

DOI: 10.5846/stxb202205181415

袁沫, 邢秀丽, 居为民. 中国遥感干旱指数时空特征及其对气候和地表覆盖变化的响应. 生态学报, 2023, 43(16): 6691-6705.

Yuan S, Xing X L, Ju W M. Temporal and spatial patterns of remote sensing drought indices and their responses to climate and land use changes in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6691-6705.

中国遥感干旱指数时空特征及其对气候和地表覆盖变化的响应

袁沫^{1,2}, 邢秀丽^{1,2}, 居为民^{1,2,*}

1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210000

2 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210000

摘要: 干旱严重影响植被生长, 威胁粮食安全, 基于遥感计算的植被状态指数 (Vegetation Condition Index, VCI)、温度状态指数 (Temperature Condition Index, TCI) 和植被健康指数 (Vegetation Health Index, VHI) 是常用的干旱指数, 被广泛应用于干旱监测。为了探究近年来我国干旱特征及其对气候和地表覆盖变化的响应, 分析了 2003—2016 年期间 VCI、TCI 和 VHI 的时空变化特征; 采用最小二乘 (OLS) 和偏相关分析方法分析了这些指数对气候和地表覆盖变化的响应。基于上述干旱指数计算的干旱频率表明, 中温带中部和南温带等地区干旱发生频率高, 干旱指数变化趋势表明在 2003—2016 年期间中国大部分地区干旱缓解, 但在中温带、南温带和高原气候区等局部地区干旱加剧; 总体而言, 干旱指数随着年平均温度的上升和年降水量的降低而减小, VHI 与温度和降水量的相关性在不同气候区的一致性优于 VCI 和 TCI; 裸土的减少和植被的增加导致干旱指数增大, 树木转变为低矮植被干旱指数降低。

关键词: 干旱指数; 气候变化; 地表覆盖变化; 变化趋势; 响应

Temporal and spatial patterns of remote sensing drought indices and their responses to climate and land use changes in China

YUAN Shu^{1,2}, XING Xiuli^{1,2}, JU Weimin^{1,2,*}

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210000, China

2 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210000, China

Abstract: Drought seriously affects vegetation growth and threatens food security. Vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI) and vegetation health index (VHI) based on remote sensing have been widely used to monitor drought. In order to analyze spatial and temporal patterns of drought and their responses to climate and land use changes in China, this paper analyzed the temporal and spatial variations of VCI, TCI and VHI from 2003 to 2016; Least squares (OLS) and partial correlation analysis were used to analyze the responses of these indices to climate and land use changes. The drought frequency calculated using these drought indices indicated that drought occurred frequently in the central of middle temperate zone and southern temperate zone. The temporal trends of the drought indices indicated that drought was alleviated in most regions of China, but intensified in some areas such as the middle temperate zone, the southern temperate zone and the plateau climate zone during the study period. Overall, drought indices decreased with the increase of annual mean temperature and the decrease of annual precipitation. The correlations of VHI with temperature and precipitation were more consistent than VCI and TCI across different climate zones. The decrease of bare soil fraction and the

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42141005)

收稿日期: 2022-05-18; 网络出版日期: 2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juweimin@nju.edu.cn

increase of vegetation fraction led to the increase of drought indices. The conversion of trees to low vegetation induced the decreases of drought indices.

Key Words: drought index; climate change; land cover change; change trend; response

IPCC 第五次评估报告指出,1980—2012 年,全球平均陆地和海洋表面温度上升了 0.85℃,气候变化和人类活动等因素将大幅增加未来极端干旱发生的可能性^[1]。干旱是全球分布最广泛、持续时间最长的自然灾害,全球干旱半干旱气候区占陆地面积的 30%以上,极大限制了人类的生存空间^[2]。研究表明,长期和频发的干旱,影响了环境、经济和人类生活,干旱不仅严重影响农业生产,还导致粮食短缺、人类健康恶化、贫穷、区域动荡、人口迁移和死亡^[3]。在中国,干旱对社会经济造成了严重的影响。据统计,我国常年农作物受旱面积约 0.20 亿—0.27 亿 hm^2 ,每年造成粮食损失达 250 亿—300 亿 kg ^[4]。

