

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.025.

梁守真, 王猛, 韩冬锐, 等. TVDI 与土壤湿度关系的多时间尺度分析与旱情监测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 149-157.

Liang Shouzhen, Wang Meng, Han Dongrui, et al. Analysis of Relationship Between Temperature Vegetation Dryness Index and Soil Moisture at Multiple Temporal Scales and Drought Monitoring[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 149-157.

# TVDI 与土壤湿度关系的多时间尺度分析与旱情监测

梁守真, 王猛, 韩冬锐, 王菲, 王国良, 隋学艳

(山东省农业科学院 济南 250100)

**摘要:** [目的] 揭示不同时间尺度的 TVDI 与土壤湿度的关联关系, 确定反映土壤湿度的最佳时间尺度, 以更为准确地获取土壤湿度信息, 精准监测旱情。 [方法] 以 3 种不同时间尺度 (8 d, 16 d 和月) 的遥感地表温度、反射率数据以及山东省 31 个地面观测站土壤湿度数据为基础, 分析不同时间尺度下植被指数-温度空间特征, 建立不同时段不同时间尺度温度植被干旱指数 (TVDI) 的热边和冷边函数, 研究 TVDI 与土壤湿度之间的关联性随时间尺度的变化规律, 确定了区域土壤墒情监测的时间尺度, 反演了区域土壤湿度, 监测旱情。 [结果] 植被指数-温度二维空间形状呈三角形, 但随时间发生改变; 二维空间中植被指数与最大、最小温度之间有明显的线性关系, 湿边并非理想的与坐标轴平行的直线; TVDI 与土壤湿度线性相关, 但两者之间的紧密程度随时间尺度而变, 8 d 尺度的 TVDI 与土壤湿度有更高的相关系数; 山东省冬小麦旱情与降水高度一致。 [结论] 短时间尺度的 TVDI 更适于区域的旱情监测, 尽管人工灌溉有效降低了对降水的需求, 但降水的多寡仍是影响区域小麦旱情的主要因素。

**关键词:** 植被指数; 地表温度; 干旱; 时间尺度

**中图分类号:** TP79; S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)02-0149-09

## Analysis of Relationship Between Temperature Vegetation Dryness Index and Soil Moisture at Multiple Temporal Scales and Drought Monitoring

Liang Shouzhen, Wang Meng, Han Dongrui, Wang Fei, Wang Guoliang, Sui Xueyan

(Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore relations between different temporal scales TVDI and soil moisture and determine the best temporal scale inversing soil moisture. It is important to accurately acquire the soil moisture information for the monitoring and the response to drought disaster. [Methods] There are many methods to monitor drought using remotely sensed data. An index in combination with land surface temperature and vegetation index is frequently utilized. In this research, the remotely sensed data including reflectance and land surface temperature on three temporal scales (8-day, 16-day, monthly) were used to calculate temperature vegetation dryness index (TVDI), to analyze relationships between TVDI and soil moisture, and to determine the preferential temporal scale to monitor soil moisture. [Results] The vegetation index was linearly related to max and min land surface temperature at three temporal scales. At different temporal scales, there was a significant relationship between TVDI and soil moisture. However, 8-day TVDI demonstrated a closer relationship with soil moisture and with increasing temporal scales, the relationship between them became weak. In Shandong Province, the drought distribution was in accordance with precipitation. [Conclusion] It is suggested that TVDI can indicate soil moisture and should be used preferentially at the

收稿日期: 2023-02-26

修回日期: 2023-05-24

资助项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2020MD019); 山东省农业科学院知识创新工程 (CXGC2023B01); 国家重点研发计划 (2021YFB3901303)

第一作者: 梁守真 (1979—), 男, 山东阳谷人, 博士, 副研究员, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: szliang\_cas@163.com

通信作者: 隋学艳 (1980—), 女, 山东蓬莱人, 硕士, 研究员, 主要从事农业遥感研究。E-mail: sdnkysxy@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

short temporal scale, and precipitation has important influence on wheat drought in Shandong Province.

**Keywords:** vegetation index; land surface temperature; drought; temporal scales

干旱是气候灾害中最主要的灾害之一。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在全球气候变化评估报告中指出,在未来,干旱风险有增加的趋势,预防和减轻干旱灾害已成为当今世界的重要课题之一<sup>[1-2]</sup>。土壤湿度是反映土壤干旱程度最直观的指标,是全球气候观测系统中50个基本气候变量之一<sup>[3-4]</sup>。土壤湿度的准确测定对地表植物蒸散发、局部气候变化和旱涝灾害的监测等有着重大意义<sup>[5]</sup>。土壤湿度可通过田间实测、土壤湿度模型以及遥感观测反演获取。田间实测法为基于特定位置的离散测量,结果精度高,但每个测量点的代表范围有限,而土壤湿度的空间异质性较大,导致田间实测方法在反映连续空间的土壤湿度时存在困难<sup>[6-7]</sup>。土壤湿度模型法通过建立水分平衡方程来求解土壤湿度,可提供面信息,但参数复杂,需要大量气象数据支持,估测误差较大<sup>[8]</sup>。遥感通过对遥感监测值与地面土壤水分之间的关系进行分析和建模来反演土壤湿度,可快速获取大尺度时空连续的土壤湿度信息,遥感观测和地面实测的联合运用已经成为目前土壤湿度监测研究的主要方向之一。根据所使用波段的不同可分为微波遥感反演、光学遥感反演和光学微波融合反演<sup>[9-12]</sup>。其中基于光学遥感的反演方法由于其数据的易获取性、时空分辨率高、反演模型较简单等优点得到广泛应用,最典型的是以地表温度和植被指数为基础的温度植被干旱指数(TVDI)法。TVDI综合了作物冠层温度和长势特征,考虑了植被覆盖度对温度的影响,相比单纯使用温度或作物长势的土壤湿度监测方法原理性更强<sup>[13-14]</sup>。

