDI 在计算过程中一般不考虑水体存在的区域,利用植被指数值将这部分区域剔除。为了进一步降低误差,根据像元统计及目视解译,结合不同时期的植被指数值,选取不同的阈值(5 月为 0.04、6 月为 0.05、7 月为 0.1、9 月为 0.1)对临湖、临河或河中沙洲等距离水体较近,但由于植被指数计算误差存在少量水体或土壤水分饱和的裸地所在区域的少量像元进行剔除。在 Excel 软件中,以植被指数为横坐标,LST 值为纵坐标,构建不同植被指数的 LST-VI 的特

征空间,结果如图 3。

根据图 3,特征空间形状总体相似,地表温度的最大值均表现为随着植被指数值的增大,先有轻微上升之后逐渐下降,但总体上随植被指数增加呈减小趋势,上升区间主要处于植被指数小于 0.2 区间,这部分主要为裸地或有稀疏植被分布的地区,由于植被覆盖度较低,很难对区域内的地表温度产生调控作用。地表温度的最小值总体上呈现随植被指数的增加而增大的趋势,但是上升速率较小,地表温度最小值所在区域可能代表了湿地、径流量不大的水系等^[26],这些区域的地表温度在自然条件下处于比较稳定的水平。

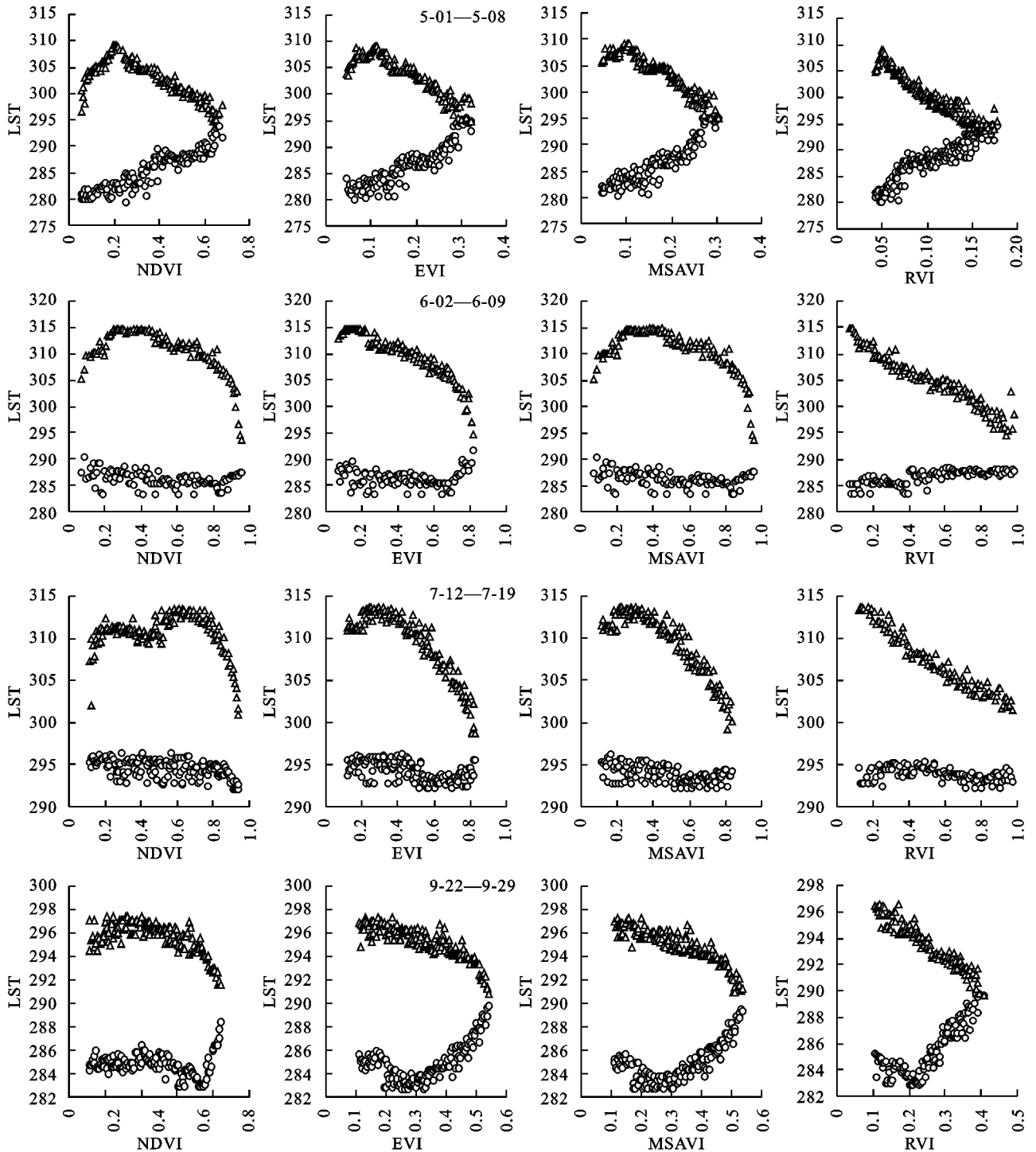


图 3 2013 年 5—9 月 LST-VI 特征空间