近几十年来,学者们发展了许多基于气象数据的干旱指数,如帕默尔干旱程度指数 PDSI(Palmer Drought Severity Index)^[5]、干旱侦测指数 RDI(Reconnaissance Drought Index)^[6]、蒸散压力指数 ESI(Evaporative Stress Index)^[7]、标准化降水指数 SPI(Standardized Precipitation Index)^[8]、标准化降水蒸散指数 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)^[9]等。但是,这些指数仅能监测气象干旱,不能充分反应干旱对植被的影响,在气象站点分布稀疏的地区,这些指数也难以有效监测干旱^[10—11]。随着技术的发展,基于遥感数据的干旱指数不断发展,很好地弥补了传统干旱指数的缺陷,可以有效监测干旱对植被的影响^[11—14]。

在早期,归一化差异植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)被广泛应用于干旱监测^[15]。由于冠层光谱同时受叶片含水量和冠层结构的影响,制约了 NDVI 监测干旱的能力。为此,Kogan 以 NDVI 为基础提出了植被状态指数(Vegetation Condition Index, VCI)^[16—17]。国内外的许多研究证明了 VCI 监测干旱的能力^[18—25]。由于干旱影响地表能量分配,地表温度变化在一定程度上也可能反映干旱状况^[26—27],Kogan 提出了基于地表温度 LST(Land Surface Temperature)的温度状态指数(Temperature Condition Index, TCI)^[28]。为了集成 VCI 和 TCI 的优势,Kogan 进一步提出了植被健康指数(Vegetation Health Index, VHI)^[29],该指数是 VCI 和 TCI 的线性组合,可以更好地监测干旱^[30—31]。为了更好地利用遥感数据监测干旱特征和量化干旱影响,这 3 个指数通常会同时使用^[32—33],已成功应用于全球多个地区的农业干旱监测、植被对干旱的敏感性评估和农作物估产等^[32, 34—37]。

由于全球变化和人类活动的影响,近年来我国气候和地表覆盖发生了显著变化,干旱发生的频率和强度不断增加,但是我国干旱变化趋势及其对植被的影响尚不清楚。为此,本文利用 MODIS 遥感数据计算 2003—2016 年的干旱指数 VHIs(VCI、TCI 和 VHI),揭示其时空变化特征;分析上述指数与年平均温度、年降水量和地表覆盖变化的相关性,评价其对气候和地表覆盖变化的响应。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域

中国位于亚洲东部,紧邻太平洋西岸,气候和地形复杂多变^[38],地势西高东低且呈阶梯状分布,高原与山地是主要的地形地貌,约占国土面积的 60%。地形的复杂多变导致了气候的丰富多样,中国有 6 个气候带,其中温带与亚热带地区就占据了全国的 71%,中国东部地区多为季风气候,雨热同期,冬季的大陆性季风寒冷干燥,夏季的海洋季风湿热多雨,青藏高原海拔高,形成了独特的高山气候,位于内陆的西北部地区,多为干旱气候。本文的研究区域包括了中国大陆、台湾岛和海南岛(图 1)。为了比较不同气候带干旱特征对气候因子和地表覆盖变化的响应情况,将研究区分为北温带、中温带、南温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、北热带、中热带和高原气候区 9 个气候带。气候带划分如图 1 所示。

1.2 数据来源及处理

研究使用的数据包括:(1)气象数据、(2)气候带数据、(3)基于 MODIS 地表温度(LST)数据生成的逐日

平均 LST、(4) MODIS NDVI、(5) 马里兰大学生成的裸土、低矮植被和树木覆盖度数据、(6) 标准化降水蒸散指数(SPEI)数据和(7)土壤湿度(SM)遥感数据。这些数据的相关参数如表 1 所示。气象数据(气温、降水)由气象站点(图 1)观测数据插值生成;气候带数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心,下载地址为 <https://www.resdc.cn>;SPEI 数据来源于东安格利亚大学气候研究中心,下载地址为 <https://spei.csic.es/database.html>;SM 遥感数据来自于欧空局“气候变化倡议”项目(ESA CCI)提供的全球土壤湿度被动微波融合数据集,下载地址为 <https://esa-soilmoisture-cci.org/data>。

利用 MODIS 官网提供的 MRT 软件以及 ArcGIS 软件等,对上述数据进行了拼接、重投影和裁剪等预处理,为与植被覆盖度数据的空间分辨率一致,将上述数据的空间分辨率统一至 0.05° 。月度数据取平均得到年度数据,年度数据取平均得到整个时期的均值。

