

基于 TVDI 的横断山区干旱时空演变特征及影响因子研究*

吕胤锋¹⁾ 周佳怡¹⁾ 孙鹏^{1)†} 张强²⁾ 马梓策¹⁾ 邹逸凡¹⁾ 卞耀劲¹⁾ 刘瑞琳¹⁾

(1)安徽师范大学地理与旅游学院, 241002, 安徽芜湖;

(2)北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 100875, 北京)

摘要 以横断山区为研究区, 通过对比 2001—2019 年基于 MODIS 获取增强型植被指数(EVI)和归一化差分植被指数(NDVI)反演的温度植被干旱指数(TVDI_N、TVDI_E)及潜在蒸散量(PET)和实际蒸散量(ET)反演的作物缺水指数(CWSI), 与土壤含水量进行相关性分析, 选择适用于横断山区干旱监测指标, 采用 Mann-Kendall 检验等统计方法研究干旱的时空变化特征, 并分析干旱在不同土地类型、海拔和气象要素影响下的空间演变特征。研究结果表明: 1) 基于 EVI 反演的 TVDI_E 与土壤含水量相关性最高, 更适合于监测横断山区的干旱情况。2) TVDI_E 监测结果表明横断山区近 19 年来干旱变化情况整体呈下降趋势, 空间分布呈现南高北低的变化趋势, 严重干旱主要集中在攀枝花市附近及湿热地带; 北部则集中于三江流域(澜沧江、怒江、金沙江)附近及红原草原地区; 干旱程度最严重的阶段是夏季, 由春季逐渐向夏季过渡期阶段干旱面积明显增加。3) 随海拔的增加, 耕地分布多集中于海拔 < 3 000 m 的地区, 林地分布海拔为 1 000~5 000 m 的地区, 草地主要生长于海拔 > 5 000 m 的地区; 19 年来耕地、林地和草地中 TVDI_E 总体呈减弱趋势, 但处在高原过渡带及干热河谷周围的植被的干旱呈增加趋势。在生长季缺水期时, 南部地区的植被、高原过渡带林地和北部高原的草地受干旱影响严重。4) TVDI_E 与日照时间的正相关性最高, 与相对湿度的负相关性最高。气象因子对春初和秋末的 TVDI_E 复合作用最强, 大部分区域呈现显著正相关。

关键词 温度植被干旱指数; 时空特征; 土地利用; 气象因子; 复相关分析; 横断山区

中图分类号 P426.616

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021301

0 引言

干旱是一种严重的环境灾害, 会导致土壤退化、荒漠化、缺水、植物死亡、沙尘暴、火灾等灾害现象^[1], 受到国内外诸多学者的关注。此外, 干旱也影响农作物生长, 影响全球粮食价格, 并可能导致政治动荡^[2]。因此, 对于干旱进行监测和时空动态研究, 对于提高农业生产、保护环境、促进社会经济可持续发展具有重要意义。

传统的干旱监测是利用气象和水文观测站获得气象和水文数据, 但常规的地面观测数据也存在很多无法避免的问题, 例如观测站点的分布不均, 这会导致在高原地区的单点资料无法准确代表周围大面积范围的真实状况^[3]。卫星遥感数据将传统“点”的测量扩展为“面”的信息, 提供了降水、土壤水分、蒸散

量、植被的生理生态状况、地表热状况等多个与干旱发展过程相关的参数。近几年, 卫星遥感监测干旱技术随着全球对地观测技术的迅速发展取得了极大的进步, 多种遥感干旱监测模型及多个遥感干旱指数应运而生, 在各国干旱监测应用中效果显著, 是全球抗旱减灾中必不可少的手段^[4]。

现在全球变化研究的主体内容之一便是植被变化与气候变化的相互关系, 此外, 植被对气候变化的响应存在滞后性^[5]。归一化植被指数(NDVI)是目前使用最广泛的植被指数, 是表征植被特征的重要手段。利用 NDVI 序列已在多种植被类型和气候带开展植被与气候相关性研究^[6], 但 NDVI 因大气噪声、土壤背景、饱和度等问题存在一定的缺陷。增强型植被指数(EVI)继承了 NDVI 的优点并对其缺点进行了改进, 国内外学者开展了一系列的 NDVI 和 EVI 比较研

* 安徽省自然科学基金优秀资助项目(2108085Y13); 安徽省重点研究与开发计划资助项目(2022m07020011, 202104g01020004, 2021003); 安徽高校协同创新资助项目(GXXT-2021-048); 安徽省科技重大专项资助项目(202003a06020002); 高校优秀青年人才支持计划重点资助项目(gxyqZD2021094)

† 通信作者: 孙鹏(1986—), 男, 博士, 教授。研究方向: 气象水文学和遥感水文学。E-mail: sun68peng@163.com

收稿日期: 2021-11-20

究。陈燕丽等^[7]以喀斯特地区为研究载体, 分析 NDVI 及 EVI 同气候因子的关系, 结果表明 2 种植被指数与多数气候因子显著相关, 但二者对气候因子的响应有明显差异。除日照外, EVI 与其他各气候因子相关性明显高于 NDVI。Xia 等^[8]通过考察 2 种植被指数对气候因子的响应, 研究不同时间尺度下气候-植被受气象站数据的相互作用, 结果表明, 2 种植被指数同气候因子的响应存在显著不同。EVI 只在平均最低温度、平均水汽压、极端风速和最大风速上有滞后。NDVI 对平均最低温度、平均温度、平均水汽压、最小相对湿度、极端风速、最大风速和平均风速的响应存在滞后效应^[9]。