同一时期,不同植被指数构造的特征空间存在一定区别,LST-NDVI 构造的特征空间在不同时期相较于其他植被指数较差,除 5 月外,特征空间的形状与理论的三角形均存在差异。LST-RVI 构造的特征空间在 4 种植被指数中效果最好,LST-EVI 和 LST-MSAVI 构造的特征空间区别不大,效果均较好。特征空间总体上符合理论的三角形关系,与前人的相关研究结果一致^[17-18],构造的特征空间可以用来获取 TVDI。

2.2 特征空间对应干、湿边的确定

在理想状态下,当地表覆盖情况满足从裸土到植被完全覆盖均匀变化,土壤表层含水量从凋萎系数到田间持水量均匀变化时,特征空间的干、湿边能拟合成直线状^[29]。根据特征空间的构造结果,拟合不同植被指数的特征空间对应的干边和湿边方程,情况见表 2。

从表 2 可以看出,特征空间的干边方程的拟合效果总体较好, R^2 大部分都在 0.8 以上;湿边方程的拟合效果总体较差, R^2 大部分低于 0.5,三江平原存在

大面积的湿地及森林,可能是由于此类覆盖物对地表温度的调控作用所导致的。植被指数对于干、湿边方程的拟合效果存在一定影响,总体上不同时期 LST-RVI 的干、湿边方程拟合效果最好,其次为 LST-EVI

和 LST-MSAVI,LST-NDVI 的拟合效果相对其他 3 种植被指数最差,干、湿边方程的 R^2 均低于其他植被指数。总体而言,干、湿边方程的拟合结果能够满足 TVDI 计算的需要。