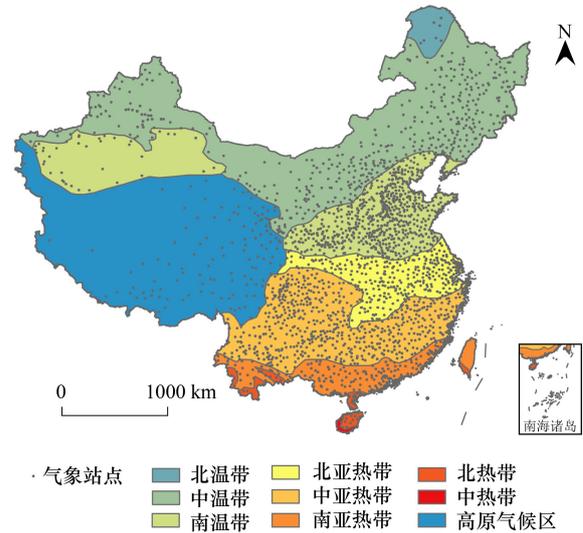


图 1 中国各气候带区域及气象站点位置

Fig.1 Locations of climatic zones and meteorological stations in China

表 1 使用数据的描述

Table 1 Description of data used

数据产品 Data product	数据类型 Data type	时间分辨率 Temporal resolution	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
MOD13A3	NDVI	月	1km	[39]
日均温 Daily average temperature	LST	月	1km	[40]
VCF5KYR	VCF	年	0.05°	[41]
Global SPEI database	SPEI	月	0.5°	[42—43]
ESA CCI-passive SM v07.1	SM	日	0.25°	[44—45]

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LST:地表温度 Land surface temperature; VCF:植被连续场 Vegetation continuous fields; SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; SM:土壤湿度 Soil moisture

2 研究方法

2.1 基于遥感数据的干旱指数

使用的基于遥感数据的干旱指数(VCI、TCI和VHI)等级划分如表 2 所示。TCI、VCI和VHI的具体计算方法如下:

$$TCI_{ijk} = \frac{LST_{ijmax} - LST_{ijk}}{LST_{ijmax} - LST_{ijmin}} \quad (1)$$

$$VCI_{ijk} = \frac{NDVI_{ijk} - NDVI_{ijmin}}{NDVI_{ijmax} - NDVI_{ijmin}} \quad (2)$$

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \quad (3)$$

式中, i 、 j 和 k 分别表示第 i 个像元、第 j 个月份和第 k 个年份;max和min分别表示对应像元的多年最大值和最小值; α 表示权重因子,在实际应用中一般将其固定为 $0.5^{[46]}$ 。

3个月(SPEI\3)和6个月(SPEI\6)是有效的气象干旱指数^[9],SMCI能够有效地指示土壤水分不

足而导致的干旱^[46]。采用逐月的3个月和6个月时间尺度SPEI以及SM遥感数据计算的土壤湿度状态指数(SMCI)评价上述3个干旱指数监测干旱的能力。其中SMCI计算为:

$$SMCI_{ijk} = \frac{SM_{ijk} - SM_{ijmin}}{SM_{ijmax} - SM_{ijmin}} \quad (4)$$

式中, SM_{ijk} 为第*i*个像元、第*j*个月份和第*k*个年份的土壤湿度; SM_{ijmax} 和 SM_{ijmin} 分别为*i*个像元、第*j*个月份土壤湿度的多年最大值和最小值。

表2 干旱指数等级的划分^[47-48]

Table 2 Classification scheme of the drought indices

分类名称 Name of class	TCI	VCI	VHI	SPEI	SMCI
极度干旱 Extreme drought	0—0.1	0—0.1	0—0.1	< -2	0—0.1
严重干旱 Severe drought	0.1—0.2	0.1—0.2	0.1—0.2	-2—-1.5	0.1—0.2
中度干旱 Moderate drought	0.2—0.3	0.2—0.3	0.2—0.3	-1.5—-1	0.2—0.3
轻微干旱 Mild drought	0.3—0.4	0.3—0.4	0.3—0.4	-1—0	0.3—0.4
异常干燥 Abnormal drought	0.4—0.5	0.4—0.5		0—1	0.4—0.5
无干旱 No drought	0.5—1	0.5—1	0.4—1	> 1	0.5—1

TCI:温度状态指数 Temperature condition index; VCI:植被状态指数 Vegetation condition index; VHI:植被健康指数 Vegetation health index; SMCI:土壤湿度状态指数 Soil moisture condition index

2.2 干旱频率

根据表2和以下公式,计算了14a区域内发生中度及以上干旱发生的频率。

$$f = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (5)$$

式中, f 为干旱频率, m 为发生中度及以上干旱的月数, n 为2003—2016年的总月数($n=168$)。

2.3 变化趋势分析

利用普通最小二乘回归(OLS)和*F*统计量确定干旱指数变化趋势:

$$SLOPE = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times DI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n DI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (6)$$