目前,包含热红外波段的传感器仍旧偏少,MODIS, AVHRR以及Landsat8种常用的计算TVDI的数据源。但Landsat回归周期过长,有效数据不足,开展定期的监测较为困难;而AVHRR和MODIS每天都可过境,数据充足。相比于AVHRR传感器,MODIS发射晚,但其有更好的空间分辨率和波谱分辨率,并且在定标、大气校正、云屏蔽方面有更高的精度,更适于开展土壤湿度的反演<sup>[15-16]</sup>。MODIS产品丰富,包含多个时间尺度的反射率、植被指数以及地表温度数据,所以基于MODIS数据产品可生成不同时间尺度的TVDI数据集。但当前的研究多采用某一时间尺度的数据产品开展研究,缺乏对多时间尺度的TVDI与土壤湿度之间的关系的比较和分析。鉴于此,本研究从多个时间尺度(8 d, 16 d和月)来分析

植被指数-温度二维空间,研究TVDI在不同时间尺度上与土壤湿度的关联性,以确定MODIS数据产品开展土壤湿度监测的时间尺度,准确监测农业干旱。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

遥感数据来自NASA-Land Processes DAAC数据中心,包括2016年3—5月Terra MODIS地表温度产品MOD11A2,植被指数产品MOD13A2, A3以及地表反射率产品MOD09A1。MOD11A2为8 d合成的空间分辨率为1 km的地表温度(LST)产品,包含白天LST、夜间LST, 31, 32波段通道发射率及质量控制等资料;MOD13A2, A3分别是MODIS 16 d、每月合成空间分辨率为1 km的植被指数产品,包含NDVI, EVI和几个主要波段反射率以及其他辅助信息;MOD09A1为经过大气校正后8 d合成的500 m分辨率的反射率产品,包括MODIS前7个波段的反射率以及其质量标识信息。8 d的植被指数是利用MOD09A1的反射率数据依据植被指数公式来计算,并通过平均的方式将500 m分辨率数据升尺度为1 km的数据,形成8 d 1 km的植被指数。采用同样的方式,将8 d的地表温度产品转换为16 d,月尺度的温度数据以每天的数据为基础生成。最终形成8 d, 16 d和月的植被指数和地表温度数据集。

土壤湿度数据为2016年山东省冬小麦重点种植区的31个土壤湿度观测站点3—5月逐日20 cm深度的土壤相对湿度数据。每天的数据通过平均的方法合成为8 d, 16 d和每月的数据,时间尺度与卫星数据保持一致。同时选用2016年山东省冬小麦数据,该由山东省农业遥感工程技术研究中心提供,通过目视解译和计算机自动解译相结合的方式获取。

### 1.2 方法

1.2.1 TVDI Carlson等<sup>[17]</sup>研究发现,当一个研究地区,土壤湿度从湿润到干旱、土地覆盖从裸土到植被全覆盖变化时,NDVI和地表温度 $T_s$ 二维空间中像元散点呈明显的三角形关系<sup>[18]</sup>, Sandholt等<sup>[18]</sup>在植被指数—温度三角形特征空间的基础上提出了TVDI,其函数表达式如下:

$$TVDI = \frac{T_{s_i} - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} \quad (1)$$

$$T_{s_{max}} = a_1 + b_1 \times VI \quad (2)$$

$$T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \times VI \quad (3)$$

式中  $VI$  为植被指数;  $T_{s_i}$  为  $i$  日期的地表温度;  $a_1, b_1$  和  $a_2, b_2$  分别为干边和湿边的回归方程系数;  $T_{s_{\min}}$  为植被指数-温度空间的干边, 代表研究区内某一时期的同一  $VI$  值对应的最高地表温度;  $T_{s_{\min}}$  为湿边, 代表研究区内某一时期的同一  $VI$  对应的最低地表温度。

TVDI 的关键在于特征空间中干边和湿边的确定, 干边和湿边分别为特征空间散点图上下边界的直线, 其方程通过线性拟合得到。TVDI 取值在  $0 \sim 1$ , TVDI 值越大, 表明该地区土壤湿度越低, 水分缺失越严重。TVDI 受植被指数影响大, 早期的时候, TVDI 主要采用归一化植被指数 NDVI 和地表温度来反演, NDVI 指数在高植被覆盖条件下, 容易饱和, 而在低植被覆盖度时, 又容易受背景影响, 不能很好地反映植被状况<sup>[19]</sup>, 这导致基于  $T_s$ -NDVI 特征空间的作物土壤湿度反演精度受到影响<sup>[13, 20]</sup>。为了降低 NDVI 的影响, 一些替代性的植被指数逐渐在 TVDI 中得到应用, 如 EVI。EVI 是一个优化的植被指数, 除了包含近红外波段和红波段反射率, EVI 公式还增加了蓝波段反射率和土壤背景调节因子, 一方面降低了植被背景和大气对植被指数的影响, 另一方面使得 EVI 不易饱和, 在高植被覆盖条件下时仍能捕捉能监测植被冠层的变化。因此, EVI 可用于不同背景和植被覆盖条件下的植被监测, 相比于 NDVI, 适用范围更加广泛, 其与温度结合能更有效地反映地表湿度状况<sup>[21-22]</sup>。因此, 在本研究中, 我们采用 EVI 代替 NDVI 去计算 TVDI, 其计算公式为

$$EVI = 2.5 \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + 6R_{RED} - 7.5R_{BLUE} + 1} \quad (4)$$