表 2 不同植被指数的干边和湿边方程

时间(月-日)	植被指数	干边方程	R^2	湿边方程	R^2
5-1—5-8	NDVI	$y = -14.76x + 308.04$	0.55	$y = 18.45x + 278.71$	0.86
	EVI	$y = -42.22x + 311.10$	0.81	$y = 46.17x + 278.12$	0.83
	MSAVI	$y = -49.26x + 311.93$	0.86	$y = 50.51x + 277.87$	0.83
	RVI	$y = -108.71x + 311.70$	0.92	$y = 91.67x + 278.45$	0.84
	NDVI	$y = -9.68x + 315.62$	0.36	$y = -1.94x + 287.17$	0.12
6-2—6-9	EVI	$y = -18.21x + 317.44$	0.86	$y = -0.05x + 286.31$	0.00
	MSAVI	$y = -17.45x + 316.97$	0.91	$y = 2.09x + 285.35$	0.07
	RVI	$y = -18.17x + 314.40$	0.93	$y = 3.56x + 284.66$	0.53
	NDVI	$y = -1.82x + 311.54$	0.04	$y = 2.17x + 295.71$	0.24
	EVI	$y = -15.84x + 316.83$	0.74	$y = -2.88x + 295.56$	0.27
7-12—7-19	MSAVI	$y = -15.66x + 316.74$	0.79	$y = -2.28x + 294.98$	0.23
	RVI	$y = -13.94x + 314.88$	0.94	$y = -1.06x + 294.44$	0.11
	NDVI	$y = -4.06x + 297.49$	0.40	$y = -0.43x + 284.97$	0.01
	EVI	$y = -9.70x + 298.44$	0.75	$y = 7.70x + 282.58$	0.34
	MSAVI	$y = -10.83x + 298.59$	0.80	$y = 8.94x + 282.17$	0.44
9-22—9-29	RVI	$y = -19.14x + 298.27$	0.92	$y = 19.08x + 280.65$	0.68

2.3 TVDI 的精度验证

2.3.1 TVDI 与土壤相对湿度的回归分析 根据三江平原地区 12 个土壤墒情站点测量的土壤相对湿度数据,以及由站点坐标原位提取的 TVDI 值,在 SPSS 中利用最小二乘法进行回归分析。考虑到设置的观测站点能够代表相应地区的气候特点,所以利用站点观测数据进行验证是可行的^[17]。回归分析的结果见图 4。结果表明,4 个时期不同植被指数计算的 TVDI 与土壤相对湿度均表现随着 TVDI 值的上升,土壤湿度均呈下降趋势,即二者之间为负相关关系,TVDI 值越高,土壤湿度越低。

根据回归分析结果,在植被覆盖度较低的 5 月份,4 种植被指数计算的 TVDI 与土壤相对湿度回归分析的决定系数 R^2 均在 0.52 左右,总体上相差不大,且均达到 0.01 的显著水平。6 月份植被覆盖度有所增加,该时期 R^2 均在 0.2 左右,植被指数的差异对于回归分析影响较小。7 月份植被覆盖度较高,该时期计算的 TVDI_EVI 和 TVDI_MSAVI 与土壤相对湿度的回归分析结果相较于 TVDI_NDVI 和 TVDI_RVI 有显著优势, R^2 明显高于 TVDI_NDVI 和 TVDI_RVI,且达到 0.05 的显著水平,TVDI_NDVI 和 TVDI_RVI 的回归分析结果未达显著水平。相关研究也表明 EVI 和 MSAVI 对高植被覆盖区域更为敏感,由此计算的 TVDI 比其他植被指数更能反映高植被覆盖时的土壤湿度状况^[26,30]。9 月植被覆盖度处于较低水平,决定系数 R^2 均在 0.55 左右,植被指数的差异对于回归分析结果影响较小,该时间段 TVDI 反演的土壤湿度和实测的土壤相对湿度相关

性均较高,且达到 0.01 的显著水平。

对比 4 种植被指数计算的 TVDI 反演的土壤湿度和实测的土壤相对湿度的回归分析结果。在低植被覆盖的 5 月和 9 月,决定系数 R^2 均显著高于植被覆盖度较高的 6 月和 7 月的分析结果,低植被覆盖时的反演效果好于高植被覆盖时。不同植被指数在 5 月、6 月和 9 月份时 R^2 相差较小,反演效果差异较小;在 7 月份,增强型植被指数(EVI)和修正土壤调节植被指数(MSAVI)的 R^2 高于另外两种植被指数,反演效果有所提升。

2.3.2 降水量与 TVDI 的相关分析 土壤湿度在一定程度上受降水量影响^[31],研究中采用降水量探讨其与 TVDI 和土壤相对湿度的关系,进一步确定 TVDI 方法监测土壤湿度状况的准确性。主要是将降水量与土壤相对湿度和 TVDI 做相关分析,结果见表 3。

