

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020329

引用格式: 于维,柯福阳,曹云昌. 基于 MODIS_TVDI/GNSS_PWV 的云南省干旱特征时空分析[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):202–210. (Yu W,Ke F Y,Cao Y C. Spatial – temporal analysis of drought characteristics of Yunnan Province based on MODIS_TVDI/GNSS_PWV data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(3):202–210.)

基于 MODIS_TVDI/GNSS_PWV 的 云南省干旱特征时空分析

于 维¹,柯福阳¹,曹云昌²

(1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,南京 210044;
2. 中国气象局气象探测中心,北京 100081)

摘要: 为了缓解现有干旱监测技术存在的监测易受环境影响、时效性不强等问题。本研究使用 MODIS_TVDI 和 GNSS_PWV 数据,利用相关性分析、回归分析等方法研究云南省 2016—2020 年春季干旱特征时空变化。研究结果表明: TVDI 反演结果能较好地反映区域干旱时空特征变化,在空间上,旱情呈滇西北向滇东南增强的趋势;在时间上,季内旱情呈先递增后减缓趋势,尤其 3—4 月份旱情变化特征最为明显。此外,基于 Pearson 相关分析方法发现 PWV 和 TVDI 存在较强的相关性,在季尺度上,相关系数基本均大于 0. 5;在月尺度上,PWV 变化趋势与 TVDI 变化趋势基本一致,但 TVDI 变化有一定的时间延迟;在日尺度上,尤其是降雨时期,PWV 变化和 TVDI 变化幅度契合度更高,表现出了一定的干旱特征信号,因此 PWV 为旱灾监测提供了一种新的技术手段。

关键词: 温度植被干旱指数; 大气可降水量; 相关性分析; 云南省

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2021)03 – 0202 – 09

0 引言

我国是受旱灾影响最大的国家之一,近几十年来,由于气温逐渐升高、降水逐渐减少导致旱灾频发^[1],对农业经济造成了巨大损失。传统的干旱监测多以气象监测为主,精度高,但效率低、耗费人力、应用范围小且受站点分布影响较大^[2],遥感技术的飞速发展解决了这一难题。MODIS 作为中分辨率遥感卫星,是目前干旱监测主要的数据来源之一。温度植被干旱指数 (temperature vegetation dryness index, TVDI) 是遥感干旱监测中常用的方法,它反映了植被覆盖度与地表温度变化之间的关系,进而反映土壤湿润状态^[3],可以及时、准确和有效地监测不同地表面的干旱情况,且数据获取途径较多,过程简单^[4],因此被诸多学者进行研究。如王美林等利用 2000—2015 年的长时间序列 MODIS 数据提取地表温度和植被指数数据构建 TVDI,从年际尺度到季节尺度反演、解析了玛曲表层土壤湿度的时空演

变特征,并通过气象数据及其他多源数据进行验证,证实了其结果的有效性和可靠性^[5];刘英等将 TVDI 用于陕西省的干旱监测,并探究了其引起干旱的主导因素^[6]。虽然 TVDI 在干旱监测中有一定作用,但 MODIS 时间分辨率较低,难以进行实时旱情监测。

大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 作为大气中重要的成分之一,获取手段主要通过全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)、气象卫星以及探空站等^[7],其中传统的探空站监测精度较高,但站点数量少且获取频率低,缺乏一定的连续性^[8],GNSS 遥感的出现解决了这一问题。由于其全天候、时空分辨率高、受云雨因素影响较小等诸多优点成为 PWV 监测的主要方式^[9]。PWV 是大气中产生降水的基础,也是评估空中水资源含量的重要依据,与气象现象密切相关^[10],因而备受研究人员关注。F Alshawaf 发现 PWV 的变化与地表温度呈一定规律,即地表温度每上升 1℃,PWV 在一定范围内产生波动^[11];Wang X M 利用

收稿日期: 2020 – 10 – 19; 修订日期: 2020 – 12 – 16
基金项目: “国家自然科学基金”(编号: 41674036); “江苏省‘六大人才高峰’高层次人才项目”(编号: XYDDX – 045)、“西宁市科技计划项目”(编号: 2019 – Y – 12) 共同资助。
第一作者: 于 维(1997 –),男,硕士研究生,主要从事遥感反演及 GNSS 水汽研究。Email: 2232446236@qq. com。
通信作者: 柯福阳(1981 –),男,教授,主要从事 GNSS 气象学及时空大数据挖掘。Email: ke. fuyang@qq. com。

PWV 监测出了澳大利亚的洪涝灾害^[12]。上述研究表明,PWV 在气象灾害监测方面具有很大潜力,但在旱灾监测领域研究较少。

MODIS 数据广泛应用于干旱监测领域,能够实现较大范围的干旱监测,但其时间分辨率较低,GNSS PWV 作为一种新的技术手段,在气象灾害监测方面具有很大潜力,且有着高时空分辨率。为此,本文以云南省为例,利用 MODIS 的植被指数产品(normalized difference vegetation index, NDVI)和地表温度产品(land surface temperature, LST)构建 TVDI,以验证 PWV 在干旱监测中的适用性,同时进行干旱特征时空变化分析。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

