

基于遥感数据的宁夏地区土壤水分反演方法比较

王连喜^{1,2} 李兴阳^{1,2} 余凌翔³ 运方华^{1,2} 耿秀华^{1,2} 李琪^{1,2}

摘要

利用 MODIS 产品数据 MOD11A2 和 MOD13A2 获取地表温度(TS)、昼夜温差(DST)、归一化植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI),构建宁夏区域 2005 年 4、7、10 月逢 8、18、28 日 TS-NDVI、TS-EVI、DST-NDVI、DST-EVI 特征空间,根据 TS-NDVI、TS-EVI、DST-NDVI、DST-EVI 特征空间建立了温度植被干旱指数(TV-DI)、温度增强植被指数型干旱指数(TE-DI)、温差植被干旱指数(DTVDI)、温差增强植被指数型干旱指数(DTEDI),并以这些干旱指数作为土壤水分监测指标,反演了宁夏区域 2005 年 4、7、10 月的土壤水分.利用实测 10 cm 土壤水分进行相关分析,结果表明 DTEDI 在宁夏土壤水分反演中表现较好,DTVDI 表现略好.

关键词

土壤水分;遥感;干旱指数;宁夏

中图分类号 TP79;S127;S423

文献标志码 A

收稿日期 2011-09-29

资助项目 公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201106024;GYHY200806022)

作者简介

王连喜,男,教授,主要从事农业气象与生态气象的研究. wx4533@sina.com

- 1 南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 环境科学与工程学院,南京,210044
- 3 云南省气候中心,昆明,650034

0 引言

传统的土壤水分反演方法和对干旱的监测大都是建立在地表温度基础上的^[1],或者以植被指数为基础建立土壤水分反演方程.有学者研究了温度(TS)和归一化植被指数(NDVI)的关系,并结合 TS 和 NDVI 进行了土壤水分反演及干旱监测的研究.有学者在对植被覆盖和土壤湿度变化范围较大的区域进行研究时发现,根据遥感资料得到的以 NDVI 为横轴和以 TS 为纵轴的散点图呈三角形,并利用土壤-植被-大气传输模型(SVAT)进行了验证^[2]. Moran 等^[3]从理论的角度分析认为 TS 与 NDVI 之间呈梯形的关系. Sandholt 等^[4]基于 TS、NDVI 之间的关系,提出了以温度植被干旱指数(TVDI)来估计土壤表层水分.基于特征空间的干旱遥感监测方法各有优缺点,TS-NDVI 特征空间法是对归一化温度指数的简化处理,相关理论与方法较为成熟,具有一定的推广应用价值^[5].根据王正兴等^[6]的研究,MODIS-EVI 比 MODIS-NDVI 更适合进行定量遥感的研究与应用.卢远等^[7]用增强型植被指数(EVI)取代 NDVI 对 TVDI 进行了改进,并获得了较好效果,精度可提高至 85%左右.用 EVI 取代 NDVI 对 TVDI 进行改进,已经得到公认,尤其是高植被覆盖区效果更好.全兆远等^[8]还研究了温差对于土壤水分反演的 DST-EVI、DST-NDVI.

干旱灾害在宁夏回族自治区是影响范围最广、造成损失最大的一种气象灾害.每年的 3—10 月是宁夏农作物生长发育的关键时期,而此时却频频地出现干旱,给宁夏的农业生产造成很大损失,因此对宁夏干旱监测的研究是非常有意义的.本文对宁夏地区的温差增强植被指数和温差植被指数进行比较,确定二者在宁夏地区的适用情况,为宁夏地区的干旱实时监测方法的选取提供科学依据.

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源及处理

主要利用的数据有:2005 年 4、7、10 月逢 8、18、28 日的 MODIS/TERRA 的 1 km 分辨率的温度/发射率产品 MOD11A2,16 d 合成的 1 km 分辨率植被指数产品 MOD13A2,其中 MOD11A2 包括 8 d 的昼/夜温度以及 MODIS 的 2 个热波段的发射率,MOD13A2 包括 NDVI、EVI 以及 4 个波段(红、近红外、蓝、中红外)的反射率,以及 2005 年 4、7、10 月气象部门逢 8、18、28 日测墒所得的 0~10 cm 土壤水分业务观测数据.

本文选取美国 NASA 提供的遥感影像产品,应用 MODIS Reprojection Tool 进行影像镶嵌、裁剪、格式转换等预处理. 利用得到的 MODIS 数据产品将表示地物热特性的温度 (TS)、昼夜温差 (DST) 与表示地表植被情况的归一化植被指数、增强植被指数结合, 建立 TS-NDVI、TS-EVI、DST-NDVI、DST-EVI 空间, 通过这些特征空间建立温度植被干旱指数 (TVDI)、温度增强植被指数型干旱指数 (TEDI)、温差植被干旱指数 (DTVDI)、温差增强植被指数型干旱指数 (DTEDI), 进行土壤水分反演和干旱监测可行性研究及对比.