青藏高原地区温度变幅及降水变幅普遍较大, 位于其西部的横断山区是典型的气候变化敏感区, 气候类型变化主要是常湿温暖气候和冬季干旱温暖气候之间的变化, 总体呈明显变干趋势, 是干旱的高发区^[10]。Bai^[11]等研究得出, 温度植被干旱指数 (temperature vegetation dryness index, TVDI) 能很好地观测土壤相对湿度, 且适用于植被覆盖度高的地区进行干旱监测。作物水分胁迫指数 (crop water stress index, CWSI) 是基于地表能量平衡原理计算, 不会因研究区所拥有的地表覆盖类型而产生影响。当前对于横断山区的干旱的研究主要从站点观测数据角度出发^[12-13], 大多主要集中在干热河谷的干湿研究^[14-15]。本研究依据中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 所获得的 NDVI、EVI 以及地表温度 (LST) 数据, 利用 TVDI 弥补干旱的时空演变特征因站点分布不均导致的准确性较低的问题。通过土壤水数据验证 TVDI 在横断山区的适用性, 研究横断山区干旱的时空演变规律, 利用土地利用、海拔和干旱指数的变化关系分析, 揭示不同土地类型随海拔升高的空间分布、干旱的变化趋势以及生长季缺水期干旱现象的空间分布; 通过分析气象要素与干旱指数的相关关系, 揭示不同气象要素影响下干旱的空间演变特征。该研究为区域干旱监测预警和防灾减灾提供一定的科学依据。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况 横断山区位于青藏高原东南部, 介于四川、云南 2 省及西藏自治区之间, 区域内主要河流包括澜沧江、金沙江、怒江、大渡河等。在地质构造与地貌上是由一系列南北纵贯、山川相间的山脉与河谷组成, 海拔高差大且由西北向东南递减^[16]。横断山区地跨亚热带和高原温带, 地形复杂, 温差较大; 全年受东南季风、南亚季风及南支西风环流影响, 降水量有明显的季节差异^[17]。

1.2 数据来源 所使用的气象数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>), 选取的时间为 2001—2015 年, 站点选择如图 1 所示; 遥感数据选取 MODIS 产品 MOD11C3 所提供的 LST 数据、MOD11A3 所提供的 NDVI 及 EVI 数据、MOD16A2 所提供的 ET 和 PET 数据 (来源于 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) 以及其他辅助数据资料 (来源于 2019、2020 年青藏科考调研数据、中国科学院资源与环境数据中心) 等, 数据预处理及成图所使用的软件为 ArcGIS10.7、ENVI5.3、IDL 等。此外本文还使用了美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/>) 提供的长时间序列月平均土壤水分数据集, 分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 通过建立 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的渔网后, 采用径向基函数插值法将其重采样为 3 km, 用以评估不同干旱指数对横断山区干旱监测的实用性。通过中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>) 获取横断山区土地利用遥感监测数据。

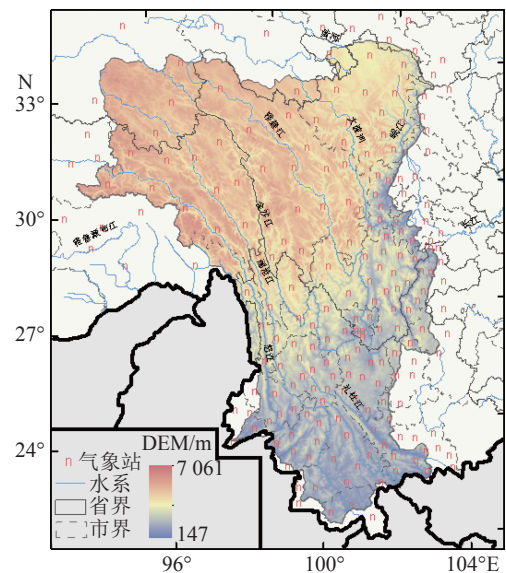


图 1 横断山区海拔

1.3 研究方法

1.3.1 温度植被干旱指数 由于植被蒸腾和土壤水分蒸发能够使地表温度降低, 研究区内裸地及植被覆盖都能通过遥感获取对应数据表示土壤湿度变化, 那么可以利用所得到的植被指数和地表温度构建 Ts-VI 特征空间^[18-20]。SANDHOLT 等^[21]基于 Ts-VI 特征空间, 利用 TVDI 来表示土壤的湿度情况。该指数的取值范围为 (0, 1), 其值越接近于 1, 则该像元越干旱, 越接近于 0, 则该像元越湿润^[22]。干旱监测等级是根据土壤相对湿度的农业干旱等级划分标准制定的^[23],

本研究采用的是齐述华等^[24]制定的适用于干旱半干旱地区的 TVDI 的干旱监测等级,将其划分为无旱(0~0.2)、轻度干旱[0.2~0.4)、中度干旱[0.4~0.6)、严重干旱[0.6~0.8)、特大干旱[0.8~1.0)。

1.3.2 作物水分胁迫指数 潜在蒸散量(PET)表示的是在气象条件达到一定程度,水分供应充足的蒸散,而实际蒸散量(ET)则是指实际气象及水分供应条件下的水分蒸散量,将二者做比计算得出的结果可以当作作物缺水的指标^[25]。Jackson 等^[26]对该指数进行了相关研究,作物水分胁迫指数取值为 0~1,值越大代表区域越干旱缺水,反之越湿润。

1.3.3 Sen+Mann-Kendall 趋势分析 本文采取 Sen 趋势度和 Mann-Kendall 趋势检验相结合的方法,属于非参数检验范畴,该方法基于像元尺度分析遥感影像时间序列的变化趋势及其显著性,可用来判断长时间序列数据的趋势。不需要样本遵从一定的分布,抗噪声能力强,应用范围广^[27-29]。

1.3.4 相关分析 通过对干旱指数与气象因子相关性进行进一步分析研究,线性相关分析的计算公式为

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

式中: R_{xy} 为 x 、 y 影响因子的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别是 x 、 y 影响因子在第 i 年的值(i 为 2001, 2002, ..., 2015); \bar{x} 与 \bar{y} 分别为影响因子 n 年的平均值。

复相关分析实在综合考虑多个相关影响因子的共同作用下,将 2 个或多个影响因子并入计算^[30]。复相关系数的计算式为

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)}, \quad (2)$$

式中: $R_{x,yz}$ 为遥感干旱指数 x 与 2 个气象因子 y 、 z 的复相关系数; R_{xy} 为 x 与 y 的线性相关系数; $R_{xz,y}$ 为 x 、 z 与 y 的偏相关系数。利用经典的 t 检验、 F 检验分别进行复相关系数的显著性检验。