式中:  $R_{NIR}$ ,  $R_{RED}$ ,  $R_{BLUE}$  分别为 MODIS 传感器的近红外(841~876 nm)、红波段(620~670 nm)和蓝波段(545~565 nm)反射率。

**1.2.2 土壤湿度反演与旱情划分** 通常, 评价土壤墒情一般采用土壤湿度作为指标, 因此, 需将 TVDI 转化为土壤湿度。根据土壤湿度观测点位置, 匹配相应的 TVDI 值, 建立不同时间尺度的 TVDI、土壤湿度数据集, 然后采用线性回归的方法构建不同尺度 TVDI 与实测土壤湿度数据的关系模型, 选择反演土壤湿度的最佳时间尺度数据, 以其时间尺度的 TVDI 为自变量反演区域土壤湿度值, 确定区域旱情分布。土壤湿度值越低, 表示旱情越严重。根据国家农业旱情划分标准, 将土壤相对湿度  $RH < 60\%$ ,  $RH < 50\%$ ,  $RH < 40\%$ ,  $RH < 30\%$  分别划分为轻旱、中旱、重旱、特旱、轻旱<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时间尺度数据的植被指数-温度特征空间

不同时间尺度下山东省冬小麦 EVI 和地表面温度形成的 EVI- $T_s$  特征空间如图 1 所示。EVI 与地表温度的边界像元呈三角形状, 温度较高的像元点形成了二维空间的干边界, 而温度低的像元的构成为湿边界。在二维空间中, 干边上的  $T_s$  随 EVI 的增加而降低, 而在湿边上, 随着 EVI 的增加,  $T_s$  也在不断增大, 湿边并非理想状态下与坐标轴平行的直线。从 3 月到 5 月, 随着时间的推进, 气温不断升高, 冬小麦经历返青、拔节、抽穗、灌浆、成熟等生育期, 其冠层温度和植被覆盖度随之发生改变, EVI- $T_s$  空间形状有所变动,  $T_s$  值不断攀升, 5 月份达到最大值。

尽管不同时间尺度的 EVI 和  $T_s$  组成的二维空间形状类似, 但是由于时间涵盖的范围等因素的影响, 其在空间分布仍存在一定差异。干边和湿边是描述二维空间特征的主要因子, 它们在不同时间不同尺度的表达形式见表 1。从表中可以看出, 无论是二维空间的干边还是湿边,  $T_s$  与 EVI 之间存在着显著的线性相关关系。各时相的干边斜率总小于 0, 这表示 EVI 与  $T_s$  呈负相关关系, 而大部分湿边斜率大于 0, 表示植被指数与温度同时增减。除了月尺度上, 3 月份干边斜率的绝对值小于湿边斜率绝对值, 其他时期的干边有更高的变率。