1.2 温度植被指数型干旱指数

以 TS 为纵坐标, 以表示地表植被情况的植被指数 (NDVI、EVI) 为横坐标, 分别建 TS-NDVI、TS-EVI 空间. 相同土壤水分条件下, 植被覆盖度越大, 白天温度越低, 相同的植被覆盖条件, 土壤水分越高, 白天温度越低, 因此 TS-NDVI、TS-EVI 空间干边在上, 湿边在下. 分别拟合 TS-NDVI、TS-EVI 空间的干边、湿边方程, 并根据干边、湿边方程构建 TVDI 和 TE-DI.

TS-NDVI 空间干边方程:

$$T_{S,\max(\text{NDVI})} = a_1 I_{\text{NDV}} + b_1,$$

湿边方程:

$$T_{S,\min(\text{NDVI})} = a_2 I_{\text{NDV}} + b_2,$$

$$I_{\text{TVDI}} = \frac{T_S - T_{S,\min(\text{NDVI})}}{T_{S,\max(\text{NDVI})} - T_{S,\min(\text{NDVI})}},$$

$$I_{\text{TVDI}} = \frac{T_S - (a_2 I_{\text{NDV}} + b_2)}{(a_1 I_{\text{NDV}} + b_1) - (a_2 I_{\text{NDV}} + b_2)}.$$

式中, $T_{S,\max(\text{NDVI})}$ 、 $T_{S,\min(\text{NDVI})}$ 分别为相同 NDVI 条件下的最高、最低温度, a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别为模拟 TS-NDVI 空间干、湿边方程的回归系数.

TS-EVI 空间干边方程:

$$T_{S,\max(\text{EVI})} = a_3 I_{\text{EV}} + b_3,$$

湿边方程:

$$T_{S,\min(\text{EVI})} = a_4 I_{\text{EV}} + b_4,$$

$$I_{\text{TED}} = \frac{T_S - T_{S,\min(\text{EVI})}}{T_{S,\max(\text{EVI})} - T_{S,\min(\text{EVI})}},$$

$$I_{\text{TED}} = \frac{T_S - (a_4 I_{\text{EV}} + b_4)}{(a_3 I_{\text{EV}} + b_3) - (a_4 I_{\text{EV}} + b_4)}.$$

式中, $T_{S,\max(\text{EVI})}$ 、 $T_{S,\min(\text{EVI})}$ 分别为相同 EVI 条件下最高、最低温度, a_3 、 b_3 、 a_4 、 b_4 分别为模拟 TS-EVI 空间干、湿边方程的回归系数.

1.3 温差植被指数型干旱指数

以温差 (DST) 为纵坐标, 以表示地表植被情况

的植被指数 (NDVI、EVI) 为横坐标, 分别建立 DST-NDVI、DST-EVI 空间. 相同土壤水分条件下, 植被覆盖度大, 白天升温慢, 晚上降温也慢, 昼夜温差小, 相同的植被覆盖条件下, 土壤水分高, 白天升温慢, 晚上降温也慢, 昼夜温差小, 因此 DST-NDVI、DST-EVI 空间干边在上, 湿边在下. 分别拟合提取 DST-NDVI、DST-EVI 空间的干边、湿边方程, 并根据干边、湿边方程构建 DTVDI 和 DTEDI.

DST-NDVI 空间干边方程:

$$T_{\text{DS},\max(\text{NDVI})} = a_5 I_{\text{NDV}} + b_5,$$

湿边方程:

$$T_{\text{DS},\min(\text{NDVI})} = a_6 I_{\text{NDV}} + b_6,$$

$$I_{\text{DTVDI}} = \frac{T_{\text{DS}} - T_{\text{DS},\min(\text{NDVI})}}{T_{\text{DS},\max(\text{NDVI})} - T_{\text{DS},\min(\text{NDVI})}},$$

$$I_{\text{DTVDI}} = \frac{T_{\text{DS}} - (a_6 I_{\text{NDV}} + b_6)}{(a_5 I_{\text{NDV}} + b_5) - (a_6 I_{\text{NDV}} + b_6)}.$$

式中, $T_{\text{DS},\max(\text{NDVI})}$ 、 $T_{\text{DS},\min(\text{NDVI})}$ 分别为相同 NDVI 条件下最大、最小温差, a_5 、 b_5 、 a_6 、 b_6 分别为模拟 DST-NDVI 空间干、湿边方程的回归系数.

DST-EVI 空间干边方程:

$$T_{\text{DS},\max(\text{EVI})} = a_7 I_{\text{EV}} + b_7,$$

湿边方程:

$$T_{\text{DS},\min(\text{EVI})} = a_8 I_{\text{EV}} + b_8,$$

$$I_{\text{DTEDI}} = \frac{T_{\text{DS}} - T_{\text{DS},\min(\text{EVI})}}{T_{\text{DS},\max(\text{EVI})} - T_{\text{DS},\min(\text{EVI})}},$$

$$I_{\text{DTEDI}} = \frac{T_{\text{DS}} - (a_8 I_{\text{EV}} + b_8)}{(a_7 I_{\text{EV}} + b_7) - (a_8 I_{\text{EV}} + b_8)}.$$

式中, $T_{\text{DS},\max(\text{EVI})}$ 、 $T_{\text{DS},\min(\text{EVI})}$ 分别为相同 EVI 条件下最大、最小温差, a_7 、 b_7 、 a_8 、 b_8 分别为模拟 TSD-EVI 空间干、湿边方程的回归系数.