根据相关分析结果,7 月份的降水量与土壤相对湿度呈显著正相关,即降水量增加,土壤相对湿度会增大,其他时间段均为不显著正相关。综合表明降水量对土壤相对湿度存在一定影响。

不同植被指数计算的 TVDI 和降水量的相关分析结果中,仅 5 月份的 NDVI 和 EVI 计算的 TVDI 通过了显著性检验,其余均未通过显著性检验。在 5 月、6 月和 9 月期间,植被指数的不同对相关分析的结果并未造成明显的差异,同一时期不同植被指数的相关系数值均较为接近;在 7 月份,基于 EVI 和 MSAVI 计算的 TVDI 值与降水量的相关系数明显高于另外两种植被指数。总体情况与前文 TVDI 和土壤相对湿度的回归分析结果一致,均表现为除 7 月

外,其他月份不同植被指数计算 TVDI 验证效果差异较小。降水量与不同植被指数计算的 TVDI 值的相关系数均为负值,即降雨量越大,TVDI 值越小;结合

降雨量与土壤湿度的相关分析结果(降雨量越大,土壤湿度越高),表明 TVDI 值越小,土壤湿度越大,与前面分析结果一致。

表 3 2013 年 5—9 月降水量分别与土壤相对湿度及 TVDI 相关系数

时间	土壤相对湿度	TVDI_NDVI	TVDI_EVI	TVDI_MSAVI	TVDI_RVI
5-1—5-8	0.319	-0.578*	-0.577*	-0.574	-0.574
6-2—6-9	0.329	-0.378	-0.380	-0.385	-0.397
7-12—7-19	0.577*	-0.065	-0.303	-0.29	-0.092
9-22—9-29	0.403	-0.396	-0.414	-0.416	-0.382