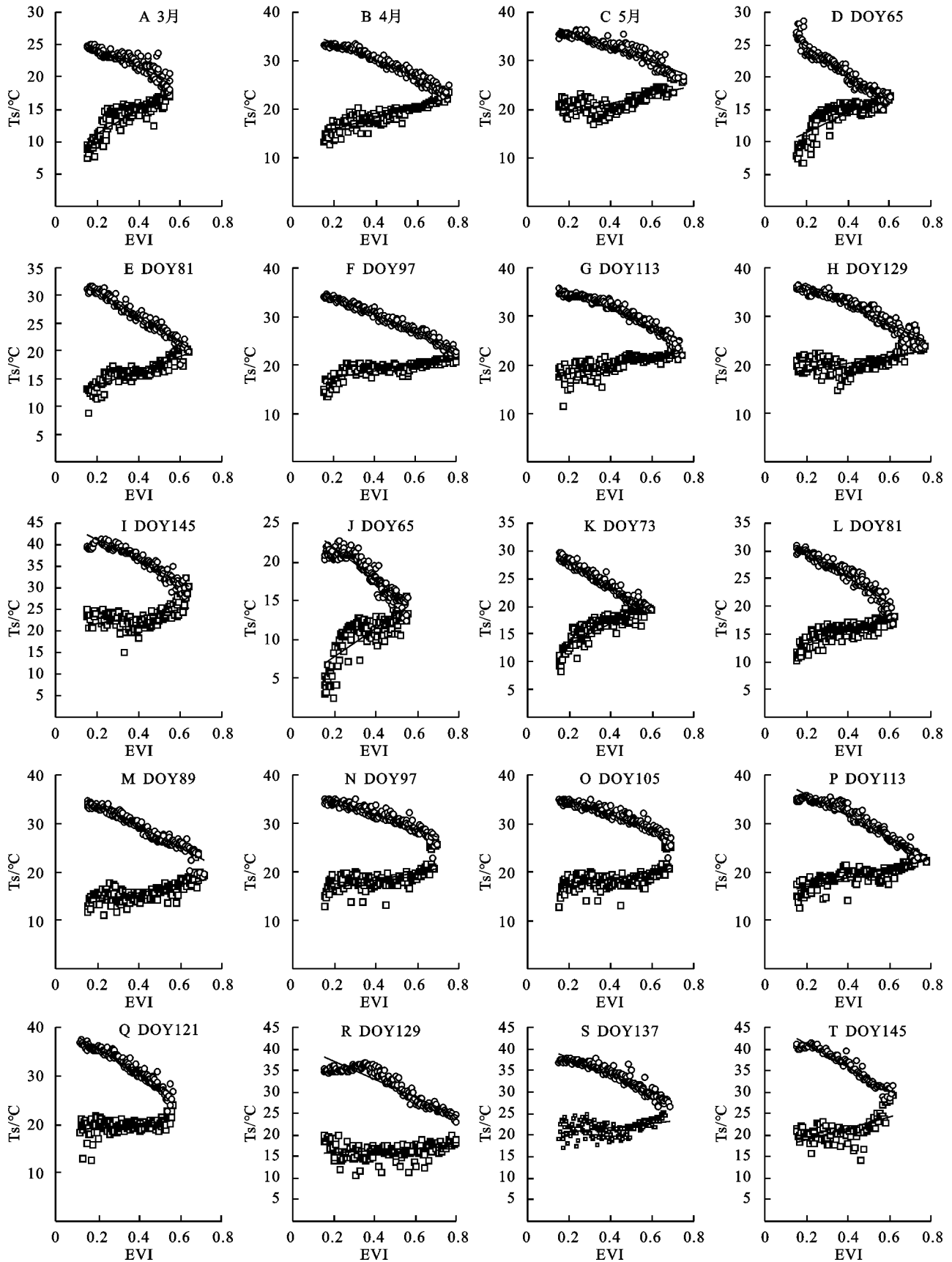
### 2.2 TVDI 与土壤湿度的关系

基于干边和湿边方程, 利用 MODIS 地表温度和 EVI 数据分别计算不同时间尺度各像元的 TVDI 值, 地面土壤湿度观测点的相对湿度与 TVDI 的空间分布如图 2 所示。从图中可以看出 TVDI 值越高, 土壤湿度往往降低。不同时间尺度数据 TVDI 和土壤湿度之间的紧密程度不一致, 根据相关性统计结果(图 3), 不论是 8 d, 16 d 还是每月尺度的数据, TVDI 与土壤相对湿度实测值之间的相关系数均通过了  $\alpha = 0.05$  置信度检验, 这说明两者之间的相关性是显著的, 同时也证明 TVDI 指数可以有效反映土壤水分状况变化。

在月尺度上, 4 月份的 TVDI 与土壤湿度之间的相关性最高, 为 0.67, 而在 3 月和 5 月, 相关系数接近; 在 16 d 时间尺度上, 相关系数最高值出现在 129 d (DOY, 年序), 即 5 月中旬, 145 d (DOY) 的相关系数最小, 为 0.57; 而在 8 d 时间尺度上, 121 d (DOY) TVDI 与土壤湿度相关性最佳, 相关系数达到了 0.78, 最低值出现在 145 d (DOY)。对于 3 个时间尺度的相关系数, 可以看出, 随着时间尺度的降低, TVDI 与土壤湿度之间的相关系数越来越大, 相同时间内, 即相关系数值 8 d 时间尺度  $> 16 d > 月$ 。这在一

定程度上说明相对于大时间尺度的数据,短时间尺度

的 TVDI 能更准确映田间土壤湿度。



注: A—C 为月尺度; D—I 为 16 d 尺度; G—T 为 8 d 尺度。下图同。

图 1 不同时间尺度的植被指数—温度特征空间

Fig. 1 Vegetation index and temperature space for different temporal scales



表 1 不同时间 EVI-Ts 特征空间干边和湿边方程

Table 1 Dry edge and wetness edge equations of EVI-Ts spaces in different times

尺度	时间	干边方程	湿边方程
月	3 月	$Ts_{max} = -13.8EVI + 27.12$	$Ts_{min} = 18.265EVI + 7.52$
	4 月	$Ts_{max} = -17.995EVI + 32.279$	$Ts_{min} = 12.162EVI + 13.333$
	5 月	$Ts_{max} = -15.354EVI + 39.014$	$Ts_{min} = 8.762EVI + 17.758$
16 d	65 d	$Ts_{max} = -21.713EVI + 29.07$	$Ts_{min} = 15.476EVI + 8.2096$
	81 d	$Ts_{max} = -23.24EVI + 35.445$	$Ts_{min} = 12.971EVI + 11.18$
	97 d	$Ts_{max} = -18.019EVI + 37.584$	$Ts_{min} = 6.6046EVI + 16.109$
	113 d	$Ts_{max} = -18.901EVI + 39.042$	$Ts_{min} = 8.053EVI + 16.645$
	129 d	$Ts_{max} = -19.464EVI + 40.054$	$Ts_{min} = 7.2155EVI + 17.36$
8 d	145 d	$Ts_{max} = -23.988EVI + 45.83$	$Ts_{min} = 8.1462EVI + 19.991$
	65 d	$Ts_{max} = -19.941EVI + 25.667$	$Ts_{min} = 19.98EVI - 1.679$
	73 d	$Ts_{max} = -22.203EVI + 32.415$	$Ts_{min} = 17.539EVI + 9.8826$
	81 d	$Ts_{max} = -23.401EVI + 34.673$	$Ts_{min} = 10.861EVI + 11.196$
	89 d	$Ts_{max} = -22.065EVI + 38.145$	$Ts_{min} = 8.5751EVI + 12.167$
	97 d	$Ts_{max} = -15.407EVI + 37.856$	$Ts_{min} = 7.7651EVI + 15.212$
	105 d	$Ts_{max} = -15.407EVI + 37.856$	$Ts_{min} = 7.7651EVI + 15.212$
	113 d	$Ts_{max} = -22.029EVI + 40.459$	$Ts_{min} = 9.2227EVI + 15.002$
	121 d	$Ts_{max} = -20.815EVI + 40.86$	$Ts_{min} = 3.171EVI + 18.386$
	129 d	$Ts_{max} = -21.254EVI + 41.479$	$Ts_{min} = 2.5944EVI + 15.272$
	137 d	$Ts_{max} = -19.978EVI + 41.907$	$Ts_{min} = 5.2949EVI + 19.607$
	145 d	$Ts_{max} = -26.928EVI + 46.566$	$Ts_{min} = 12.579EVI + 16.534$