2 结果与分析

2.1 特征空间的建立

MODIS 产品直接提供了 NDVI、EVI、TS、DST 则根据温度产品 MOD11A2 计算得到. 分别以温度 (TS) 和温差 (DST) 为纵坐标, 以表示地表植被情况的植被指数 (NDVI、EVI) 为横坐标, 分别建立 TS-EVI、DST-EVI、TS-NDVI 与 DST-NDVI 特征空间, 拟合其特征空间的干边、湿边方程如表 1 所示.

干湿边斜率的变化可以归因于蒸散、冠层传声度以及土壤湿度^[9]. 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多种因素的影响^[10]. 在绘图过程中发现, 在 $I_{\text{NDV}} < 0.1$ 时的散点分布图中, TS、DST 最小值随 NDVI 增加递减, 最

大值随 NDVI 增加递增,所以在后期构建特征空间方程的过程中选取了 $I_{NDV} \geq 0.1$ 的值进行分析,并且对于相同植被指数对应的最大最小值进行线性相关分析,得到干湿边方程. 干边斜率均为负值,在所建立的方程中干边最大斜率为 -23.04 ,为 4 月 28 日

的干边方程. 从线性拟合的效果来看,各特征空间的干边线性拟合的效果很好,而湿边拟合结果差异较大,春秋 EVI 拟合优于 NDVI,夏季 TS-NDVI 结果较好.

表 1 特征空间干湿边方程

Table 1 The wet and dry edge equations of characteristic space

日期	空间类型	干边		湿边	
		方程	拟合效果	方程	拟合效果
4 月 8 日	TS-EVI	$y = -77.27x + 315.87$	$R^2 = 0.81$	$y = 146.89x + 253.61$	$R^2 = 0.77$
	DST-EVI	$y = -79.21x + 45.53$	$R^2 = 0.85$	$y = 141.32x - 15.71$	$R^2 = 0.79$
	TS-NDVI	$y = -59.00x + 318.09$	$R^2 = 0.83$	$y = 13.00x + 274.22$	$R^2 = 0.16$
	DST-NDVI	$y = -66.20x + 50.34$	$R^2 = 0.86$	$y = 14.60x + 3.09$	$R^2 = 0.28$
4 月 18 日	TS-EVI	$y = -51.93x + 312.66$	$R^2 = 0.89$	$y = 122.64x + 264.37$	$R^2 = 0.70$
	DST-EVI	$y = -58.47x + 39.48$	$R^2 = 0.95$	$y = 81.69x - 1.62$	$R^2 = 0.55$
	TS-NDVI	$y = -52.98x + 317.19$	$R^2 = 0.79$	$y = -21.18x + 291.66$	$R^2 = 0.43$
	DST-NDVI	$y = -58.87x + 44.92$	$R^2 = 0.88$	$y = -6.46x + 13.31$	$R^2 = 0.19$
4 月 28 日	TS-EVI	$y = -27.60x + 317.31$	$R^2 = 0.85$	$y = 39.90x + 282.39$	$R^2 = 0.55$
	DST-EVI	$y = -38.08x + 41.29$	$R^2 = 0.90$	$y = 18.97x + 10.02$	$R^2 = 0.51$
	TS-NDVI	$y = -23.04x + 318.80$	$R^2 = 0.96$	$y = 2.21x + 291.12$	$R^2 = 0.01$
	DST-NDVI	$y = -24.65x + 40.92$	$R^2 = 0.93$	$y = 7.70x + 10.14$	$R^2 = 0.25$
7 月 8 日	TS-EVI	$y = -46.59x + 330.53$	$R^2 = 0.91$	$y = -8.96x + 293.83$	$R^2 = 0.31$
	DST-EVI	$y = -42.18x + 40.02$	$R^2 = 0.95$	$y = -2.95x + 6.38$	$R^2 = 0.11$
	TS-NDVI	$y = -35.97x + 330.73$	$R^2 = 0.94$	$y = -16.14x + 300.19$	$R^2 = 0.65$
	DST-NDVI	$y = -33.31x + 40.82$	$R^2 = 0.92$	$y = -4.98x + 8.39$	$R^2 = 0.31$
7 月 18 日	TS-EVI	$y = -42.72x + 331.62$	$R^2 = 0.94$	$y = -8.46x + 299.70$	$R^2 = 0.43$
	DST-EVI	$y = -35.96x + 37.11$	$R^2 = 0.99$	$y = 1.35x + 5.28$	$R^2 = 0.07$
	TS-NDVI	$y = -29.11x + 330.40$	$R^2 = 0.93$	$y = -13.76x + 304.94$	$R^2 = 0.84$
	DST-NDVI	$y = -28.46x + 38.15$	$R^2 = 0.96$	$y = -2.29x + 7.13$	$R^2 = 0.20$
7 月 28 日	TS-EVI	$y = -42.78x + 328.28$	$R^2 = 0.89$	$y = -9.59x + 295.22$	$R^2 = 0.24$
	DST-EVI	$y = -39.24x + 38.32$	$R^2 = 0.95$	$y = -1.30x + 6.01$	$R^2 = 0.03$
	TS-NDVI	$y = -30.92x + 327.72$	$R^2 = 0.94$	$y = -17.74x + 302.89$	$R^2 = 0.59$
	DST-NDVI	$y = -30.63x + 39.42$	$R^2 = 0.95$	$y = -6.06x + 9.42$	$R^2 = 0.45$
10 月 8 日	TS-EVI	$y = -44.66x + 311.76$	$R^2 = 0.92$	$y = 24.36x + 277.52$	$R^2 = 0.35$
	DST-EVI	$y = -47.63x + 35.60$	$R^2 = 0.94$	$y = 16.52x + 3.04$	$R^2 = 0.21$
	TS-NDVI	$y = -26.57x + 311.08$	$R^2 = 0.97$	$y = -4.94x + 285.85$	$R^2 = 0.07$
	DST-NDVI	$y = -26.91x + 34.48$	$R^2 = 0.96$	$y = -1.09x + 7.51$	$R^2 = 0.01$
10 月 18 日	TS-EVI	$y = -47.29x + 305.36$	$R^2 = 0.84$	$y = 57.71x + 271.28$	$R^2 = 0.94$
	DST-EVI	$y = -60.84x + 34.25$	$R^2 = 0.90$	$y = 52.86x - 1.52$	$R^2 = 0.91$
	TS-NDVI	$y = -30.81x + 305.28$	$R^2 = 0.88$	$y = -6.54x + 283.70$	$R^2 = 0.19$
	DST-NDVI	$y = -33.38x + 33.16$	$R^2 = 0.94$	$y = -0.60x + 7.88$	$R^2 = 0$
10 月 28 日	TS-EVI	$y = -42.33x + 300.37$	$R^2 = 0.92$	$y = 63.78x + 266.70$	$R^2 = 0.89$
	DST-EVI	$y = -51.87x + 31.50$	$R^2 = 0.90$	$y = 47.75x + 0.48$	$R^2 = 0.91$
	TS-NDVI	$y = -32.99x + 301.87$	$R^2 = 0.86$	$y = -3.85x + 279.15$	$R^2 = 0.04$
	DST-NDVI	$y = -35.47x + 32.59$	$R^2 = 0.93$	$y = 0.22x + 7.83$	$R^2 = 0$