云南省位于我国西南地区,地处 N21°8′~29°15′,E97°31′~106°11′之间。地势上,全省地势较高,最高海拔高达 6 000 多米,呈西北高、东南低态势,为山地高原地形,主要以山地类型为主,约占比全省国土总面积的 84%。气候上,主要为亚热带高原季风型气候,全省气温七月达最高,约为 20℃,最低在一月份,约为 7℃,年温差约为 11℃;全年干湿分明,有着明显的季节性和区域性降水不均现象,时间上,降雨主要集中在 5—10 月,而 11 月—次年 4 月降雨较少,空间上,雨量较多地区可达 2 200~2 700 mm,较少地区可达 584 mm,表现为夏秋多雨、春冬多旱现象,干旱发生频率较高区域主要在云南东部。图 1 为研究区范围及 CORS 站、气象站分布图。

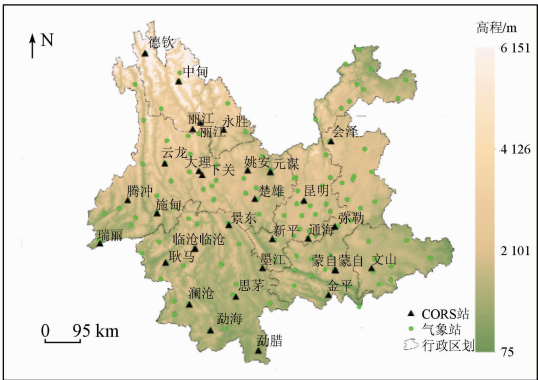


图 1 研究区范围及 CORS 站、气象站分布图

Fig.1 The study area and the distribution map of CORS stations and weather stations

1.2 数据源及预处理

1) 本文使用的 MODIS 来源于 LAADS DAAC 官网 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), 分别为 8 d 合成、1 km 分辨率的

MOD11A2 地表温度产品和 16 d 合成、1 km 分辨率的 MOD13A2 植被指数产品,时间范围为 2016 年—2020 年的 1—5 月(本文将 1—5 月称为春季)。利用 MRT 软件分别对目标数据(NDVI、LST)批量提取、拼接和重投影,格式转换,然后用云南省行政区划边界进行掩模裁剪,并同时 NDVI 和 LST 进行 S-G 滤波^[13]以消除噪音影响,且利用最大值合成^[14]法合成为月、春季数据。

2) 本文使用的 GNSS 数据及气象数据由中国气象局气象探测中心提供,站点主要包含云南省的 35 个连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)及 127 个气象站,空间分布如图 1。该数据主要包含温度、相对湿度、PWV、降雨量、气压等。

2 研究方法

2.1 温度植被干旱指数

TVDI 最早由 Sandholt^[15]提出,该指数主要考虑了 2 个描述土壤表层特征的重要参数,即地表温度(LST)和归一化植被指数(NDVI)。当研究区植被覆盖情况为完全裸土到完全覆盖时,土壤湿度则由重旱到湿润,理论上,此时 NDVI 与 LST 构建的特征空间呈梯形^[16],如图 2。

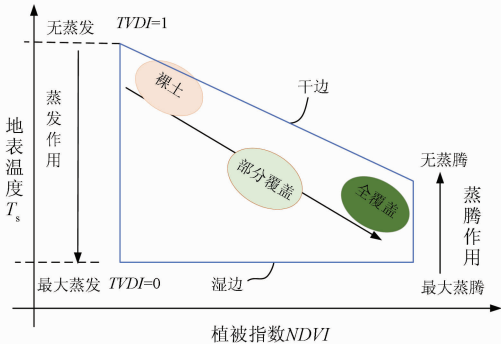


图 2 T_s - NDVI 特征空间

Fig.2 The T_s - NDVI feature space

通过 NDVI 和 LST 可构建 TVDI^[17],其关系可表示为:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}, \tag{1}$$

式中: LST 为地表温度; LST_{max} 为在 NDVI 值下的最高温度值,即特征空间的干边; LST_{min} 为在相同的 NDVI 下的最低温度值,即特征空间的湿边; TVDI 值域范围为(0,1),TVDI 越趋向于 0,表示土壤湿度越高,植被的蒸散作用增强,使得地表温度下降,TVDI 越趋向于 1,表示土壤湿度越低,植被蒸散作用降低,

地表温度升高。通过线性拟合可得其干、湿边方程：

$$\begin{aligned} LST_{\max} &= a_1 + b_1 \times NDVI \\ LST_{\min} &= a_2 + b_2 \times NDVI \end{aligned} \quad (2)$$

式中： a_1, b_1, a_2, b_2 分别为干、湿边方程的拟合系数。

2.2 GNSS PWV 反演计算

GNSS 卫星发射的信号在穿过大气层时,由于

$$ZTD = 10^{-6} \times k_1 \times R_d \int_{H_0}^H \rho dh + 10^6 \int_{H_0}^H (k_2 \times \frac{P_w}{T} \times Z_w^{-1} + k_3 \times \frac{P_w}{T_2} \times Z_w^{-1}) dh \quad , \quad (3)$$

式中： k_1, k_2, k_3 分别为大气折射常数； R_d 为干空气气体常数； ρ 为干空气总质量密度； P_w 和 Z_w 分别为水汽局部气压和可压缩系数； H 和 H_0 分别为对流层顶层高度及站点高度。式(3)等式右侧两项分别表示 ZHD 和 ZWD ,其中 ZHD 可通过站点信息及地面气压求得^[18],公式为：

$$ZHD = [(2.279 \pm 0.0024)] \times \frac{P_0}{f(\varphi, H)} \quad , \quad (4)$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028H \quad . \quad (5)$$