式中, n 表示年份总数($n=14$)。 DI_i 代表第*i*年的干旱指数平均值, $SLOPE>0$ 表示增加趋势;反之, $SLOPE<0$ 表示降低趋势。

2.4 计算干旱指数对温度和降水变化的响应

利用年干旱指数与温度和降水之间的偏相关系数表示干旱指数对气候变化的响应。偏相关分析通常用于分析在剔除其他因素的影响后,两个变量之间的关系^[49]。利用下式计算干旱指数与年平均温度和年降水量之间的偏相关系数:

$$R_{XY,Z} = \frac{r_{XY} - r_{XZ}r_{YZ}}{\sqrt{(1 - r_{XZ}^2) + (1 - r_{YZ}^2)}} \quad (7)$$

式中, $R_{XY,Z}$ 为控制*Z*条件下*X*与*Y*之间的偏相关系数, r_{ij} 为*i*与*j*的相关系数。 $R_{XY,Z}>0$,表示在*Z*不变条件下,*Y*随*X*的增大而增大,反之亦然。

如干旱指数与温度/降水量之间的偏相关系数大于0,表示温度/降水量上升导致干旱指数增大、干旱减轻;干旱指数与温度/降水量之间的偏相关系数小于0,表示温度/降水量上升导致干旱指数降低、干旱加重。

2.5 计算干旱对地表覆盖变化的响应

为了分析干旱指数对地表覆盖变化的响应,将生成的SLOPE图与地表覆盖变化率(裸土、低矮植被和树

木覆盖度变化率)图叠加,计算 9×9 移动窗口内共 81 个格点 SLOPE 分别与裸土覆盖度变化率、低矮植被覆盖度变化率和树木覆盖度变化率的相关系数,分析干旱指数对地表覆盖变化的响应。相关系数大于零表示覆盖度的上升导致干旱指数增大。

3 研究结果与分析

3.1 干旱指数时空变化特征

3.1.1 干旱频率空间分布

利用月干旱指数计算的月干旱发生频率分布如图 2 所示。利用 TCI、VCI 和 VHI 计算的研究区内月干旱发生频率的平均值分别是 27%、28%和 19%,表明 14 年中有 20%—30%的月份发生了中度及以上干旱。基于 TCI 的结果表明,5.4%的区域干旱发生频率低于 20%,主要位于高原气候区和中温带的东北部;67.4%的区域干旱发生频率介于 20%—30%之间;在 27.2%的区域干旱频率高于 30%,主要分布在中温带中部、南温带、北亚热带、中亚热带等部分地区,干旱发生频率高于 50%的区域分布不足 1%;基于 VCI 的结果表明,65.7%的区域干旱频率低于 30%;28.0%的区域干旱频率介于 30%—40%,主要位于我国中温带和南温带的大部分地区;干旱频率高于 40%的区域占 6.3%,分布在中温带的中部和西北部以及南温带的部分地区。基于 VHI 的计算的干旱发生频率低于 TCI 和 VCI,在 74.4%的区域干旱频率低于 20%;在 24.4%的区域干旱发生频率介于 20%—30%之间,分布于中温带中部、南温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带等部分地区;干旱频率高于 30%的区域仅占 1.2%,位于中温带中部及其西北部。

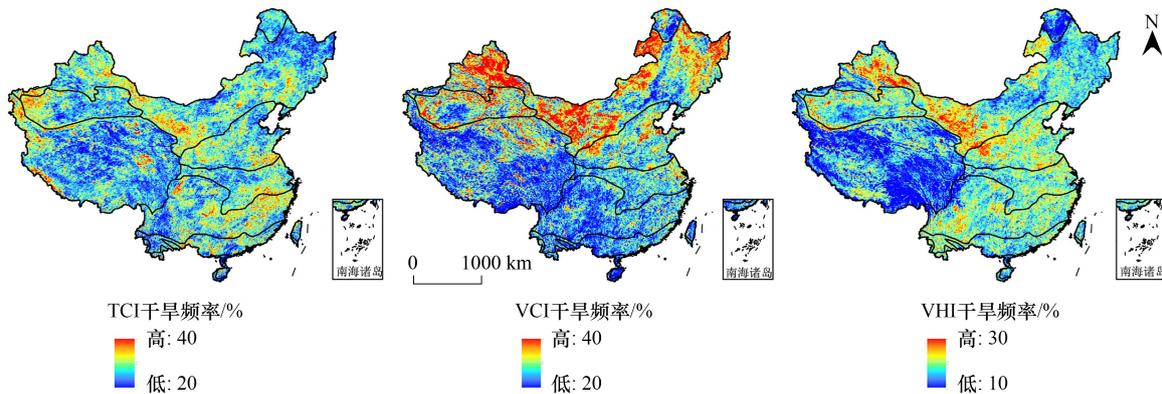


图 2 根据 2003—2016 年 TCI、VCI 和 VHI 确定的月干旱频率分布

Fig.2 Frequency of monthly drought determined according to TCI, VCI and VHI from 2003 to 2016