2 结果分析

2.1 基于温度 TVDI 的横断山区旱情监测

2.1.1 对比 TVDI_E、TVDI_N 与 CWSI 对横断山区干旱监测的适用性 结合式(1),基于 EVI-LST 和 NDVI-LST 计算得出 TVDI 值,分别用 TVDI_E 和 TVDI_N 表示,将得到的 TVDI_E、TVDI_N 和 CWSI 数据同土壤含水量数据进行相关性分析,结果如图 2 所示,TVDI_E、TVDI_N 和 CWSI 与土壤水分的相关性的平均值分别为-0.377、-0.371 和-0.309,三者的相关性均值差距较小。由于横断山区地形南北差异大且北部地形变化多样,导致西部的干热河谷地带、东部的峨眉山周围及西北部杂多县等寒冷地区不能很好地反映出干旱情况,TVDI_N 因 NDVI 的自身缺陷,在横断山区东部的高山峡谷区干旱监测效果不理想。综上所述,TVDI_E 对于整个横断山区而言,能够更好地反映土壤水分状况,在全区干旱监测中效果最优。因此本文选择 TVDI_E 来表征横断山区干旱变化。

2.1.2 基于 TVDI_E 的干旱年际时空分布特征 通过 ENVI 中的统计分析,计算 2001—2019 年横断山区多年 TVDI_E 均值的空间分布,然后通过 TVDI 干旱等级划分标准(图 3)。由图 3 的 2001—2019 年横断山区多年 TVDI_E 均值的空间分布可知,横断山区 2001—2019 年来干旱较为严重的地区多集中分布在南部地区,北部的干旱则集中在红原草原及三江地区。横断山区干旱影响程度主要以中度干旱为主,占整个研究区总面积的 34.59%,主要集中在横断山区中部以北的大部分区域;其次是轻度干旱,占整个研究区总面积的 34.09%,主要集中在横断山区西北部、东北部

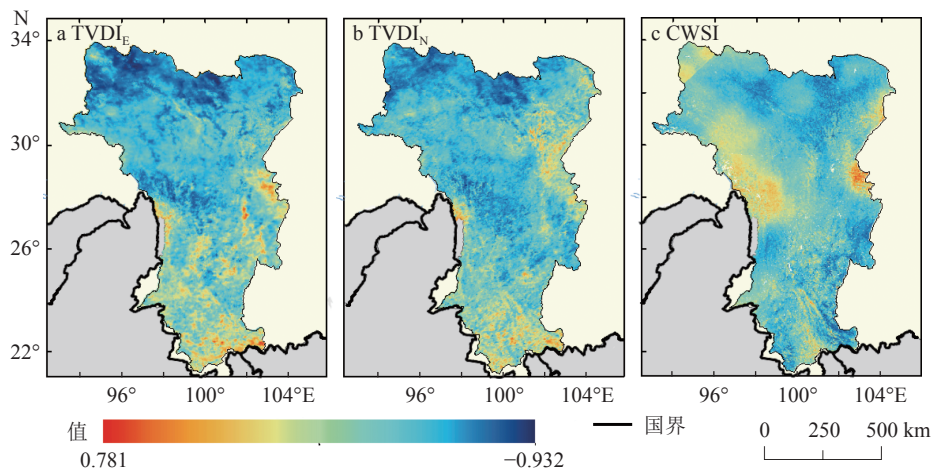


图 2 TVDI_E、TVDI_N、CWSI 与土壤湿度相关性

及西部边缘的大部分地区; 严重干旱所占比例相对较小, 占整个研究区总面积的 23.33%, 主要集中分布在横断山区南部地区; 无旱和特大干旱区域面积占比例

较小, 分别占整个研究区总面积为 1.8% 和 7.19%, 其中无旱地区主要分布在西北部地区, 特大干旱主要集中在南部边缘地区。

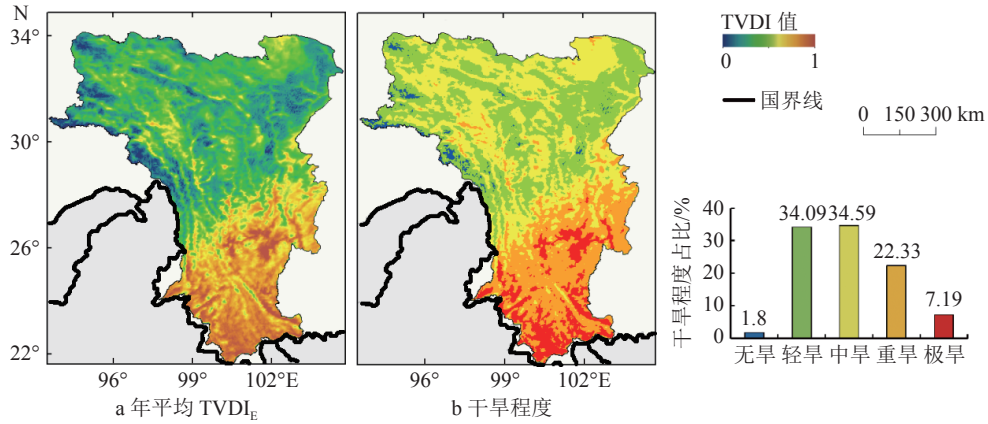


图 3 2001—2019 年横断山区年平均 TVDI_E 及干旱程度

通过趋势分析逐像元计算了 2001—2019 年横断山区的年际变化趋势, 并根据显著性对其进行划分, 共划分为显著减少 ($\text{slope} < 0, P < 0.05$)、不显著减少 ($\text{slope} < 0, 0.05 < P < 0.5$)、无变化 ($P > 0.5$)、不显著增加 ($\text{slope} > 0, 0.05 < P < 0.5$) 和显著增加 ($\text{slope} > 0, P < 0.05$) 等 5 个等级 (图 4)。由图 4 可知, 横断山区北部、东部、东北及西南地区 TVDI_E 的变化速率较小, 2001—2019 年 TVDI_E 变化率为 $-0.0137 \sim 0.0136 (10 \text{ a})^{-1}$, 平均变化率为 $-0.0005 (10 \text{ a})^{-1}$, 表明横断山区干旱减缓速率不明显。但对于不同地区而言, 其 TVDI_E 变化率存在较大的空间差异性, 其中: 中部地区呈现显著增加趋势; 边缘地区干旱程度呈显著下降趋势; 北部、东