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。

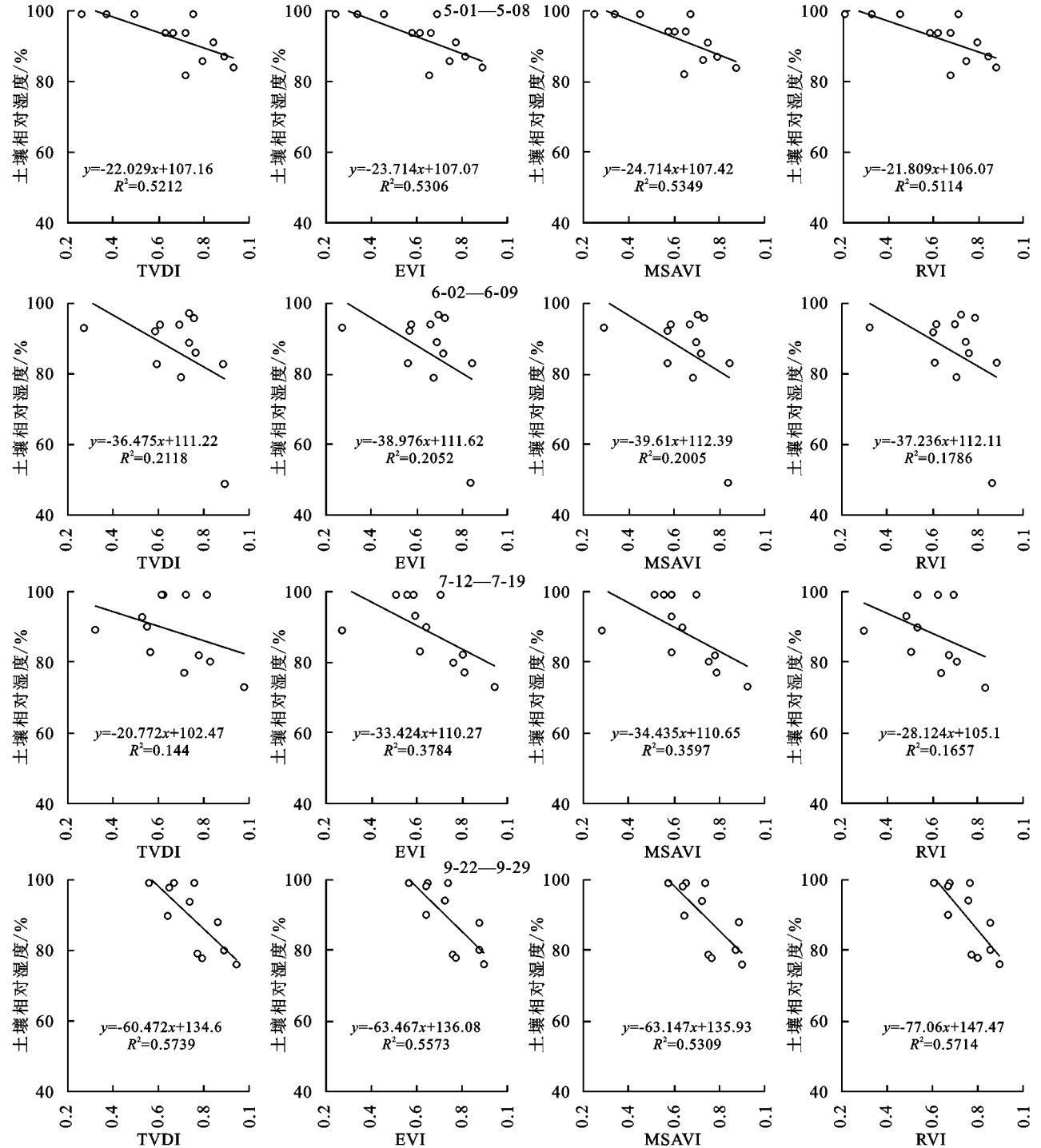


图 4 2013 年 5—9 月土壤相对湿度与不同植被指数 TVDI 的拟合效果比较

2.4 三江平原土壤湿度状况时空分布

根据以上分析结果,MSAVI 和 EVI 计算的 TVDI 在分别在 5 月和 7 月回归分析 R^2 最高,且特征空间拟合效果较好;NDVI 计算的 TVDI 在 6 月和 9 月回归分析 R^2 最高,但特征空间拟合效果较差,EVI 和 RVI 的 R^2 分别仅次于 NDVI 且特征空间拟合效果较好。综合考虑,在不同的时间选取相应的植被指数计算 TVDI(5

月为 MSAVI,6 月为 EVI,7 月为 EVI,9 月为 RVI)并绘制土壤湿度等级图,分析不同时间三江平原的土壤湿度状况。根据 TVDI 值将研究区的土壤湿度状况划分为 7 个等级^[32],分别为:极度湿润(0~0.1)、中度湿润(0.1~0.2)、轻度湿润(0.2~0.4)、正常(0.4~0.6)、轻度干旱(0.6~0.8)、中度干旱(0.8~0.9)、极度干旱(0.9~1)。三江平原土壤湿度分布情况见图 5。