式(4)为解算 ZHD 的常用模型, Saastamonien 模型。式中： P_0 为测站地面气压,单位为 hPa； φ 为测站地理纬度； H 为测站点海拔,单位为 km。由于气压测量精度较高,该模型所估算的 ZHD 可达 mm 级精度^[19]。计算公式为：

$$\begin{aligned} PWV &= \frac{\Pi}{\rho_w} \times ZWD \\ \Pi &= \frac{10^5}{R[(\kappa/T_m) + \kappa']} \end{aligned} \quad , \quad (6)$$

式中： ρ_w 为水密度； $R = 461(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ； $\kappa = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5(\text{K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1})$ ； $\kappa' = 16.48(\text{K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1})$ ； T_m 为大气加权平均温度； Π 为无量纲水汽转换系数,仅与大气加权平均温度 T_m 有关,常用取值范围为 $6.0 \sim 6.5$ ^[20]。

2.3 相关性分析

由中国气象局气象探测中心提供的云南省的 35 个 CORS 站数据和 128 个气象站点数据,包括降雨量、温度、 PWV 、相对湿度。借助 Pearson 相关系数分析 $TVDI$ 与 PWV 、降雨量、温度及相对湿度的之间的相关关系。公式可表示为：

电离层和对流层的影响,产生信号延迟,记为大气总延迟(zenith total delay, ZTD)。 ZTD 由电离层延迟和对流层延迟组成,其中电离层折射引起的延迟可通过双频接收机消除 99% 的影响^[9]；对流层延迟主要有静力延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)和湿延迟(zenith wet delay, ZWD),即 $ZWD = ZTD - ZHD$, ZTD 计算公式为：

$$R = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad , \quad (7)$$

式中： R 表示 Pearson 相关系数； N 代表样本个数； x_i, y_i 分别表示 $TVDI$ 和气象因子； R 取值范围为 $[-1, 1]$, $|R|$ 值越大相关性越强。当 $R < 0$ 时,表示两变量呈负相关关系,反之则表示为正相关, $R = 0$ 时表示两变量之间不相关。

3 结果与分析

3.1 温度植被干旱指数反演

由于植被覆盖度过低或者过高,均会对监测结果产生影响。过低时, $NDVI$ 难以显示区域的真实植被覆盖情况；过高时,植被达到过饱和,生长缓慢。因此,本文 $NDVI$ 取 $0.2 \sim 0.8$,以 0.01 为步长,计算每个 $NDVI$ 像元对应的最大、最小地表温度,然后对每期特征空间的干、湿边进行拟合,便可得到 $T_s - NDVI$ 特征空间,如图 3,拟合结果见表 1,最后将拟合方程代入式(1)即可求得每个像元的 $TVDI$ 。

根据图 3 可知,2016—2020 年每 1—5 月特征空间都具有相似的梯形形状,干、湿边都具有相同的变化趋势,其中地表温度最大/最小值随着 $NDVI$ 的增大而减小/增大；由表 1 可知, $LST_{\max}$ 与 $NDVI$ 呈负相关,且干边拟合较好,拟合系数基本均高达 0.8,但是每年 1 月,拟合系数较小,呈现弱相关性,根据孙丽等的研究^[21]可知,这主要是由于植物 1 月份生长期缓慢,影响了 $NDVI$ 的真值。