部、西南及东北部地区干旱程度无明显变化。

2.1.3 TVDI_E 季节时空变化特征 从季节尺度上看, 在横断山区春季的干旱北部大部分区域呈现不显著上升趋势, 而攀枝花市附近及南部景洪市附近的湿热地带因季节原因, 干旱呈现显著的上升趋势 (图 5-a); 夏季大多数区域的干旱呈现不显著的变化趋势, 只有北部的三江 (澜沧江、怒江、金沙江) 地带、红原草原及南部的湿热地带因温度升高干旱继续呈现不显著的上升趋势 (图 5-b); 秋季干旱整体呈现不显著的下降趋势, 冬季部分地区 (攀枝花市及南部湿热地带), 地貌对温度变化反映强烈, 由不显著至显著上升趋势 (图 5-c、d)。

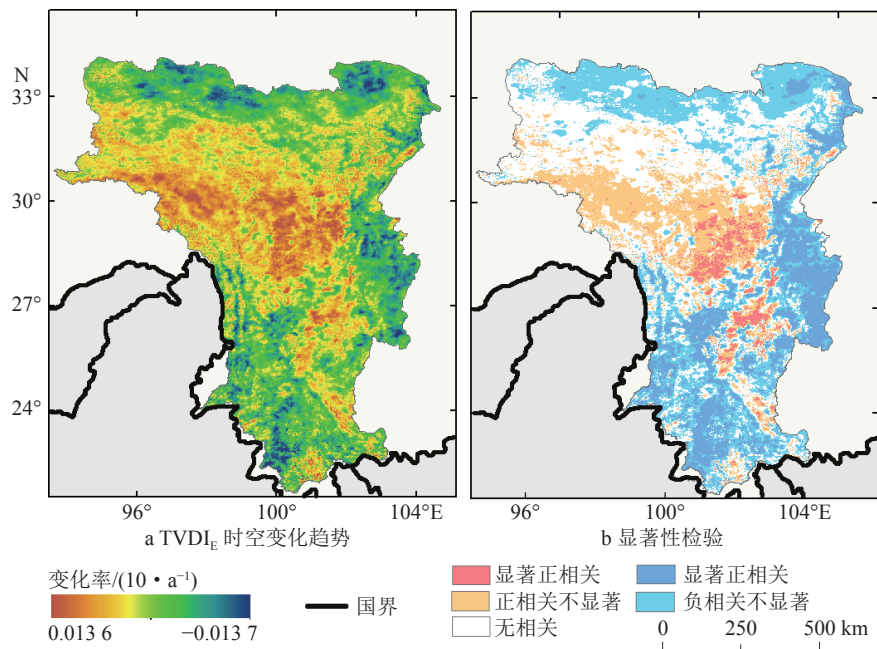


图 4 2001—2019 年横断山区 TVDI_E 时空变化趋势及其显著性检验

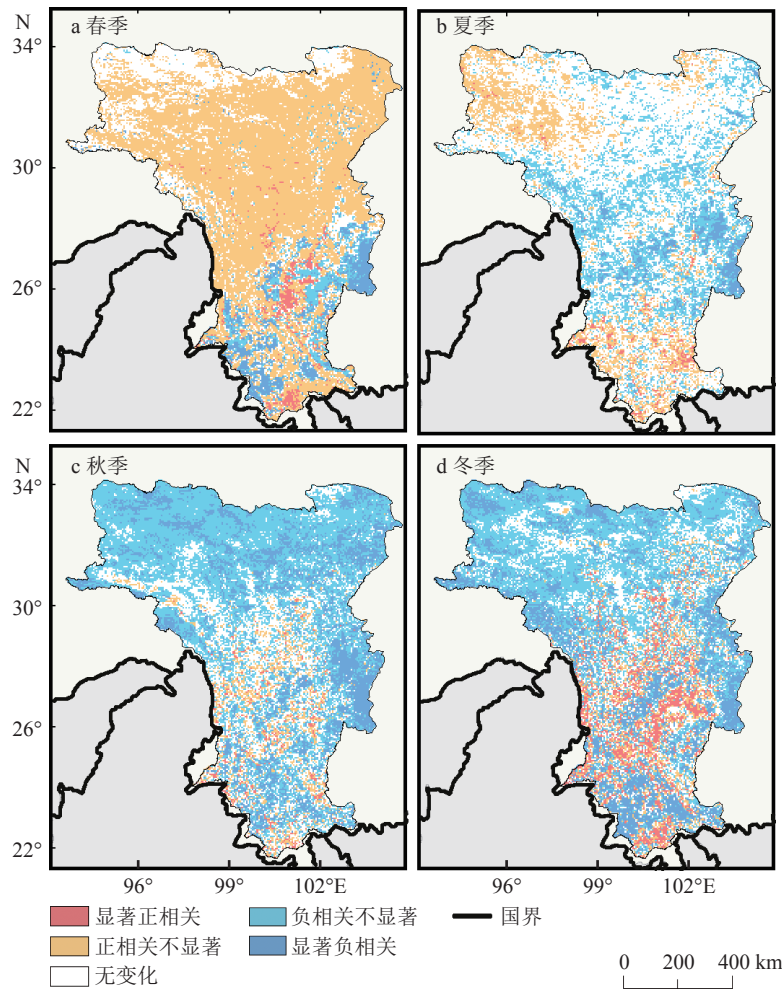


图 5 2001—2019 年季尺度 TVDI_E 变化趋势显著性检验

2.2 干旱变化与土地利用类型的关系

2.2.1 TVDI_E 同高程及不同土地类型的空间变化 为探究 TVDI_E 在不同土地利用类型、不同高程的空间变化,通过土地利用转移矩阵得出横断山区 19 年来的土地利用变化情况(表 1)。由于 TVDI_E 反应的是植被与温度的变化关系,本文只考虑耕地、林地及草地的空间分布,将水系、居民用地及未利用土地划分为其他类型。由表 1 可见,横断山区 19 年来耕地、林地及草地的变化幅度不大,整体不存在过大的改变。

表 1 横断山区土地利用转移矩阵 %

土地利用类型	耕地	林地	草地	其他
耕地	2.58	3.27	1.66	0.24
林地	3.13	28.04	9.12	0.56
草地	1.90	10.41	28.90	2.13
其他	0.14	0.94	3.71	3.27