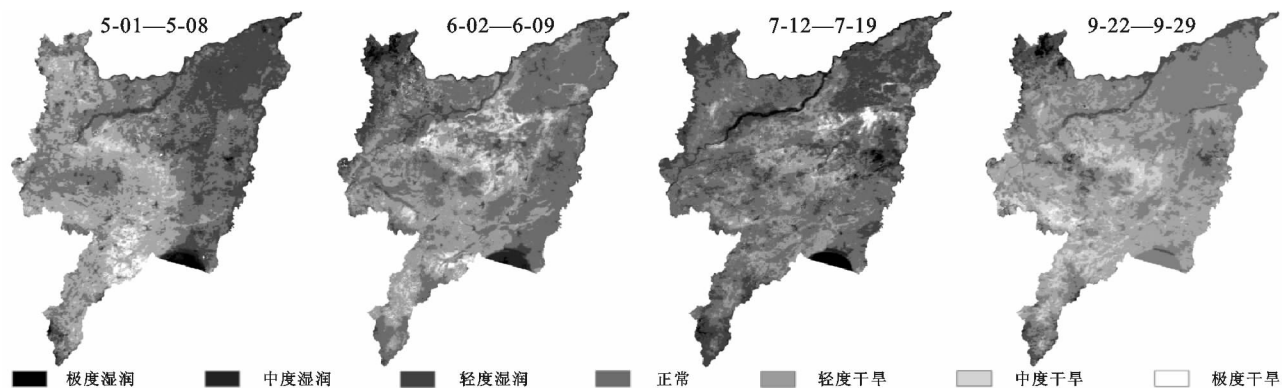


图5 不同时期土壤湿度分布

由 TVDI 反映的三江平原地区的土壤湿度分布状况可知,5 月全区受旱范围比较广泛,主要分布在三江平原的西部,受旱地区多为轻度干旱,中部的集贤县、西南部鸡东县以及密山市西部地区出现了中度干旱,同时南部地区存在小范围的极度干旱。东部地区多为轻度湿润或正常情况,土壤湿度状况分区明显,呈现显著的从东北到西南由湿润向干旱变化的特征。6 月全区大部分区域土壤湿度状况正常,中西部及西南部区域存在轻度干旱,中部存在零散的中度干旱,范围较小,主要集中在富锦市、宝清县和集贤县。7 月全区大部分地区为正常,中部及南部地区存在零散轻度干旱,中部的富锦市部分地区存在中度干旱,在东部饶河县的西部地区发生了中度干旱,范围较小,全区总体上土壤湿度状况良好。9 月份全区受旱范围广泛,除三江平原东北部以及西北部地区外,全区其他地方均发生不同程度的干旱,干旱等级主要为轻度干旱,西部的勃利县以及中部的宝清县部分区域为中度干旱,研究区的土壤湿度状况整体呈现偏干旱的情势。

对比 4 个时期的土壤湿度分布图,在三江平原东部及东北部,土壤湿度一直保持为正常或轻度湿润。相关研究^[33]表明三江平原东部及东北部地物类型主要为水田或沼泽等湿地及森林,可能是森林具有的对地表温度的调控作用^[34],间接影响了土壤湿度。湿地区域由于土壤水分长期处于过饱和状态,遥感手段反演的土壤湿度状况显示为正常或轻度湿润。

3 讨论与结论

3.1 讨论

针对单一植被指数对不同植被覆盖状况下敏感

性不同的问题,本文对比分析了不同植被指数下 TVDI 对土壤湿度状况的监测效果,得到了合理的结论,TVDI 能够适用于三江平原的土壤湿度状况监测,与前人研究^[9,18,24,29]结论一致。在不同时期选用何时的植被指数计算 TVDI 能够更好的反演土壤湿度状况。但是在研究中仍然存在不足之处有待提高:(1) 本研究在不同植被覆盖状况下选取不同的植被指数计算 TVDI,虽然能够在一定程度上提高土壤湿度状况反演的准确性,但是土壤湿度状况受多种因素的影响,下一步可以考虑建立综合多种影响因素的土壤湿度状况监测模型,进一步提高土壤湿度状况监测的准确性。(2) 考虑到遥感影像和土壤湿度数据的时间对应及云量问题,本研究选用了四期遥感影像进行研究,对于不同植被覆盖状况为定性研究,下一步可以考虑实测土壤湿度,选用多期遥感影像进行分析,对于植被覆盖状况进行定量化,从而提高 TVDI 模型在时间上的适用性。(3) 基于 MODIS 遥感数据能够监测大尺度土壤湿度状况,本研究中也取得了较好的结果,但是 MODIS 影响容易受云和雨雪天气影响,且分辨率较低,后期可以考虑利用雷达影像在小区域做更为细致的研究。