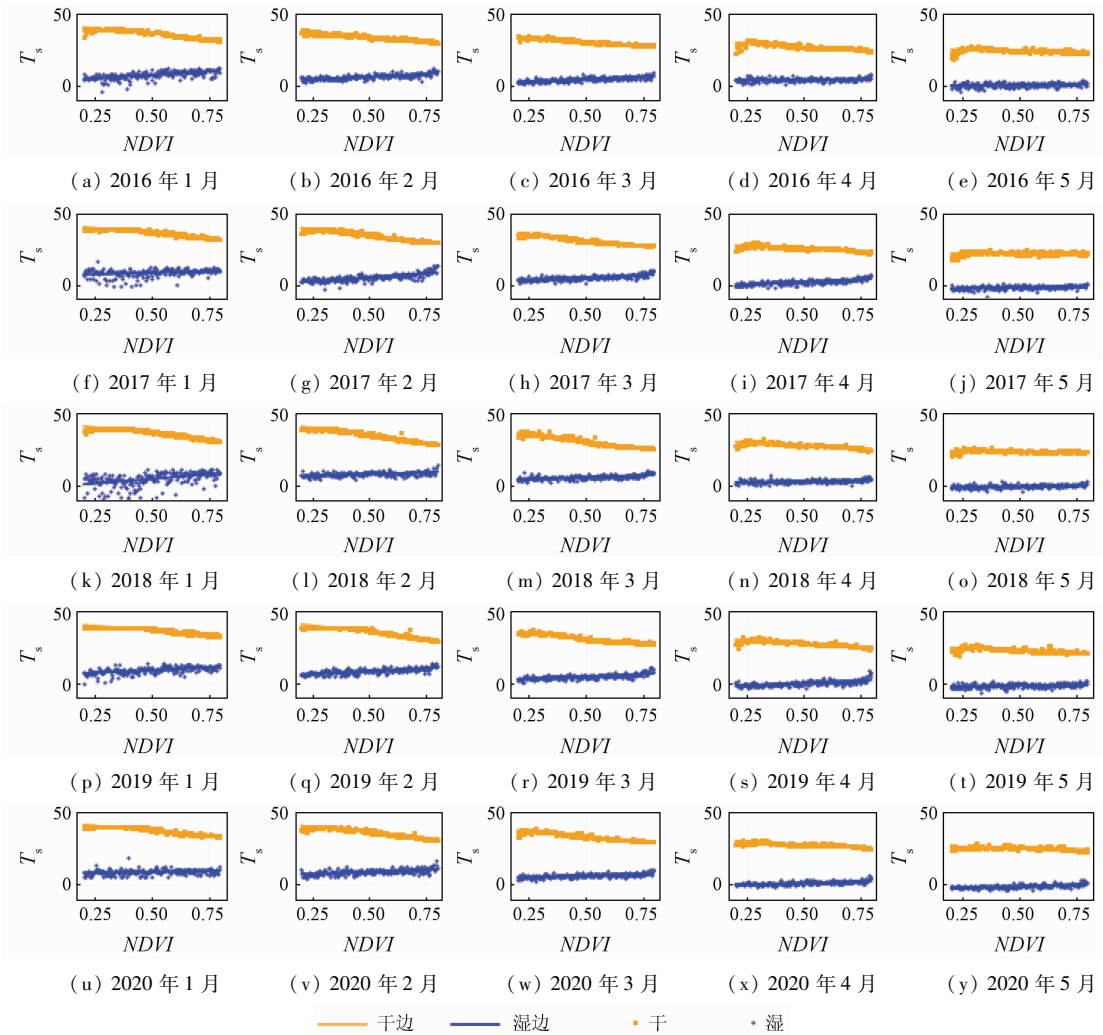


图3 T_s-NDVI 特征空间拟合图(2016—2020 年)

Fig.3 Fitting diagram of T_s-NDVI feature space(2016—2020)

表 1 特征空间干湿边拟合方程及相关系数 (2016—2020)

Tab.1 The fitting equation and correlation coefficient of dry and wet edge in characteristic space (2016—2020)

日期	干边	R^2	湿边	R^2
2016 年 1 月	$y=0.69x+22.42$	0.01	$y=2.93x-2.59$	0.17
2016 年 2 月	$y=-6.73x+29.48$	0.58	$y=7.34x-1.03$	0.56
2016 年 3 月	$y=-14.94x+39.20$	0.92	$y=6.77x+2.32$	0.49
2016 年 4 月	$y=-17.03x+43.78$	0.90	$y=11.22x+0.27$	0.56
2016 年 5 月	$y=-12.76x+43.45$	0.86	$y=4.96x+6.53$	0.09
2017 年 1 月	$y=-14.21x+43.78$	0.11	$y=2.12x-0.17$	0.07
2017 年 2 月	$y=-8.40x+31.79$	0.57	$y=1.56x+3.82$	0.05
2017 年 3 月	$y=-10.56x+36.34$	0.89	$y=6.50x+1.61$	0.51
2017 年 4 月	$y=-11.29x+39.89$	0.87	$y=7.41x+2.98$	0.50
2017 年 5 月	$y=-14.21x+43.81$	0.83	$y=9.76x+2.95$	0.39
2018 年 1 月	$y=-1.42x+24.63$	0.07	$y=2.59x-1.71$	0.14
2018 年 2 月	$y=-8.25x+32.20$	0.72	$y=2.5x+1.76$	0.13
2018 年 3 月	$y=-19.6x+40.82$	0.91	$y=5.07x+3.36$	0.35
2018 年 4 月	$y=-20.2x+45.22$	0.93	$y=3.97x+6.08$	0.22
2018 年 5 月	$y=-15.61x+44.51$	0.86	$y=12.73x-1.81$	0.21
2019 年 1 月	$y=-5.53x+26.78$	0.39	$y=2.53x-1.94$	0.10
2019 年 2 月	$y=-8.59x+32.99$	0.71	$y=6.97x-2.49$	0.41
2019 年 3 月	$y=-14.72x+39.55$	0.89	$y=6.91x+2.167$	0.47
2019 年 4 月	$y=-17.29x+45.31$	0.88	$y=7.77x+5.54$	0.49

(续表)

日期	干边	R^2	湿边	R^2
2019 年 5 月	$y=-11.42x+43.64$	0.84	$y=7.89x+6.11$	0.33
2020 年 1 月	$y=-2.94x+26.43$	0.24	$y=4.27x-3.59$	0.35
2020 年 2 月	$y=-6.15x+30.65$	0.65	$y=4.28x-1.34$	0.35
2020 年 3 月	$y=-13.8x+40.16$	0.87	$y=4.75x+3.57$	0.36
2020 年 4 月	$y=-15.41x+43.68$	0.87	$y=6.05x+5.49$	0.31
2020 年 5 月	$y=-13.14x+43.93$	0.87	$y=2.32x+7.29$	0.05

3.2 TVDI 与 PWV 相关性分析

在关于 TVDI 和 PWV 的相关性分析方面,主要从时间和空间上做具体分析。其中在时间上表现在季尺度、月尺度和日尺度。在季尺度上,TVDI 与 PWV 相关性较高,相关系数基本均大于 0.5;在月尺度上,对研究区内各个时期的 TVDI 和 PWV 的月均值做统计分析。结果如图 4 所示,TVDI 与 PWV 月值具有一致变化规律,每年特征表现呈先上升后下降趋势,分别于 3,4 月达到峰值,造成这一现象的原因可能在于该时间段内高温少雨,空气中 PWV 含量较低导致 PWV 变化较小,此外在 2020 年 2—5 月出现了步调相反的变化趋势,这与统计资料显示的