综上所述,本文以 2010 年横断山区土地利用数据代指横断山区 19 年来整体土地类型空间分布情况,通过提取 3 种土地类型在横断山区的空间分布情

况,结合 19 年来 TVDI_E 构建不同土地利用类型 TVDI_E 变化趋势显著性的空间分布图,并将高程以 1 000 m 为间隔划分为 A~G 7 类,表达 TVDI_E 在不同土地类型随高程的变化关系(图 6)。由表示耕地中 TVDI_E 变化趋势的图 6-a 可知,在耕地中干旱主要呈显著减少趋势,在 1 000~2 000 m 时耕地的空间分布最高,占耕地总面积的 54.8%,随高程的增加,TVDI_E 整体呈逐渐减少的趋势;由图 6-b 可知,横断山区林地干旱变化以显著减少为主,只在中部及中南部的高原过渡带显著增加,林地分布集中于高程 1 000~5 000 m, TVDI_E 随高程的增高而减少;图 6-c 为草地中 TVDI_E 的变化趋势,在横断山区东北部的红原草原、东部边缘低海拔地区,干旱呈显著减少趋势,北部其他平坦地区呈微弱减少趋势,在中部的高原山区地带,干旱的变化趋势呈显著增加,在中西部三江流域附近干旱呈缓慢增加趋势,草地主要分布于高程 4 000~5 000 m 地区,占草地总面积的 54.5%, TVDI_E 随高程的增高而减少。其中横断山区高程 5 000~6 000 m 向高程 >6 000 m 的区域过渡的过程中,耕地、林地及草地 3 种土地类型

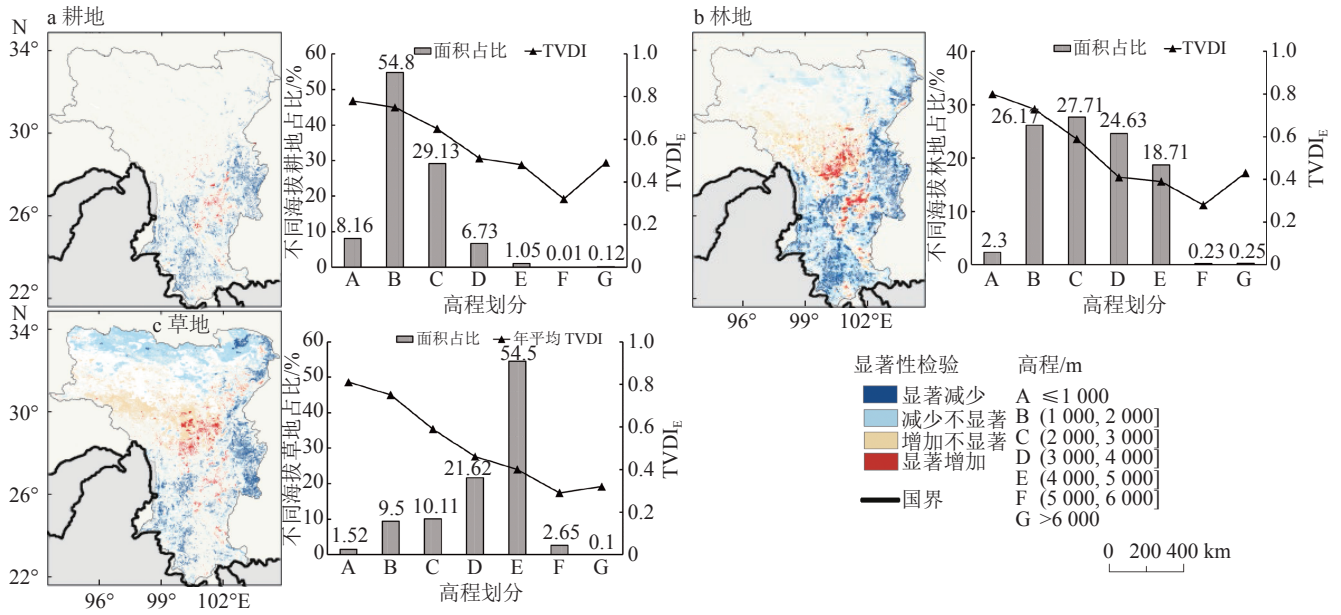


图 6 2001—2019 年横断山区 TVDI_E 在不同土地利用类型中变化趋势的显著性检验及不同高程中不同土地利用类型同 TVDI_E 的变化关系

所对应的 TVDI_E 出现增高趋势。究其原因主要是高程 >6 000 m 的区域为高山荒漠带, 植被稀疏, TVDI_E 的计算涉及植被指数与地表温度, 植被数量稀少导致检测到的植被指数降低, 致使计算出的 TVDI_E 受到干扰, 加之该类高程划分下所占区域较少, 结果相较有所增加。

2.2.2 生长季不同土地类型下 TVDI_E 的空间分布特征 植被的生长季一般为 4—10 月, 横断山区有明确的干湿季划分, 通过计算测得各月 19 年来平均降水量, 4 月的平均降水量为 32.07 mm, 5—10 月均 >50 mm, 由此可确定生长及枯水期出现在 4 月。图 7 为多年 TVDI_E 于 4 月份在不同土地利用类型上的空间分布图。图 7-a 中耕地在枯水期受干旱影响严重, 耕地干旱等级主要为极旱及重旱; 图 7-b 为林地在 4 月时的 TVDI_E 空间分布, 干旱轻重等级的分界集中于中部高原过渡地带; 草地在 4 月中由于缺水, 北部的高原平坦地区以中旱及轻旱为主, 部分零散地区有极旱情况发生(图 7-c)。

2.3 干旱变化与气象因子的相关分析

2.3.1 TVDI_E 与气象因子年相关分析 为揭示气象因子同干旱指数 TVDI_E 的响应关系, 本研究利用筛选的年平均风速、年均气温、日照时间、平均湿度及降水量等气象因子, 采用相关分析计算 TVDI_E 与各气象因子的相关性并对其进行显著性检验, 其中显著性检验无变化所指的区域为 0 值, 即干旱指数与气象因子既不相关也不显著(图 8)。