在绘制特征空间图形时发现,基于 EVI 的特征空间分布可划分为 2 段.当 $I_{EV} > 0.10$ 时,干边随 I_{EV} 增大而递减,经验证 EVI 与 TS 和 DST 之间的线性相关性极显著,而湿边则随 I_{EV} 增大而增大(7 月则随 I_{EV} 增大而递减),经验证两者之间线性相关性显著,可以用来监测作物、林草发育期的旱情监测;当 $I_{EV} \leq 0.10$ 时,基本可认为下垫面是裸地,此时 EVI 没有意义. TS-EVI 特征空间规律与前人研究结果^[11] 基本相符.

2.2 结果验证

选取中卫、西吉、平罗、隆德、固原、同心、永宁 7 个地区的 2005 年 4、7、10 月 10 cm 土壤中水的质量分数(表 2)对结果进行验证.此数据为气象部门逢 8、18、28 日测墒气象业务观测数据,这 7 个地区分布于宁夏的北部、中部和南部地区,较具代表性.张晓煜等^[12] 的研究表明宁夏北部地区大部分属于灌溉条件较好地区,中部地区大部分为无灌溉地区,而南部地区大部分属于有灌溉地区,而灌溉条件可能会对最后的验证结果有所影响.分别将当地经纬度对应的植被指数带入所得出的 TEDI、DTEDI、TVDI、DTVDI 4 个指数方程并与实测土壤中水的质量分数进行线性相关分析,结果如图 1 和表 3 所示.