2020 年特大春旱情况相符合;在日尺度上,由于 PWV 与降雨量具有较强的瞬时性,月均值难以表现 PWV 变化的细节特征,因此选取并计算了云南墨江(YNMJ)站 PWV 与降雨量的逐日值进行分析,如图 5,在逐日的时间序列中,每次降雨必然会伴随着 PWV 的陡然上升和下降的趋势,此时 $TVDI$ 也有一定程度的降低,当降雨较少或者不降雨时, $TVDI$ 又逐渐增大,表明 PWV 的变化具有一定的干旱特征信号^[22]。在空间上,通过对两者进行 Pearson 相关性分析,结果见表 2, PWV 与 $TVDI$ 之间具有较强的相关性,表现出相似的空间分布特征。

表 2 $TVDI$ 与 PWV 相关性系数(2016—2020)

Tab.2 Correlation coefficient between $TVDI$ and PWV (2016—2020)	
时间	相关系数
2016 年	0.73
2017 年	0.70
2018 年	0.73
2019 年	0.50
2020 年	0.30

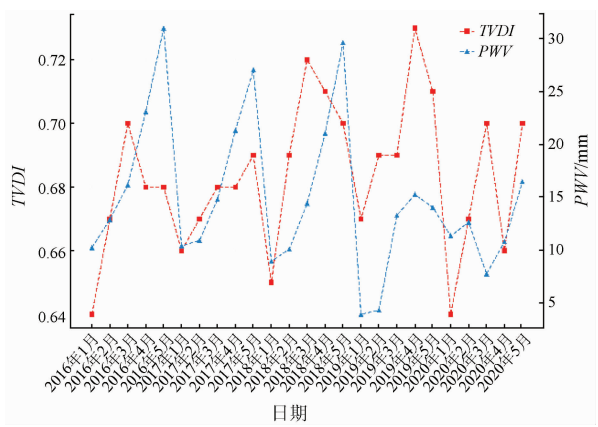


图 4 PWV 与 $TVDI$ 变化趋势图(2016—2020)

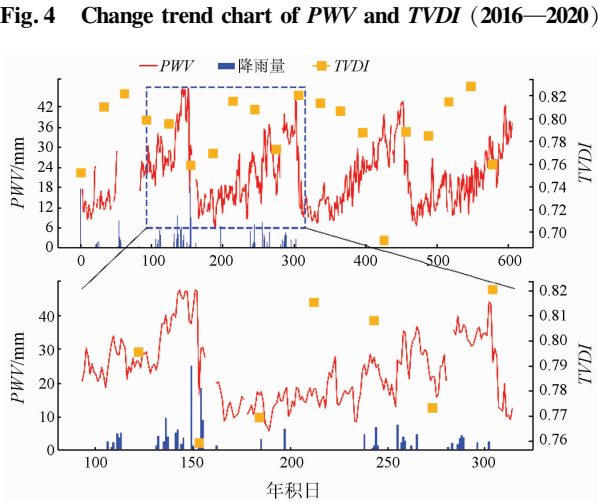


图 5 云南墨江(YNMJ)站 $TVDI$ 、降雨量、 PWV 变化趋势图
Fig.5 Change trend chart of $TVDI$, rainfall and PWV of YNMJ Station

3.3 干旱时空特征分析

根据前文计算的 $TVDI$,采用齐述华等^[23] 对全国旱情监测的等级划分法对其进行等级划分,分为湿润、正常、轻旱、中旱及重旱 5 个等级,由此便获得云南省干旱等级分布图。如图 6,在时间上,2016—2020 年 5 a 间,旱情变化趋势一致,旱情程度逐月上升,在每年 1,2 月相对缓和,但在 3,4 月均较为严重,且均主要分布在滇南、滇西南地区,在 5 月有缓和趋势,主要是由于由春入夏,雨量相对增多,因此旱情有所缓解。年际间,每年旱情均表现出一定程度的春旱,这与曹影等^[24] 的研究结果具有一致的特征。

在空间上,根据云南省区域特征将云南行政区域划分为滇中、滇东北、滇东、滇东南、滇南、滇西南、滇西、滇西北,并利用 Python,以上述为矢量范围掩模,对 $TVDI$ 进行分幅裁剪,以获取各区域 $TVDI$ 分布情况,然后对每个区域轻旱、中旱及重旱面积进行统计。从图 7 可以看出云南省在 2016—2020 年各区域干旱面积占比及空间分布特点,大部分地区均以中旱为主,尤其是滇中、滇东地区,中旱面积分别高达 68% 和 80%,滇东北主要以轻旱为主,且轻旱面积逐年上升,滇西南、滇东南地区主要以重旱为主,其中滇西南重旱面积有逐年上升趋势,2020 年高达 63.64%,滇东南呈现逐渐下降趋势,由 2016 年的 65.43% 降低到 2020 年的 26.13%。

3.4 $TVDI$, PWV 与气象因子的关系

为了进一步研究温度、相对湿度等气象因子与植被干旱指数和 PWV 之间的关系,本文计算并提取了云南省 2016—2020 年 1—5 月各 CORS 站的温度、相对湿度及 PWV ,观察其时间序列变化特点。结果显示:如图 8 所示,1,2 月温度约以 $0.48^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、 $0.32^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速度上升。同时以 CORS 站为中心,计算其周围 3 像元 $\times$ 3 像元范围内的 $TVDI$ 值。最后将各 $TVDI$ 值、 PWV 值分别与温度、

表 3 干旱等级级

Tab.3 Drought grade		
干旱等级	$TVDI$	干旱类型
1	$0.0 < TVDI \leq 0.2$	湿润
2	$0.2 < TVDI \leq 0.4$	正常
3	$0.4 < TVDI \leq 0.6$	轻旱
4	$0.6 < TVDI \leq 0.8$	中旱
5	$0.8 < TVDI \leq 1.0$	重旱