TVDI_E 与平均风速的相关性较弱, 显著正相关的地区主要集中于中南部攀枝花市周围及东部大关市周围地区高海拔地区(图 8-a、b)。TVDI_E 与平均气温呈正相关的地区主要分布于中部及西部地区, 呈负相关的地区分布于北部地势平坦的高原地区、东部及西南部地势变化复杂地区, 相关性较高的地区集中于横断山区中部的大雪山高海拔地区(道孚县、洛隆县, 及西部边坝县至八宿县的干热河谷地带)(图 8-c、d)。然而, TVDI_E 与日照时间主要呈显著正相关, 集中分布于北部地势平坦的高原地带、西部干热河谷地

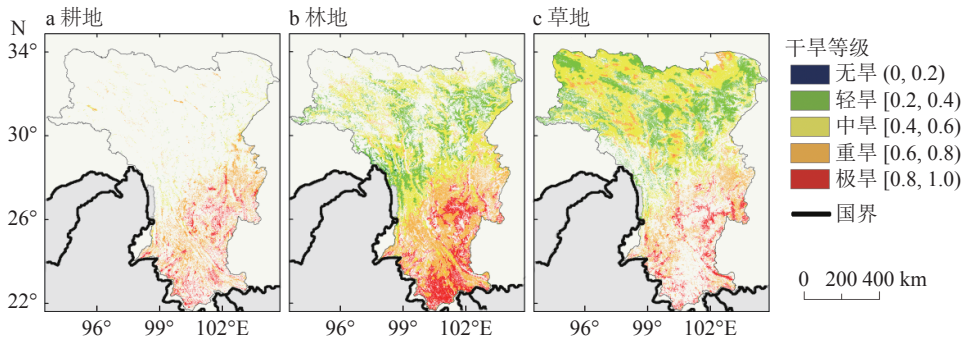


图 7 2001—2019 年横断山区生长季缺水期 TVDI_E 在不同土地利用类型中的空间分布情况

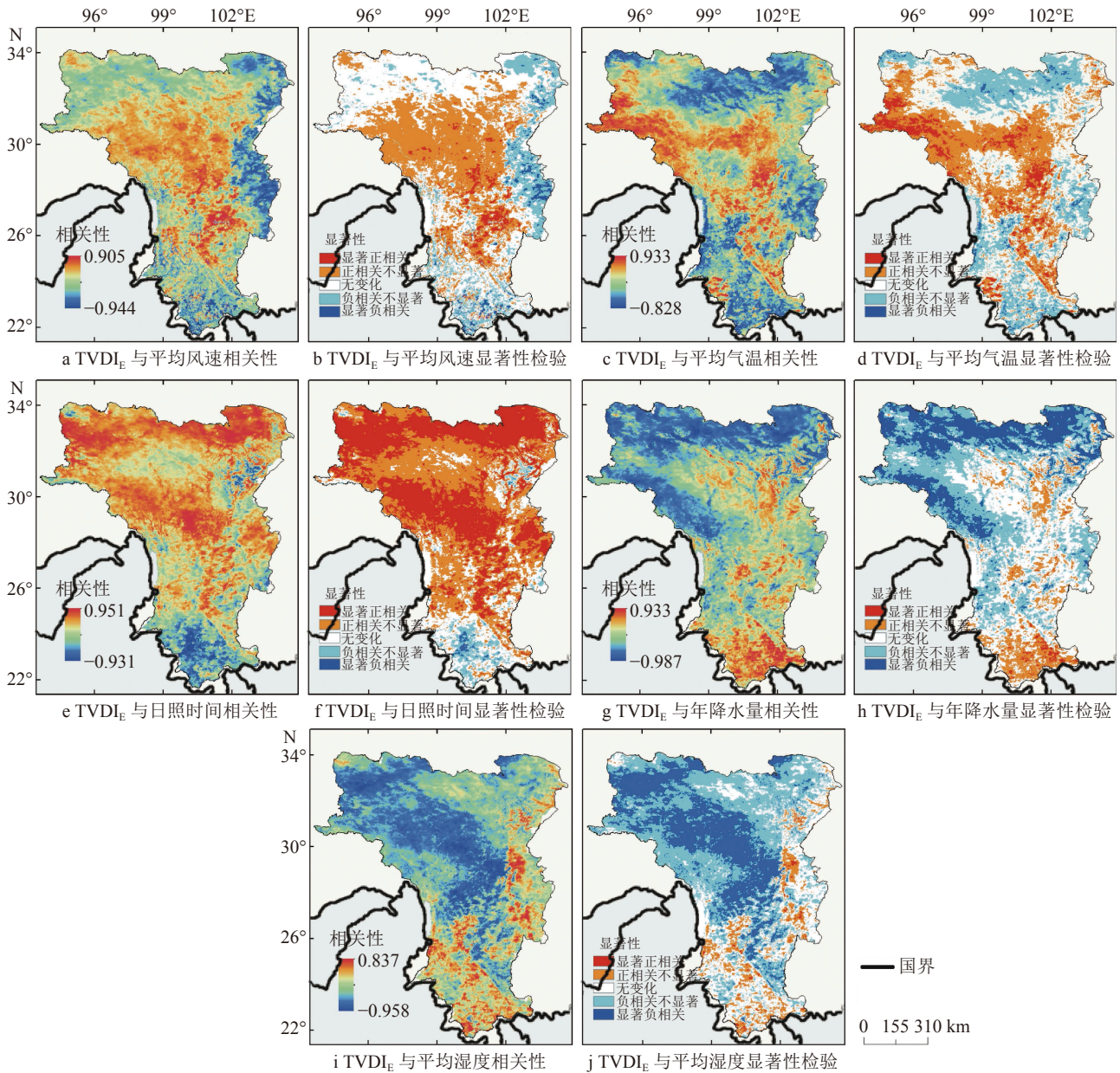


图 8 TVDI_E与气象因子的相关性及其显著性检验

带及中部海拔高的山地地带(图 8-e、f);与日照时间不同, TVDI_E与年降水量及相对湿度主要呈负相关关系(图 8-g、h). TVDI_E与年降水量呈显著负相关的地区主要为北部高原地势平坦地带及西部三江地区的干热河谷地段,而与相对湿度呈显著负相关的区域主要集中于青藏高原及高原山地地带(图 8-i、j), TVDI_E与相对湿度呈显著负相关的区域所占面积高于年降水量(表 2).