众所周知,MODIS 植被指数产品是采用最大值合成方法将合成期内的植被指数数据进行合成,以最大值代表合成期的植被状态<sup>[24]</sup>,而地表温度采用了合成期内的温度均值。在合成期内,土壤水分、温度、植被指数都可能会产生较大的变化,尤其是在作物生长旺盛期,植被冠层随时间变化大,但它们的变化并非线性同步,这意味以合成的植被指数和温度数据构建的 TVDI 反映的可能并不是田间水分的平均状态。合成期越长,各参数的变动就越大,这就导致了时间尺度越大,TVDI 与土壤相对湿度的相关性越弱。

3.3 旱情时空分布与降水的关联性

由于 8 d 时间尺度的 TVDI 与土壤湿度相关性最佳,因此在研究中依据 8 d 时间尺度的 TVDI 来反演 2016 年春季的土壤湿度,绘制山东省冬小麦春季旱情空间分布(图 4)。2016 年 3 月上旬(DOY65),旱情主要出现在聊城、菏泽以及济宁西部,到了 DOY73,聊城地区的旱情面积大幅减少,而菏泽,济宁旱情有所加重,干旱面积增加,潍坊的高密、青岛平度以及章丘北部旱情严重;3 月下旬,山东省大部分地区的旱情得到缓解;进入 4 月份以后,鲁西、鲁西北

平原地区的旱情基本消失,只有在临沂南部以及潍坊的高密、诸城以及平度有中等以上旱情;4 月中下旬,大部分地区冬小麦生长正常,未受到干旱的胁迫;5 月初,鲁西南地区出现中等以上的旱情,5 月中旬开始,济宁市周围有中等以上旱情,而 5 月下旬,胶东地区的旱情较重,其他地区未有严重的干旱。

对春季干旱面积进行统计,结果如图 5 所示,3 月份受干旱胁迫的冬小麦面积占全部冬小麦面积的一半以上,尤其是 DOY73,干旱区域面积占 67%,但大部分以轻旱和中旱为主;4 月份,总体旱情得到了缓解,尤其是到了 4 月中下旬(DOY105),受干旱胁迫的冬小麦面积为全部面积的 14.79%,其中重旱和特旱区仅占 1.2%;5 月份干旱区面积所占比例小,25%左右的面积为轻旱,重旱和特旱区仅占 5%。同时对比山东降水序列,可以看出冬小麦干旱区的比例与降水有很强的相关关系。3 月份,山东省平均降水量仅为 3.5 mm,导致冬小麦受干旱胁迫的面积比重大,4 月中旬(DOY105),山东省出现一场大范围的降雨,缓解了冬小麦旱情,干旱面积大幅减少;5 月份,山东省降水逐渐增多,但是具有局部性的特点,主要