3.2 结论

(1) TVDI 方法能够用来反演三江平原地区土壤湿度状况,基于不同植被指数的 TVDI 与土壤湿度基本上呈负相关关系,即 TVDI 值越大,土壤湿度越低。(2) 不同植被指数计算的 TVDI 在 5 月、6 月、9 月这 3 个时期,回归分析 R^2 数值相近(5 月均在 0.52 左右、6 月均在 0.20 左右、7 月均在 0.55 左右),即不

同植被指数的 TVDI 在这 3 个时期对土壤湿度的反演效果差异较小,4 种植被指数均适合用来反演这 3 个时间段的土壤湿度;7 月份的 EVI 和 MSAVI 计算的 TVDI 的 R^2 (均在 0.36 左右)明显高于植被指数 NDVI 和 RVI 的 R^2 (均在 0.15 左右),表明 EVI 和 MSAVI 计算的 TVDI 在 7 月份对土壤湿度的反演效果好于其他两种植被指数, EVI 和 MSAVI 更适合用来反演该时期的土壤湿度。(3) 三江平原 2013 年 5—9 月大部分地区湿度状况属于正常或轻度干旱,干旱现象主要出现在中部和西南部;东部及东北部地区由于森林和湿地的覆盖,在不同时期均保持在正常和轻度湿润状况。

参考文献:

- [1] 郭广猛,赵冰茹.使用 MODIS 数据监测土壤湿度[J].土壤,2004,36(2):219-221.
- [2] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, et al. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,177:277-286.
- [3] 安雪丽,武建军,周洪奎,等.土壤相对湿度在东北地区农业干旱监测中的适用性分析[J].地理研究,2017,35(5):837-849.
- [4] Carrão H, Russo S, Sepulcre-Canto G, et al. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016,48:74-84.
- [5] 张喆,丁建丽,李鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J].中国沙漠,2015,35(1):220-227.
- [6] 于健,杨国范,王颖,等.基于 MODIS 数据反演阜新地区土壤水分的研究[J].遥感技术与应用,2011,26(4):413-419.
- [7] Qin J, Yang K, Lu N, et al. Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 2013,138:1-9.
- [8] Holzman M E, Rivas R, Piccolo M C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014,28:181-192.
- [9] 薛天翼,白建军.基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J].水土保持研究,2017,24(4):240-246.
- [10] Zhou L, Zhang J, Wu J, et al. Comparison of remotely sensed and meteorological data-derived drought indices in mid-eastern China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012,33(6):1755-1779.
- [11] 倪波顺,高阳华,李月臣,等.基于 FY-3A/VIRR 数据的重庆市干旱监测研究[J].西南大学学报:自然科学版,2014,36(7):143-148.
- [12] 高伟,安如,王喆.基于微波遥感技术的干旱监测指数及其应用研究:以三江源区为例[J].干旱区研究,2017,34(3):541-550.
- [13] 黄对,王文.基于粗糙度定标的 IEM 模型的土壤含水率反演[J].农业工程学报,2014,30(19):182-190.
- [14] 王学,刘全明,屈忠义,等.盐渍化土壤水分微波雷达反演与验证[J].农业工程学报,2017,33(11):108-114.
- [15] 闫峰,覃志豪,李茂松,等.农业旱灾监测中土壤水分遥感反演研究进展[J].自然灾害学报,2006,16(6):114-121.
- [16] 郭茜,李国春.用表观热惯量法计算土壤含水量探讨[J].中国农业气象,2005,26(4):13-17.
- [17] 齐述华,王长耀,牛铮.利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J].遥感学报,2003,7(5):420-427.
- [18] 曹雷,丁建丽,牛增懿.基于 TVDI 的艾比湖地区土壤水分时空变化分析[J].水土保持研究,2016,23(3):43-47.
- [19] Chen J, Wang C, Jiang H, et al. Estimating soil moisture using Temperature-Vegetation Dryness Index(TVDI) in the Huang huai-hai (HHH) plain[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011,32(4):1165-1177.
- [20] Li Z, Wang Y, Zhou Q, et al. Spatiotemporal variability of land surface moisture based on vegetation and temperature characteristics in Northern Shaanxi Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2008,72(6):974-985.
- [21] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012,18:417-427.
- [22] Patel N R, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index(TVDI) to infer soil moisture status[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009,30(1):23-39.
- [23] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2):213-224.
- [24] 杨玲,杨艳昭.基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2016,30(2):76-81.
- [25] 朱明宇.基于 MODIS 数据对辽宁地区农业干旱的监测研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [26] 李海霞,杨井,陈亚宁,等.基于 MODIS 数据的新疆地区土壤湿度反演[J].草业学报,2017,26(6):16-27.