2.3.2 TVDI_E与日照时间、相对湿度逐月复相关分析 由 2.3.1 可知,横断山区干旱对日照时间和相对湿度的敏感性最大.因此,本文选取上述 2 个气象因子与 TVDI_E的复相关分析,进一步揭示主要气象因子对干旱的影响.图 9 为横断山区与日照时间、相对湿度的逐月复相关分析,并进行 *F* 检验的结果.由

表 2 TVDI_E与气象因子相关性的显著性检验面积占比

气象因子	占比				%
	显著正相关	正相关不显著	无变化	负相关不显著	
平均风速	3.26	35.04	44.71	14.74	2.25
平均气温	6.80	28.78	39.27	23.48	1.68
日照时间	38.02	38.06	18.93	4.39	0.60
降水量	0.80	10.82	34.72	33.31	20.35
平均湿度	0.52	7.50	25.89	37.85	28.24

图 9 可知,气象因子对春初和秋末的 TVDI_E 复合作用最强,大部分区域呈现显著正相关;2—4 月,冬季向春季过渡,阿坝县、德格县等位于青藏高原附近的地区复相关强;5 月复相关性强的地区集中于东北部的

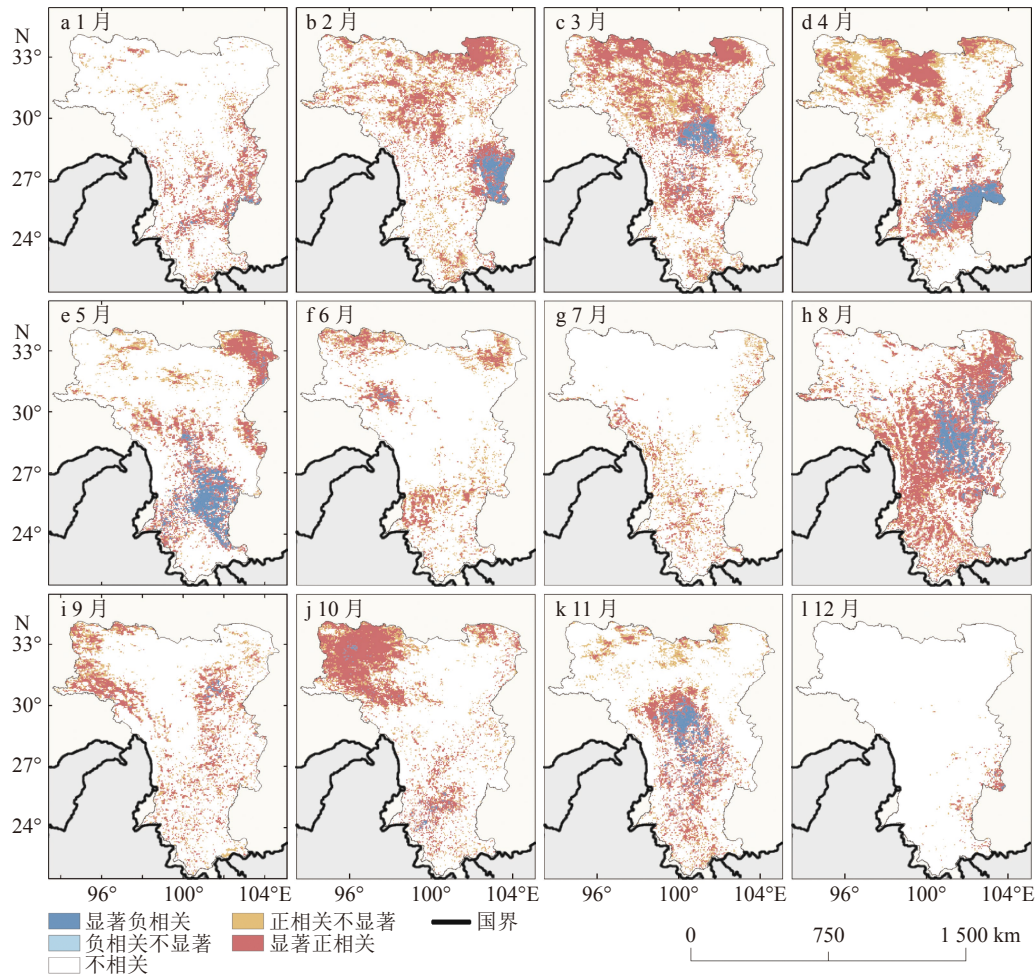


图9 TVDI_E与日照时数、相对湿度逐月复相关系数显著性检验

红原草原地带;而在8—10月,横断山区雨季结束,季节上夏季向秋季过渡,复相关性强的地区由三江流域地区的干热河谷和东北部的红原草原逐渐向西北方向迁移;在10月,复相关性强的地区集中在青藏高原地区;在2—4月,东部的大雪山及海拔高的山区地带复相关性弱,在5月,复相关性弱的地区集中于攀枝花等高原盆地地带,在8月,相关性弱的区域分布于大雪山地带,而在11月,集中于木里等云贵高原与青藏高原过渡地区。

3 讨论与结论

19年来,横断山区干旱呈现减缓趋势,主要是因为近几年来横断山区降水量整体呈增加趋势,植被覆盖度明显好转,生态环境有所改善^[31]。由于横断山区地形变化复杂,干旱受地形的影响变化较为复杂,遥感干旱监测能够弥补气象干旱监测在空间上的精度不足问题。基于EVI和LST反演的TVDI_E的时空分析表明,横断山区的干旱严重的地区主要集中分布于南部及中南部地区,其中干旱较为严重的为红原草原、攀枝花市周边及南部湿热地带。相较于大多数研

究利用NDVI计算TVDI_N的干旱变化,基于EVI计算的TVDI_E值对气候因子响应更加准确,并与气象数据进行相关性分析,明确横断山区干旱变化受影响程度,可以更好地对横断山区干旱变化进行监测,为未来横断山区干旱研究、地区生态保护和建设提供更进一步的参考。

本研究依据从MODIS所获得的NDVI、EVI以及LST数据,利用TVDI弥补站点分布不均导致难以准确反映干旱的时空演变特征,通过土壤水数据验证TVDI在横断山区的适用性,研究横断山区干旱的时空演变规律,利用土地利用、高程和气象要素与干旱指数的相关关系分析,揭示干旱在不同土地类型、高程和气象要素影响下的空间演变特征,所得的主要结论如下:

1)通过对比TVDI_E、TVDI_N和CWSI与土壤水分的相关性,结合不同指数受地形地貌影响,得出TVDI_E能够更好地反映土壤水分状况。近19年来横断山区干旱严重区域主要表现在攀枝花市附近的高原盆地地带、景洪县周围湿热地带、三江地区周围及东北部的红原草原一带,多年平均干旱呈现南高北低的变化

趋势;干旱在春夏交替期间有明显增加趋势。

2)在对比耕地、林地及草地与干旱变化趋势和海拔之间的关系时,可发现多年来横断山区干旱随海拔的升高,不同土地类型的分布存在差异,耕地多集中于海拔<3 000 m 的地区,林地分布于海拔 1 000~5 000 m 的地区,草地主要生长于海拔>5 000 m 的地区,19 年来耕地、林地和草地中 TVDI_e 总体呈减弱趋势,处在高原过渡带及干热河谷地区的林地、草地表现为增加趋势。在生长季缺水期时,位于南部地区的 3 种植被类型受干旱影响严重。在林地、草地的空间分布中,位于高原过渡带地势起伏差异大的林地以及在北部高原平坦地区的草地,都因地形以及缺水的双重影响而出现较强的干旱现象。

3)各气象因子与干旱关系最显著的是日照时间与相对湿度,其次是年平均气温和降水量,风速与干旱的关系则不明显。冬季向春季过渡时期,横断山区北部的青藏高原地带干旱变化受气象因子影响明显;特别是西部干热河谷地带,南部的湿热地带及东北部的红原草原地区在夏季表现尤为明显。

4 参考文献

- [1] GUO E L, LIU X P, ZHANG J Q, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231
- [2] HAN Y, LI Z Y, HUANG C, et al. Monitoring droughts in the greater Changbai Mountains using multiple remote sensing-based drought indices[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 530
- [3] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. *干旱气象*, 2017, 35(5): 709
- [4] 郭铤,王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. *干旱气象*, 2015, 33(1): 1
- [5] 周岩,刘世梁,谢苗苗,等. 人类活动干扰下区域植被动态变化:以西双版纳为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 565
- [6] 黄杉杉,马超. 吕梁紫金山地区NDVI时空变化与气候响应[J]. *人民黄河*, 2021, 43(12): 35
- [7] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI与MODIS EVI对气候因子响应差异[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1802
- [8] XIA P, YONG G, JI W. Response differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(6): 673
- [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
- [10] 李依婵,李育,朱耿睿. 一种新的气候变化敏感区的定义方法与预估[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1283
- [11] BAI J J, YU Y, LI P D. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(2): 389
- [12] 牛文娟,苟思,刘超,等. 横断山区1979—2015年干旱时空分布特征[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(增刊2): 97
- [13] DAI E F, WANG Y H. Attribution analysis for water yield service based on the geographical detector method: a case study of the Hengduan Mountain region[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(6): 1005
- [14] 丁文荣. 横断山区典型干旱河谷干湿状况演变特征及影响因素研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(11): 6
- [15] YIN L, DAI E F, ZHENG D, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: climate change or human activity?[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106013
- [16] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等. 我国横断山区1960—2008年气温和降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 563
- [17] 时振钦,邓伟,张少尧. 近25年横断山区国土空间格局与时空变化研究[J]. *地理研究*, 2018, 37(3): 607
- [18] 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
- [19] 吴欣睿,那晓东,臧淑英. 温度植被干旱指数在2000—2015年松嫩平原土壤湿度中的应用[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4432
- [20] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 276
- [21] 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
- [22] 程伟,辛晓平. 基于TVDI的内蒙古草地干旱变化特征分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2728
- [23] 吴黎. 基于MODIS数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 130
- [24] 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
- [25] 汪左,王芳,张运. 基于CWSI的安徽省干旱时空特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 853
- [26] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133
- [27] 刘洋,李诚志,刘志辉,等. 1982—2013年基于GIMMS-

- NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198
- [28] 王佃来, 宿爱霞, 刘文萍. 几种植被覆盖变化趋势分析方法对比研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(5): 10
- [29] ALI R, KURIQI A, ABUBAKER S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method[J]. *Water*, 2019, 11(9): 1855
- [30] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000—2014年黄河源区ET时空特征及其与气候因子关系[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2117
- [31] 马梓策, 于红博, 曹聪明, 等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1310

Spatial-temporal characteristics and possible impacts of drought in Hengduan Mountain: a TVDI study

LÜ Yinfeng¹⁾ ZHOU Jiayi¹⁾ SUN Peng¹⁾ ZHANG Qiang²⁾ MA Zice¹⁾
 ZOU Yifan¹⁾ BIAN Yaojin¹⁾ LIU Ruilin¹⁾

(1) School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, 241002, Wuhu, Anhui, China;

2) State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Drought in Hengduan Mountain from 2001 to 2019 was studied. Comparison was made between two temperature vegetation dryness index (TVDI), calculated from enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI), and crop water stress index (CWSI), calculated from potential evapotranspiration (PET) and actual evapotranspiration (ET). Theil-Sen trend analysis and Mann-Kendall test were used to study spatial distribution, temporal variation and space-time evolution of drought. Meteorological data were correlated. EVI-based TVDI was found more suited for drought research. Ts-EVI characteristic space constructed from MODIS EVI and land surface temperature (LST) products showed an annual drought decrease in the study period, average annual drought was found higher in the south and lower in the north. Severe drought occurred mainly in Panzhihua, in hot and humid areas. In the north, concentration was noted in vicinity of the three rivers (Lancang River, Nujiang River and Jinsha River) and Hongyuan Grassland. The most severe drought occurred in summer, and drought increased significantly during transition from spring to summer. Significant correlation was found between drought and sunshine duration, but weak or no correlation between drought, precipitation and humidity respectively. Meteorological conditions could be used to predict disaster to facilitate disaster prevention and mitigation.

Keywords temperature vegetation drought index; spatial-temporal characteristic; land utilization; meteorological factor; multiple correlation analysis; Hengduan Mountainous

【责任编辑: 刘先勤】