集中在北部, 济宁的汶上、金乡、曲阜、邹城、嘉祥等区

域偏少, 导致该地区旱区较其他区域严重。

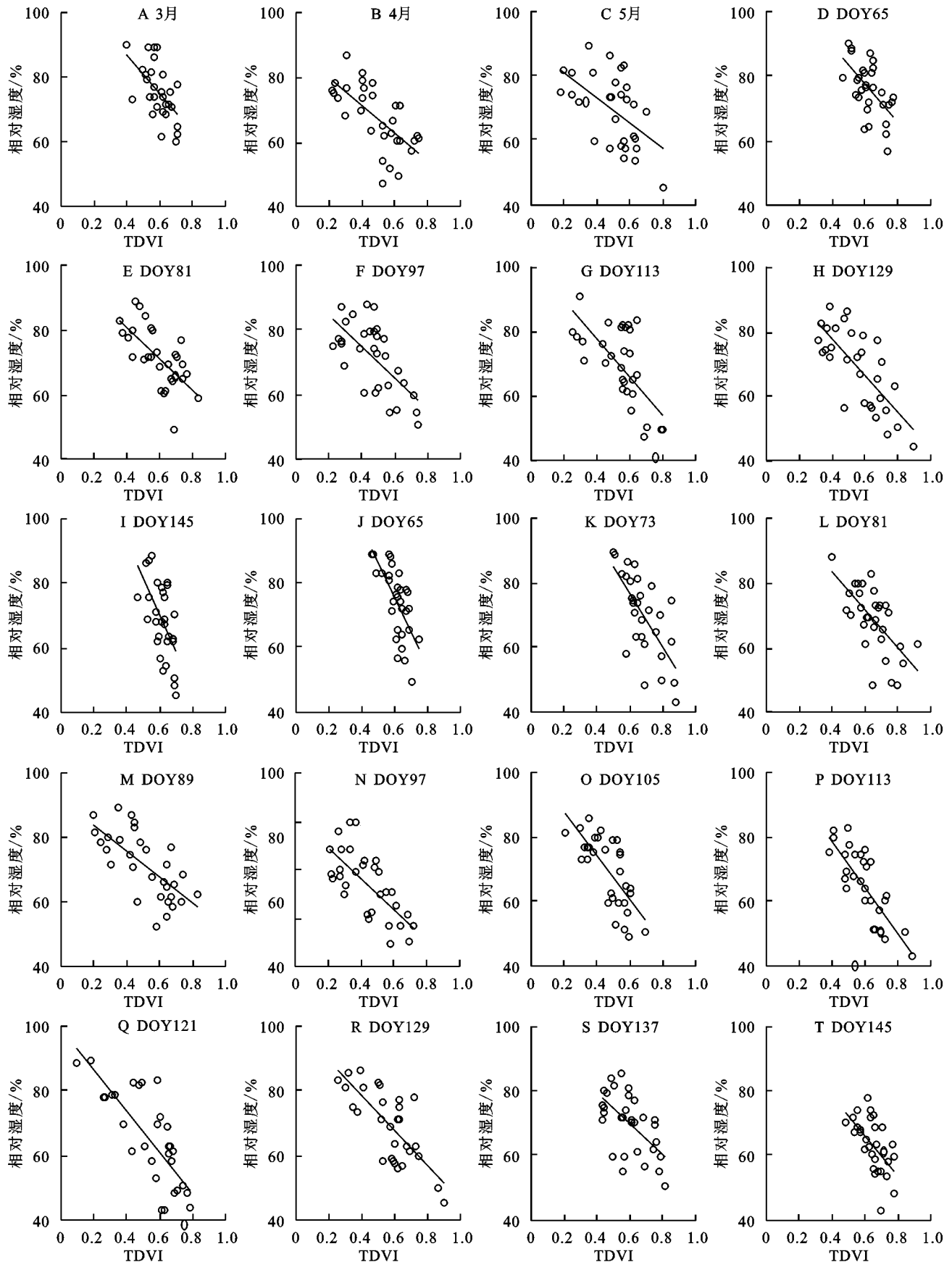


图 2 不同时间尺度 TVDI 与土壤湿度散点图

Fig. 2 Scatter plots for TVDI and soil moisture in different temporal scales

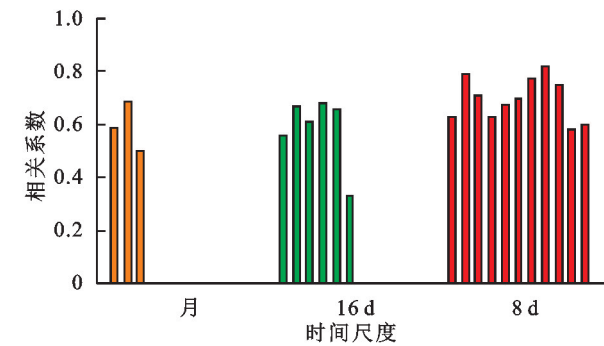


图 3 不同时间尺度 TVDI 与土壤湿度相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients between TVDI and soil moisture in different temporal scales

3 结 论

(1) 无论是 8 d,16 d 还是月时间尺度,3—5 月植被指数与地表温度像元点在二维空间中呈三角形,干边地表温度随着植被指数的增加而降低,湿边地表温度随着植被指数的增加而升高,而并非保持不变;

(2) TVDI 与土壤湿度之间相关关系显著,从相关系数值来看,8 d 尺度>16 d 尺度>月尺度,表明时间尺度越小,TVDI 对土壤湿度的代表性越好;