表 2 土壤中水的质量分数

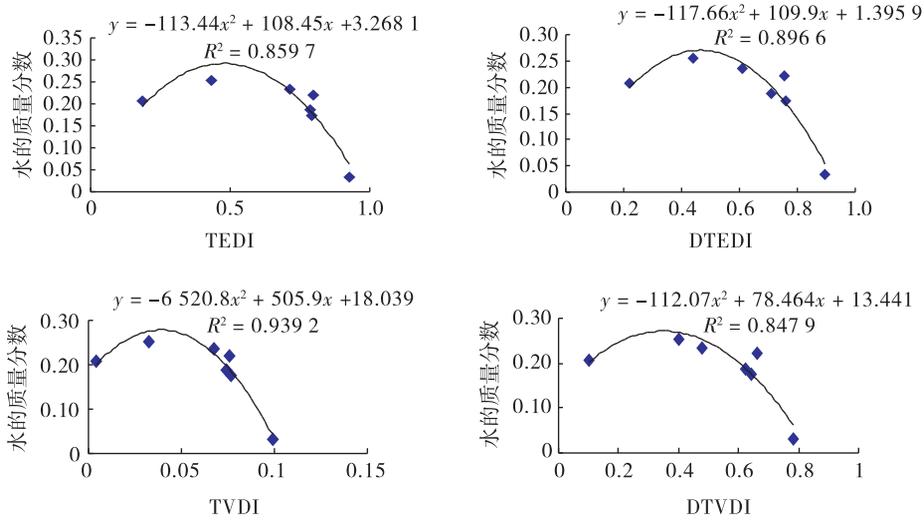
日期	平罗	永宁	中卫	同心	固原	西吉	隆德
4 月 8 日	23.5	18.8	22.1	3.3	17.5	20.8	25.4
4 月 18 日	22.0	12.1	21.6	3.6	11.0	17.8	25.3
4 月 28 日	24.8	13.8	25.4	4.4	6.8	14.6	15.5
7 月 8 日	14.2	23.8	13.9	3.9	15.5	14.3	15.8
7 月 18 日	14.3	25.9	29.4	2.6	10.9	8.8	22.8
7 月 28 日	28.0	21.3	25.0	9.3	17.4	17.8	25.6
10 月 8 日	—	17.5	—	6.1	19.2	17.1	27.5
10 月 18 日	—	17.7	—	6.7	14.2	15.9	25.9
10 月 28 日	—	17.4	—	4.2	13.7	14.1	23.4

通过对 3 个月的数据进行分析,结果表明构建的指数中 4 月 8 日、4 月 18 日、7 月 8 日以及 10 月 8 日的 TVDI 与土壤中水的质量分数的相关性较好,TEDI 指数在除 7 月 18 日和 7 月 28 日外其他时间的相关性均达显著水平,DTEDI 在除 4 月 28 日与 7 月 8 日的其他时间中相关性显著,此期间的 EVI 值在 0.09~0.27 范围内,NDVI 值在 0.16~0.41 范围内.结合前文提到的宁夏灌溉区划分,中部地区的无灌溉区土壤中水的质量分数数据对于相关性结果负影响较大,而 7 月的相关性分析能较明显地体现这一点.

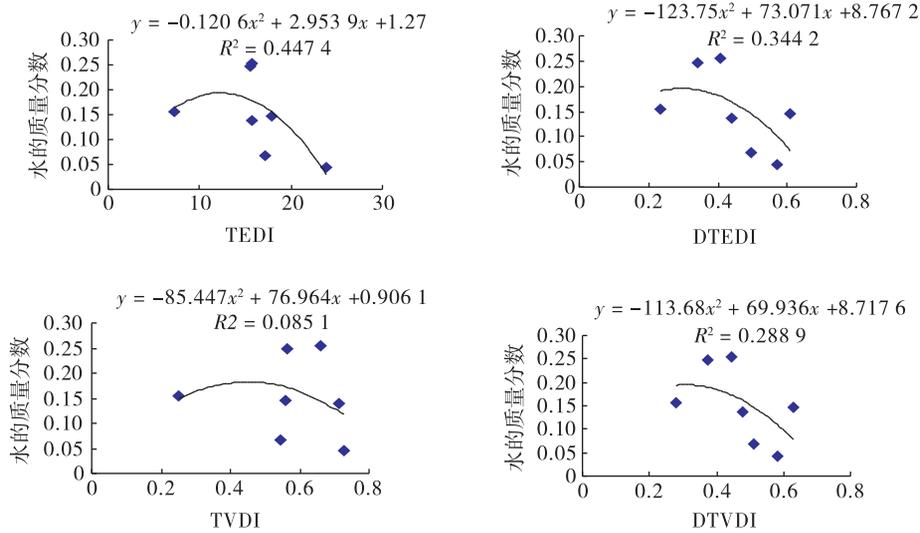
表 3 验证结果(EVI、NDVI 为当日采样地点平均值)