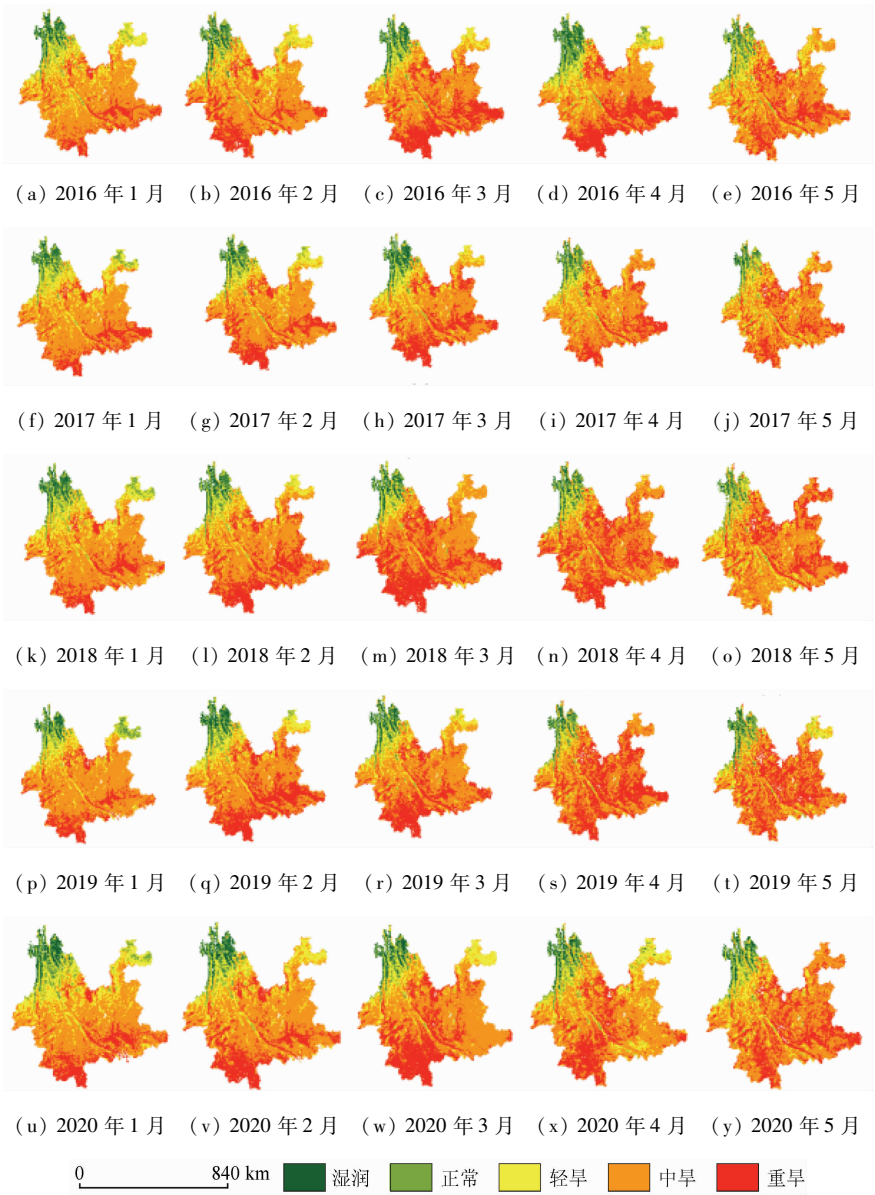


图 6 2016—2020 年春季旱情分布图

Fig. 6 Distribution map of spring drought from 2016 to 2020

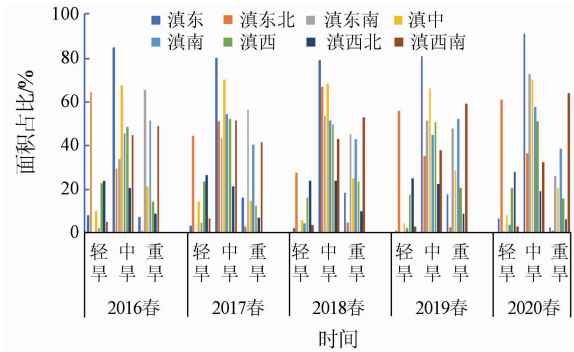


图 7 云南省各区轻旱、中旱及重旱面积占比

Fig. 7 The proportion of light drought, medium drought and severe drought in Yunnan Province

相对湿度进行 Pearson 相关性分析,分析结果如图 9, *TVDI*, *PWV* 均与温度呈现正相关关系,相关系数高达 0.85,且通过了 $P < 0.01$ 显著性检验,但与相