mm 降雨)已开始表现出水分亏缺现象。当遇到极端干旱年份或连续欠水年或没有 9 月份较大降水补给时,樟子松固沙林很可能出现严重水分亏缺现象。

参考文献:

- [1] 焦树仁. 辽宁省章古台引种樟子松造林研究[J]. 防护林科技, 2009(6):10-14.
- [2] 朱教君, 曾德慧, 康红章, 等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [3] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 等. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12):2225-2228.
- [4] 朱教君, 康宏樟, 宋立宁, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林地下水埋深季节变化[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6):1767-1772.
- [5] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学, 2001, 37(2):131-138.
- [6] 高崇华, 李志忠, 付强. 毛乌素沙地引种樟子松调查报告[J]. 内蒙古林业科技, 1996(1):29-32.
- [7] 樊晓英, 廖超英, 谢燕, 等. 毛乌素沙地东南部樟子松生长状况调查分析[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(4):112-116.
- [8] 王怀彪, 潘鹏, 高保山. 毛乌素沙地樟子松抗旱造林关键技术研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6):70-73.
- [9] 张雷, 洪光宇, 李卓凡, 等. 基于层次分析法的毛乌素沙地 3 种造林模式恢复成效评价[J]. 林业资源管理, 2017(6):108-112.
- [10] 格日勒, 斯琴毕力格, 金荣, 等. 毛乌素沙地引种樟子松生长特性的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5):159-163.
- [11] 张友焱. 毛乌素沙地几种树种水分生理特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [12] 丁晓纲, 何茜, 李吉跃, 等. 毛乌素沙地樟子松和油松人工林光合生理特性[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1):215-219.
- [13] 樊文会. 毛乌素沙地三典型造林树种蒸腾耗水特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [14] 马成忠, 邓继峰, 丁国栋, 等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):230-235.
- [15] 段民福. 毛乌素沙地榆林沙区樟子松人工林土壤理化性质时空变异规律研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [16] 徐松, 廖超英, 多杰吉, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林不同坡向的碳储量及空间分布研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6):14-18.
- [17] 杨文斌, 党宏忠. 土壤深层水量渗漏测试记录仪[P]. ZL201110252184.7, 2011.
- [18] 吴永胜, 哈斯, 乌格特莱勒. 毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征[J]. 科学通报, 2011, 56(34):2917-2922.
- [27] 胡岫, 刘骏, 毛学刚. 中国东北地区 2007—2010 年植被覆盖度及其变化[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(7):45-50.
- [28] 李新辉, 宋小宁, 周霞. 半干旱区土壤湿度遥感监测方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1):90-93.
- [29] 陈斌, 张学霞, 华开, 等. 温度植被干旱指数(TVDI)在草原干旱监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5):930-937.
- [30] 刘立文, 张吴平, 段永红, 等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报, 2014, 34(13):3704-3711.
- [31] 王丹, 南瑞, 韩俊杰, 等. 黑龙江省土壤湿度及其对气温和降水的敏感性分析[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2):49-53.
- [32] Liyang L, Jishan L, Xiuzhi C, et al. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index(MTVDI)based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003—2010) [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 199:302-320.
- [33] 薛飞. 利用风云卫星数据的东北地区土地覆盖监测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [34] 孙舒婷. 大兴安岭森林地表温度的遥感估算及分析研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.

(上接第 100 页)