Table 3 Verification result

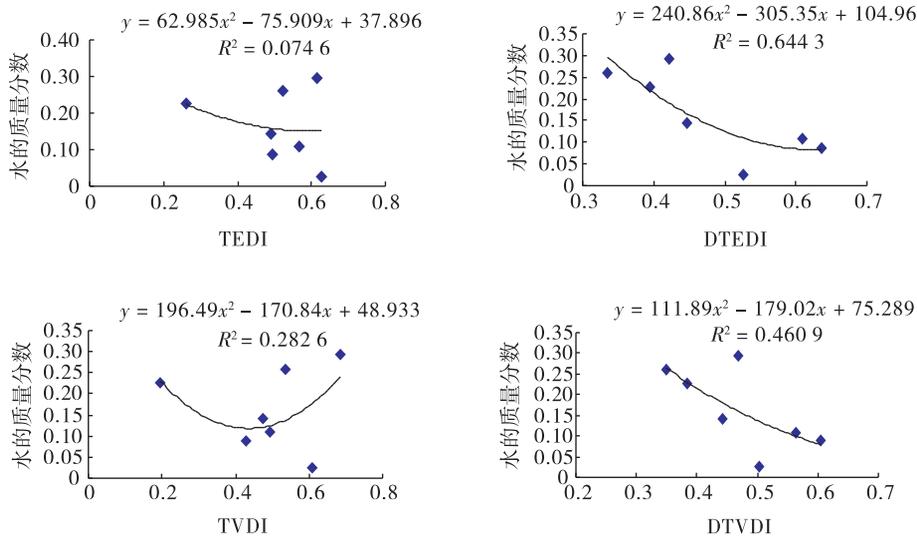
日期	植被指数	验证结果
4 月 8 日	$I_{EV} = 0.107\ 143$ $I_{NDV} = 0.168\ 571$	经检验 4 个指数与 10 cm 土壤中水的质量分数一元二次非线性相关性均达到极显著,而 TVDI 是 4 个指数中相关性最高的,DTEDI 略好
4 月 18 日	$I_{EV} = 0.104\ 286$ $I_{NDV} = 0.164\ 286$	TVDI 也是 4 个指数中与土壤中水的质量分数相关性最好的,并且达到极显著,而另外 3 个指数与土壤中水的质量分数的相关性也达到显著水平
4 月 28 日	$I_{EV} = 0.145\ 714$ $I_{NDV} = 0.221\ 429$	TEDI 指数与土壤中水的质量分数相关性显著,其余 3 个指数达到显著水平
7 月 8 日	$I_{EV} = 0.268\ 571$ $I_{NDV} = 0.372\ 857$	TVDI 与土壤中水的质量分数相关性极显著,TEDI 相关性较 DTVDI、DTEDI 好,DTVDI、DTEDI 均未达显著水平
7 月 18 日	$I_{EV} = 0.265\ 714$ $I_{NDV} = 0.382\ 857$	DTEDI 较其他指数与土壤中水的质量分数相关性好,并且 DTVDI 较 TVDI 好
7 月 28 日	$I_{EV} = 0.262\ 857$ $I_{NDV} = 0.401\ 429$	DTVDI 指数与土壤中水的质量分数相关性极显著,并且 DTEDI 较好,TVDI、TEDI 相关性检验不显著
10 月 8 日	$I_{EV} = 0.157\ 143$ $I_{NDV} = 0.262\ 857$	TVDI 较其他指数与土壤中水的质量分数相关性好,并且 TEDI 较 DTEDI 好,而且 10 月 8 日的指数相关性除 DTEDI 较显著外,其他指数相关性均达到了极显著水平
10 月 18 日	$I_{EV} = 0.111\ 429$ $I_{NDV} = 0.207\ 143$	DTVDI 较其他指数与土壤中水的质量分数相关性好,达到显著水平并且 TEDI 较 DTEDI 好
10 月 28 日	$I_{EV} = 0.098\ 571$ $I_{NDV} = 0.177\ 143$	DTEDI 较其他指数与土壤中水的质量分数相关性好,TEDI 次之,TVDI 相关性比 DTVDI 高