对湿度呈弱相关或不相关,这表明温度与 *TVDI* 和 *PWV* 密切相关,可作为干旱的重要评价因子。

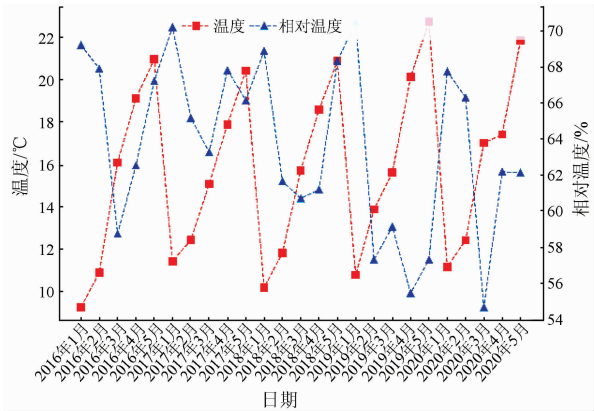


图 8 温度、相对湿度变化趋势

Fig. 8 Trend of temperature and relative humidity

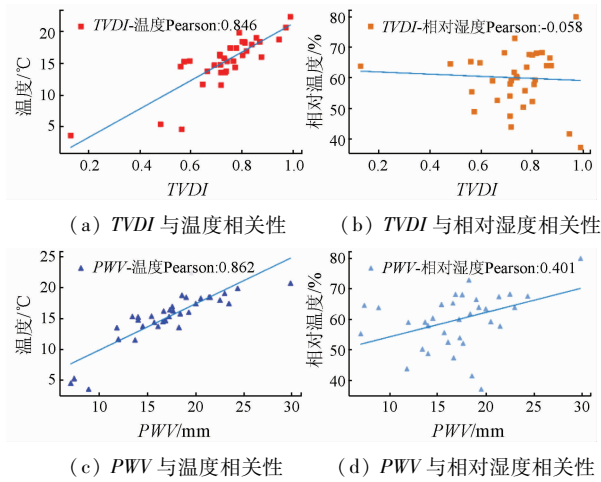


图 9 TVDI 与温度、相对湿度、PWV 与温度、相对湿度相关性

Fig. 9 The correlation between TVDI and temperature, relative humidity, PWV and temperature, relative humidity

4 结 论

针对近几年严峻的干旱形势,本文利用 TVDI 分析了云南省 2016—2020 年春季的干旱特征时空变化,同时通过均匀分布在云南省的 35 个 CORS 站解算各站点 PWV,并利用 TVDI 验证了 PWV 在干旱监测中的适用性,得出以下结论:

1) TVDI 能较好地监测干旱情况,在云南省具有较好的适用性。由于区域性不均匀降水导致云南省干旱常年呈滇西北向滇东南增强趋势,主要集中在滇中、滇东、滇东南、滇南地区;由于时间性不均匀降水导致云南省干旱主要以冬旱、春旱为主,季内旱情呈先递增后减缓趋势,尤其 3—4 月份旱情变化特征最为明显,年间旱情呈波动变化特点,没有出现明显减少或增加的趋势。

2) GNSS PWV 在干旱监测领域中具有一定潜力。基于 Pearson 相关分析发现 PWV 和 TVDI 存在较强的相关性,在季尺度上,相关系数基本均大于 0.5;在月尺度上,PWV 变化趋势与 TVDI 变化趋势基本一致,但 TVDI 变化有一定的时间延迟;在日尺度上,尤其时降雨时期,PWV 变化和 TVDI 变化幅度契合度更高,表现出了一定的干旱特征信号,因此 PWV 为旱灾监测提供了一种新的技术手段。

本研究结果较好地反映了云南省近 5 a 的干旱演变特征,为防灾减灾提供了理论依据,有一定的参考价值。同时验证了 GNSS PWV 在干旱响应上具有一定潜力,但本文仅做了一些定性分析,对于 GNSS PWV 在干旱监测中的量化分析还需深入研究。

参考文献 (References):

[1] 余航,王龙,文俊,等. 云南省 500 年干旱灾害时空分布研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(12):38–44.
Yu H, Wang L, Wen J, et al. Study on spatial and temporal distribution of drought disaster in 500 years in Yunnan Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 38–44.

[2] 李新尧,杨联安,聂红梅,等. 基于植被状态指数的陕西省农业干旱时空动态[J]. 生态学杂志,2018,37(4):1172–1180.
Li X Y, Yang L A, Nie H M, et al. Assessment of temporal and spatial dynamics of agricultural drought in Shaanxi Province based on vegetation condition index[J]. Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1172–1180.

[3] 赵杰鹏,张显峰,廖春华,等. 基于 TVDI 的大范围干旱区土壤水分遥感反演模型研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(6):742–750.
Zhao J P, Zhang X F, Liao C H, et al. TVDI based soil moisture retrieval from remotely sensed data over large arid areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 742–750.

[4] 沙莎,郭锐,李耀辉,等. 温度植被干旱指数(TVDI)在陇东土壤水分监测中的适用性[J]. 中国沙漠,2017,37(1):132–139.
Sha S, Guo N, Li Y H, et al. Applicability of TVDI in monitoring drought in Longdong area of Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 132–139.

[5] 王美林,姜群鹤,邵雅琪,等. 基于 TVDI 的玛曲土壤湿度时空变化及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2019,17(4):141–152.
Wang M L, Jiang Q O, Shao Y Q, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture and analysis on its influencing factors in Maqu county based on TVDI[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 141–152.

[6] 刘英,岳辉,侯恩科. MODIS 数据在陕西省干旱监测中的应用[J]. 国土资源遥感,2019,31(2):172–179. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 24.
Liu Y, Yue H, Hou E K. Drought monitoring based on MODIS in Shaanxi[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(2): 172–179. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 02. 24.

[7] 黄振,李万彪,梁军. GPS 遥感大气可降水量在降水天气过程分析中的应用[J]. 气象与环境学报,2013,29(4):31–36.
Huang Z, Li W B, Liang J. Application of precipitable water vapor from ground based GPS data to analysis of precipitation weather process[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(4): 31–36.