(3) 2016 年山东省冬小麦旱情分布随时间而发生变化,干旱面积与降水存在高度的一致性。

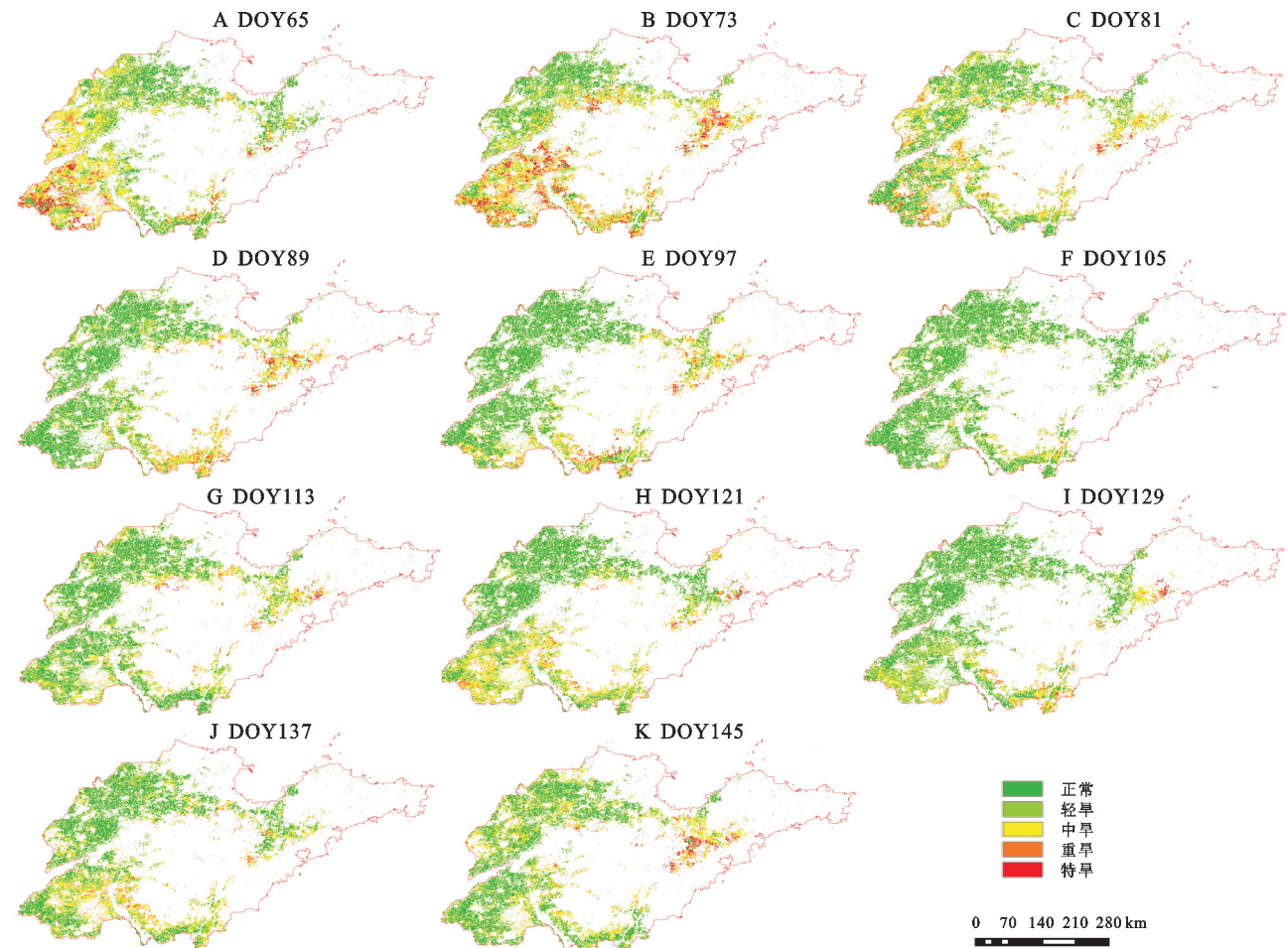


图 4 2016 年春季山东省冬小麦旱情分布

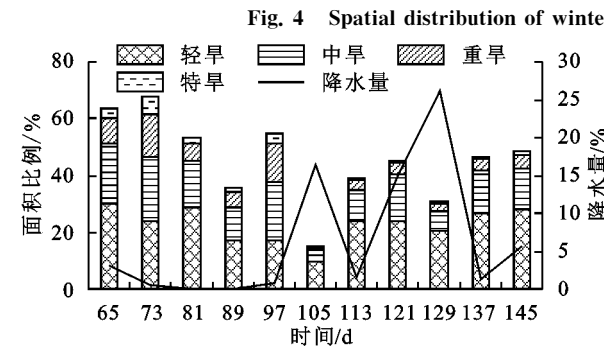


图 5 不同时期干旱面积与降水量

Fig. 5 Area suffered from drought and precipitation in different times

在本研究中,冬小麦干旱状况由 TVDI 反演的土壤湿度来划分,但在早期的一些研究中直接采用 TVDI 来对旱情进行等级划分,监测区域旱情<sup>[25-26]</sup>。TVDI 对土壤湿度具有良好的代表性,但是采用 TVDI 划分土壤旱情需要解决两个问题,一是划分标准,二是区域是否包含植被覆盖从裸地到全覆盖、土壤湿度由极干旱到极湿润的地面。TVDI 是以干边和湿边为基础进行计算,反映的是某一区域像元的相对干湿程度。若研究区的土壤湿度并未能覆盖极干旱到极

湿润的范围,那么 TVDI 无法确定作物是否真正处于干旱状态。当区域的土壤湿度范围较窄时,TVDI 将可能低估或高估土壤湿度。同时,由于区域下垫面条件的异质性,不同的研究在划分干旱程度时,标准并不统一,导致研究结果的可对比性不足。准确地监测农田旱情,需要地面土壤水分数据的支撑,建立 TVDI 与土壤水分之间的反演模型,以土壤湿度来划分旱情,则更具农学意义,但大量地面数据的获取,仍是具有一定挑战性的工作。由于数据限制,本研究只分析了春季的 TVDI 的表现,更深入的研究有待进一步开展,获取更广泛的地面数据支持。

#### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [3] Wang C, Fu B J, Zhang L, et al. Soil moisture-plant interactions: An ecohydrological review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(1):1-9.
- [4] Kim H, Parinussa R, Konings A G, et al. Global-scale assessment and combination of SMAP with ASCAT (active) and AMSR2 (passive) soil moisture products[J]. Remote Sensing of Environment, 2018,204:260-275.
- [5] Gómez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J, et al. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment[J]. Hydrological Processes, 2000,14(7):1261-1277.
- [6] Byun K, Liaqat U W, Choi M. Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo-and heterogeneous land surface conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,197:169-187.
- [7] de Tomás A, Nieto H, Guzinski R, et al. Validation and scale dependencies of the triangle method for the evaporative fraction estimation over heterogeneous areas [J]. Remote Sensing of Environment, 2014,152:493-511.
- [8] 袁丽娜.基于 ATI 和 TVDI 模型改进的黄土高原土壤湿度反演阈值优化与模拟研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2021.  
Yuan L N. Estimating by Thresholds Optimization and Modeling Soil Moisture Based on ATI and Modified TVDI for the Chinese Loess Plateau[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2021.
- [9] 赵少华,秦其明,沈心一,等.微波遥感技术监测土壤湿度的研究[J].微波学报,2010,26(2):90-96.  
Zhao S H, Qin Q M, Shen X Y, et al. Review of microwave remote sensing on soil moisture monitoring[J]. Journal of Microwaves, 2010,26(2):90-96.
- [10] 覃湘栋,庞治国,江威.土壤水分光学遥感反演方法研究进展和挑战[J].人民珠江,2021,42(11):38-45,111.  
Qin X D, Pang Z G, Jiang W. Progress and challenge of optical remote sensing inversion on soil moisture[J]. Pearl River, 2021, 42(11):38-45,111.
- [11] 孔金玲,李菁菁,甄珮珮,等.微波与光学遥感协同反演旱区地表土壤水分研究[J].地球信息科学学报,2016,18(6):857-863.  
Kong J L, Li J J, Zhen P P, et al. Inversion of soil moisture in arid area based on microwave and optical remote sensing data [J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(6):857-863.
- [12] 孙嵩松,王喜民.基于多源遥感数据的干旱监测研究[J].山东农业科学,2019,51(2):150-157.  
Sun S S, Wang X M. Drought monitoring based on multisource remote sensing data[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019,51(2):150-157.
- [13] 姚春生,张增祥,汪潇.使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J].遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.  
Yao C S, Zhang Z X, Wang X. Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the temperature vegetation dryness index (TVDI) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004,19(6):473-478.
- [14] 王鹏新,龚健雅,李小文.条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J].武汉大学学报:信息科学版,2001,26(5):412-418.  
Wang P X, Gong J Y, Li X W. Vegetation-temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001,26(5):412-418.
- [15] Heidinger A K, Cao C Y, Sullivan J T. Using moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002,107(D23):4702.
- [16] Toukiloglou P. Comparison of AVHRR, MODIS and VEGETATION for Land Cover Mapping and Drought Monitoring at 1 km Spatial Resolution[D]. Cranfield Bedfordshire, UK: Cranfield University, 2007.
- [17] 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 [J]. Remote Sensing Reviews, 1994,9(1/2):161-173.
- [18] 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.



- [19] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440-451.
- [20] 张瑶瑶, 崔霞, 宋清洁, 等. 基于不同下垫面的农业干旱遥感监测方法与发展前景[J]. *草业科学*, 2017, 34(12): 2416-2427.  
Zhang Y Y, Cui X, Song Q J, et al. The agricultural drought remote sensing monitoring methods and prospects based on different underlying surface conditions [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(12): 2416-2427.
- [21] 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 X, Wu J J, Yan F, 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.
- [22] 陈明星, 张玉虎. 基于4种植被指数TVDI模型的三江平原土壤湿度反演[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 93-100, 107.  
Chen M X, Zhang Y H. Retrieval of soil moisture in Sanjiang plain based on TVDI model with four vegetation indices[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 93-100, 107.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T32136—2015 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Grade of Agricultural Drought GB/T32136—2015* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [24] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [25] 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[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 56-61.  
Qi S H, Li G C, Wang C Y, et al. Study on monitoring drought in China with MODIS product [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 56-61.
- [26] 张顺谦, 卿清涛, 侯美享, 等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 141-146.  
Zhang S Q, Qing Q T, Hou M T, et al. Remote sensing and impact estimation for Sichuan hot-drought based on temperature vegetation dryness index [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 141-146.



(上接第148页)

- [21] 蔡冠雄, 吴燕, 陈异植, 等. 福建省中小流域洪峰流量经验公式的初步探讨[J]. *福州大学学报*, 1984(1): 69-76, 128.  
Cai G X, Wu Y, Chen Y Z, et al. Establishing an empirical formula of flood flow for the middle or small basins in Fujian Province[J]. *Journal of Fuzhou University*, 1984(1): 69-76, 128.
- [22] Fu S H, Wei X, Zhang G H. Estimation of peak flows from small watersheds on the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(21): 4233-4238.
- [23] Liu B Y, Wang D A, Fu S H, et al. Estimation of peak flow rates for small drainage areas [J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(5): 1635-1647.
- [24] Shi W H, Wang M M, Li D H, et al. An improved method that incorporates the estimated runoff for peak discharge prediction on the Chinese Loess Plateau [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(2): 290-300.
- [25] 石炜, 徐永波, 陈娟, 等. 华东地区小流域设计洪水计算方法探讨[J]. *水利规划与设计*, 2015(12): 29-31.
- Shi W, Xu Y B, Chen J, et al. Discussion on design flood calculation method of small watershed in East China [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2015(12): 29-31.
- [26] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [27] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及其影响因素研究[J]. *地理研究*, 2009, 28(3): 583-591.  
Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 583-591.
- [28] 蔡强国, 刘纪根, 刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. *地理研究*, 2004, 23(4): 433-439.  
Cai Q G, Liu J G, Liu Q J. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(4): 433-439.