a. 4月8日



b. 4月28日



c. 7月18日

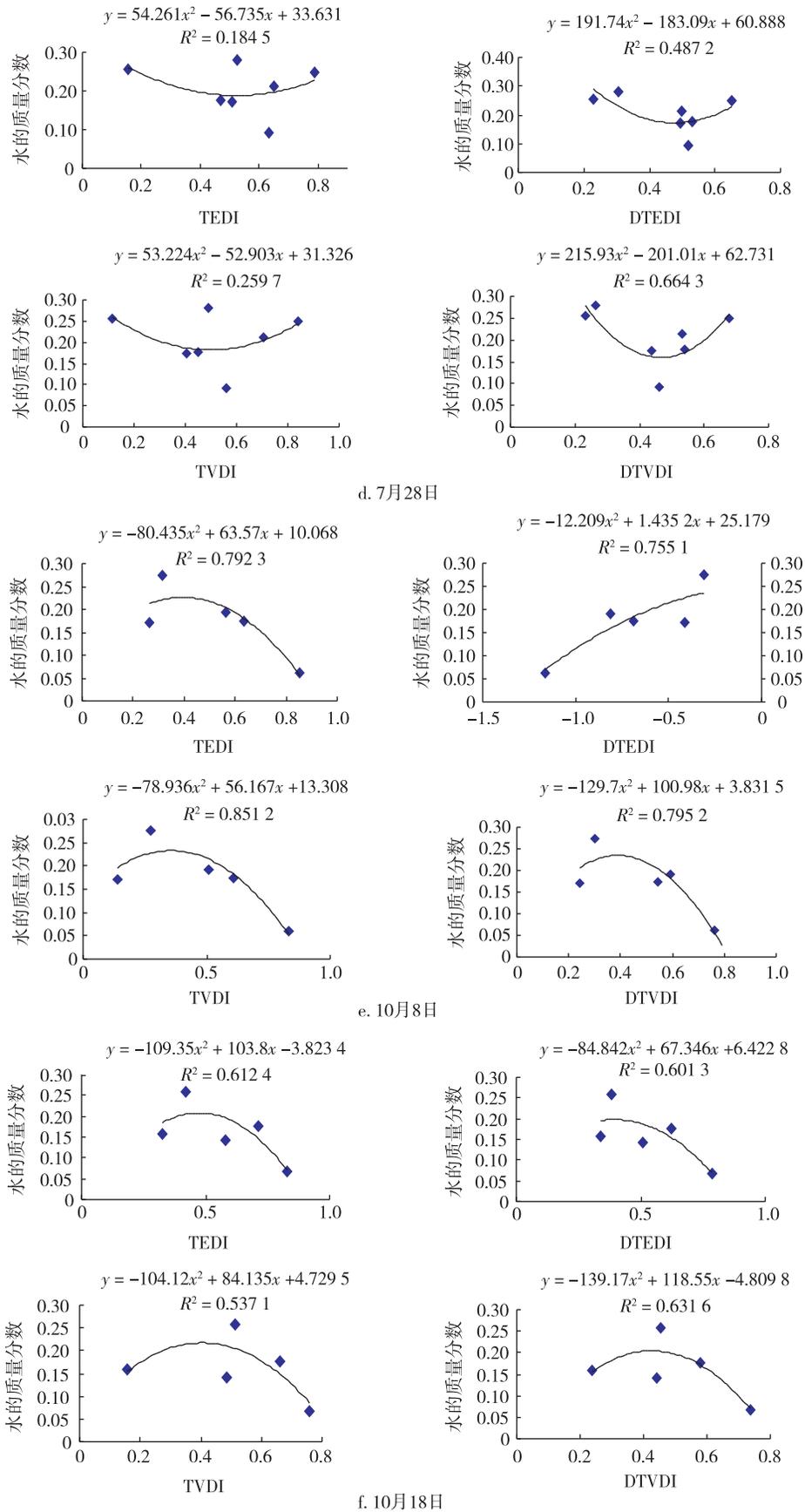


图1 构建的指数与2005年4、7、10月逢8、18、28日土壤湿度数据相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between retrieved and observed soil moisture on the 8th, 18th, and 28th day of April, July, October of 2005

4 结论与讨论

本文利用宁夏地区 2005 年 4、7、10 月的 MODIS 数据 TS、DST、EVI、NDVI, 构建特征空间 TS-EVI、DST-EVI、TS-NDVI 与 DST-NDVI, 并选取中卫、西吉、平罗、隆德、固原、同心、永宁 7 个市县同期的 10 cm 土壤水分数据与建立的特征空间方程进行线性回归分析来验证, 结果如下.

1) 各特征空间的干边线性拟合的效果很好, 而湿边拟合结果差异较大. 春、秋季增强植被指数 (EVI) 与温度 (TS) 和温差 (DST) 构建的特征空间干边方程符合前人研究规律. 夏季基于 EVI 的特征空间湿边随 EVI 增加而递减, 产生这种结果的原因是由于夏季植被覆盖度较高, EVI 不适合用于高植被覆盖区的特征空间构建, 而夏季特征空间构建中 NDVI 与 TS 特征空间干湿边线性关系较好. 因此, EVI 适用于部分植被覆盖地区, 而 TVDI 适用于高植被覆盖区.

2) 对结果的验证表明基于 EVI 构建的指数与土壤水分相关性较好, TEDI、DTEDI 在整个作物生长期都能与土壤水分有较好的相关性, 而 7 月 8 日的 TVDI 与土壤水分线性关系较好, 7 月 18 日和 7 月 28 日, EVI 值在 0.26 ~ 0.27 之间、NDVI 值在 0.38 ~ 0.41 范围内时, DTEDI、DTVDI 能较好反映土壤水分, 同时也说明在植被覆盖度高时应采用基于温差与植被指数构建的干旱指数.

3) 由于缺少 10 月平罗、中卫土壤水分数据, 而使 10 月的土壤水分与 4 个指数的线性相关较好. 若从海拔角度考虑, 7 个验证区域的海拔都在 1 000 m 以上, 最高海拔为 2 078 m, 因此本文所采用的方法能够适用于海拔 1 000 ~ 2 100 m 的宁夏地区, 其余地区的适用性还有待进一步研究.

4) 齐述华等^[13]、康为民等^[14]的研究结果表明, 利用 TVDI 旱情指标能够较好地反映表层土壤水分变化趋势, 并与同期当地气象站土壤湿度观测数据进行了定量验证, 证明 TVDI 与土壤湿度显著相关. 而本文的研究显示, 基于温差与 EVI 和 NDVI 分别构建的干旱指数综合运用更适合宁夏地区 10 cm 土层干旱的监测研究. 另外, 本文在张学艺等^[15]提出的宁夏地区干旱监测模型的基础上增加考虑了基于温差构建的干旱指数, 并且验证其与土壤水分的相关性较基于温度构建的干旱指数好, 更适合在宁夏地区进行土壤水分的监测.