[8] 金鑫,施昆,陈云波,等. GPS 可降水汽含量在强降雨过程中的特征分析[J]. 全球定位系统,2018,43(2):69–75.
Jin X, Shi K, Chen Y B, et al. Analysis on the characteristics of GPS precipitable water vapor during heavy rainfall[J]. GNSS World of China, 2018, 43(2): 69–75.

[9] 刘盼,刘智敏,张明敏,等. 不同 IGS 星历产品对地基 GPS 反演水汽的影响[J]. 测绘科学,2018,43(12):17–22.
Liu P, Liu Z M, Zhang M M, et al. Influence of different IGS ephemeris products on GPS of precipitable water vapor inversion[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(12): 17–22.

- [10] 韩辉邦,张小军,张博越,等. 柴达木盆地 GPS 大气可降水量精度检验及其变化特征[J]. 干旱气象,2020,38(1):50–57.
Han H B, Zhang X J, Zhang B Y, et al. Accuracy test of precipitable water vapor retrieved by GPS data and its variation characteristics in Qaidam Basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1):50–57.
- [11] F Alshawaf, F Zus, K Balidakis, et al. On the statistical significance of climatic trends estimated from GPS tropospheric time series[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(19):10967–10990.
- [12] Wang X M, Zhang K F, Wu S Q, et al. The correlation between GNSS-derived precipitable water vapor and sea surface temperature and its responses to El Niño – Southern oscillation[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 2(16):1–12.
- [13] 胡顺石,黄春晓,杨斌,等. 自适应加权 Savitzky – Golay 滤波重构 MODIS 植被指数时间序列[J]. 测绘科学, 2020, 45(4):105–116.
Hu S S, Huang C X, Yang B, et al. Reconstruction of MODIS vegetation index time series by adaptive weighted Savitzky – Golay filter [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(4):105–116.
- [14] 吕凯,吕成文,乔天,等. 地表温度合成方式对 TVDI 预测精度影响[J]. 遥感信息, 2019, 34(2):91–97.
Lyu K, Lyu C W, Qiao T, et al. Effect of LST synthesis methods on prediction accuracy of TVDI [J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(2):91–97.
- [15] 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.
- [16] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5):940–948.
- [17] Nemani R, L Pierce, S Running, et al. Developing satellite – derived estimates of surface moisture status[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1993, 32(3):548–557.
- [18] Michael B, Steven B, Thomas A H, et al. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1992, 97(D14):15787–15801.
- [19] 李黎,田莹,袁志敏,等. 暴雨期间 GNSS 遥感气象要素的时序变化[J]. 测绘科学, 2016, 41(10):82–87.
Li L, Tian Y, Yuan Z M, et al. Time series changes of GNSS remote sensing meteorological elements during rainstorms [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(10):82–87.
- [20] 侯建国,杨成生,张勤,等. GPS 可降水汽与 MODIS 可降水汽回归性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2):42–45, 113.
Hou J G, Yang C S, Zhang Q, et al. Regression analysis between GPS PWV and MODIS PWV [J]. Geography and Geo – Information Science, 2010, 26(2):42–45, 113.
- [21] 孙丽,吴全,裴志远,等. 温度植被干旱指数(TVDI)与多因子关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2):31–34, 88.
Sun L, Wu Q, Pei Z Y, et al. Study on the correlation between temperature vegetation dryness index (TVDI) and various factors [J]. Geography and Geo – Information Science, 2010, 26(2):31–34, 88.
- [22] 马雄伟,赵庆志,姚顽强,等. PWV 对全球气候变化的响应研究[J]. 测绘通报, 2019, 65(8):54–59.
Ma X W, Zhao Q Z, Yao W Q, et al. PWV response to global climate change [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019, 65(8):54–59.
- [23] 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, 18(5):420–427, 436.
Qi S H, Wang C Y, Niu Z. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 18(5):420–427, 436.
- [24] 曹影,胡文庆,颜培东. 基于温度植被干旱指数(TVDI)的云南干旱遥感监测[J]. 工程勘察, 2016, 44(1):69–73.
Cao Y, Hu W Q, Yan P D. Remote sensing monitoring of the drought based on temperature vegetation dryness index in Yunnan Province [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(1):69–73.

Spatial – temporal analysis of drought characteristics of Yunnan Province based on MODIS_TVDI/GNSS_PWV data

YU Wei¹, KE Fuyang¹, CAO Yunchang²

(1. School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Existing drought monitoring technologies are liable to be affected by the environment and suffer poor timeliness. Given this, this study utilized the MODIS_TVDI and GNSS_PWV data to investigate the spatial – temporal changes in the drought characteristics in spring from 2016 to 2020 in Yunnan province through correlation analysis and regression analysis. The research results are as follows. The TVDI inversion results can accurately reflect the spatial – temporal changes in the regional drought characteristics during 2016–2020. In space, the drought showed the trend of increasing from northwest to southeast in Yunnan. In terms of time, the drought

increased first and then alleviated in spring, especially from March to April. In addition, there was a strong correlation between PWV and TVDI according to Pearson correlation analysis. The correlation coefficient was largely greater than 0.5 on a quarterly scale. On a monthly scale, the variation trend of PWV was roughly consistent with that of TVDI, except that the variation of TVDI showed a certain time delay. On a daily scale, the variation amplitude of PWV was highly consistent with that of TVDI, especially during rainfall, and both of them showed certain signals of drought characteristics. Therefore, PWV can serve as a new technical means for drought monitoring.

Keywords: temperature vegetation drought index; precipitable water vapor; correlation analysis; Yunnan Province
(责任编辑: 李 瑜)