本文分季节比较了基于不同 MODIS 数据的干

旱指数, 但由于土壤水分数据较少, 所以没有对整个宁夏区域进行验证. 另外, 虽然验证结果显示基于温差建立的干旱指数与宁夏地区的土壤水分有较好的相关性, 但是由于背景噪音对于卫星获取地表数据的影响, 也是 MODIS 数据无法排除的干扰, 因此其适用性还有待于进一步的研究.

参考文献

References

- [1] Waston K, Rowen L C, Offield T W. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1971 (3): 2017-2041
- [2] 毛学森, 张永强, 沈彦俊. 水分胁迫对冬小麦植被指数 NDVI 影响及其动态变化特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(1): 69-71
MAO Xuesen, ZHANG Yongqiang, SHEN Yanjun. Effects of water stress in different stages on winter wheat vegetation index and NDVI's dynamic [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(1): 69-71
- [3] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263
- [4] 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(2/3): 213-224
- [5] 李喆, 谭德宝, 秦其明, 等. 基于特征空间的遥感干旱监测方法综述 [J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(1): 37-41
LI Zhe, TAN Debao, QIN Qiming, et al. Recent advance of remote sensing drought monitoring approaches based on spectral feature space [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(1): 37-41
- [6] 王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI [J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987
WANG Zhengxing, LIU Chuang, Huete Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987
- [7] 卢远, 华璿, 韦燕飞. 利用 MODIS 数据进行旱情动态监测研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 55-57
LU Yuan, HUA Cui, WEI Yanfei. Dynamic drought monitoring using MODIS product [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(3): 55-57
- [8] 全兆远, 张万昌. 基于 MODIS 数据的渭河流域土壤水分反演 [J]. *遥感应用*, 2008(1): 66-73
TONG Zhaoyuan, ZHANG Wanchang. Retriving soil moisture in Weihe basin with MODIS product [J]. *Remote Sensing Information*, 2008(1): 66-73
- [9] Carlson T N. An overview of the "Triangle Method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture

- from satellite imagery [J]. *Sensors*, 2007, 7(8): 1612-1629
- [10] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度: 植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1205-1216
YANG Xi, WU Jianjun, YAN Feng, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature vegetation index space [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1205-1216
- [11] 张学艺, 李剑萍, 秦其明, 等. 几种干旱监测模型在宁夏的对比应用[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8): 18-23
ZHANG Xueyi, LI Jianping, QIN Qiming, et al. Comparison and application of several drought monitoring models in Ningxia, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(8): 18-23
- [12] 张晓煜, 杨晓光, 韩颖娟, 等. 宁夏南部山区农业干旱预警模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 41-47
ZHANG Xiaoyu, YANG Xiaoguang, HAN Yingjuan, et al. Agricultural drought early warning models in Southern Ningxia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 41-47
- [13] 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
QI Shuhua, WANG Changyao, NIU Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature vegetation dryness index (TVDI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 420-427
- [14] 康为民, 罗宇翔, 郑小波, 等. 贵州温度植被干旱的指数(TVDI)特征及其遥感干旱的监测应用[J]. *贵州农业科学*, 2008, 36(4): 27-30
KANG Weimin, LUO Yuxiang, ZHENG Xiaobo, et al. The characteristic of temperature vegetation drought index (TVDI) and its application in remote sensing drought monitoring in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2008, 36(4): 27-30
- [15] 张学艺, 张晓煜, 卫建国, 等. 基于MODIS资料的宁夏LST反演方法新探索[J]. *气象*, 2009, 35(5): 63-67
ZHANG Xueyi, ZHANG Xiaoyu, WEI Jianguo, et al. New exploration of land surface temperature retrieved from MODIS data in Ningxia [J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(5): 63-67

Comparison of soil moisture inversion methods with MODIS data in Ningxia

WANG Lianxi^{1,2} LI Xingyang^{1,2} YU Lingxiang³ YUN Fanghua^{1,2} GENG Xiuhua^{1,2} LI Qi^{1,2}

1 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Yunnan Climate Center, Kunming 650034

Abstract MOD11A2 and MOD13A2 (data of MODIS) are used to get surface temperature (TS), temperature difference between day and night (DST), normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI) to construct characteristic space of TS-NDVI, TS-EVI, DST-NDVI and DST-EVI in April (8th, 18th and 28th), July (8th, 18th and 28th) and October (8th, 18th and 28th) of 2005 in Ningxia region. Temperature Vegetation Drought Index (TVDI), Temperature Enhanced Drought Index (TEDI), Difference Temperature Vegetation Drought Index (DTVDI) and Difference Temperature Enhanced Drought Index (DTEDI) are established according to characteristic space of TS-NDVI, TS-EVI, DST-NDVI and DST-EVI. These drought indexes are used as monitoring index to retrieve soil moisture in April, July and October of 2005 in Ningxia region. Correlation analysis between observed 10 cm soil moisture and retrieved data is conducted, and the result shows that DTEDI is best, and DTVDI is better than TVDI and TEDI in retrieval results of soil moisture in Ningxia region.

Key words soil moisture; remote sensing; drought index; Ningxia