TCI:温度状态指数 Temperature condition index; VCI:植被状态指数 Vegetation condition index; VHI:植被健康指数 Vegetation health index

3.1.2 干旱指数变化趋势

利用方程 6 逐像元诊断干旱指数年平均值的时间变化特征。根据计算的斜率(SLOPE)和显著水平,将干旱指数的变化趋势分为以下七类:(1)极显著下降($SLOPE < 0, P \leq 0.01$), (2)中度显著下降($SLOPE < 0, 0.01 < P \leq 0.05$), (3)轻度显著下降($SLOPE < 0, 0.05 < P \leq 0.1$), (4)无显著变化($P > 0.1$), (5)轻度显著上升($SLOPE > 0, 0.05 < P \leq 0.1$), (6)中度显著上升($SLOPE > 0, 0.01 < P \leq 0.05$), (7)极显著上升($SLOPE > 0, P \leq 0.01$)^[50]。TCI 的趋势表明(图 3),13.8%的区域 TCI 显著下降,中度显著下降区域为 5.6%,轻度显著下降区域为 6.9%,显著下降的区域主要位于中温带中部、南温带东部和高原气候区的部分地区,表明这些地区在 14 年中干旱程度加剧。1.3%的区域 TCI 显著上升,轻度显著上升的区域为 0.8%,显著上升趋势出现在中温带的东北部和中亚热带的部分地区。在北温带、北亚热带、中亚热带等区域 TCI 趋势不显著;

图 3 显示在 2003—2016 期间,66.3%的区域显著 VCI 上升,其中 47.2%区域的 VCI 呈现极显著上升,12.9%的区域 VCI 中度显著上升。VCI 显著上升的区域主要是位于北温带、东部的南温带、北亚热带、中亚热

带和南亚热带的大部分地区,表明这些地区的干旱有所减轻;VCI 仅在 1.6% 的区域显著下降,呈零星分布。中温带东北部和高原气候区中部等地区 14 年内 VCI 未发生显著变化;与 VCI 相似,14 年间 VHI 在 41.7% 的区域显著上升(图 3),VHI 极显著上升的区域为 22.6%,中度显著上升的区域为 12.3%。在 3.1% 的区域 VHI 呈显著下降趋势,极显著下降区域为 0.9%,中度显著区域下降为 1.1%。

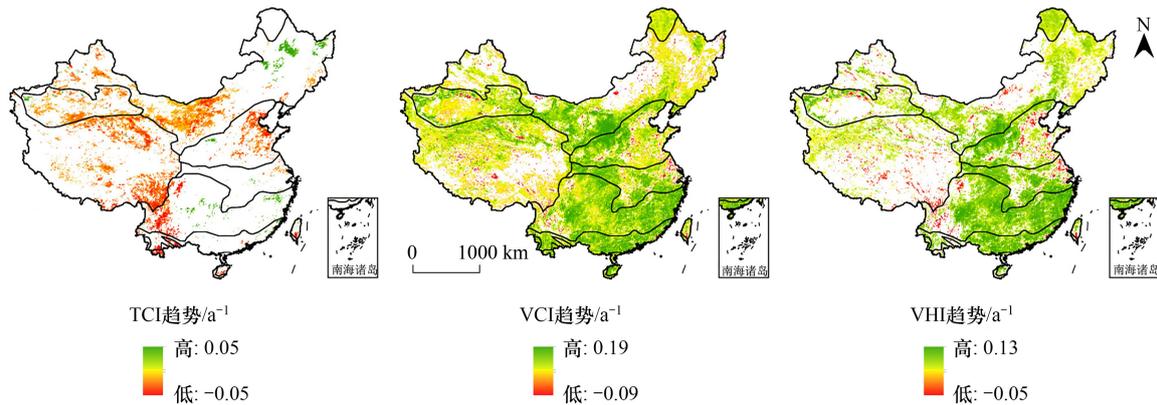


图 3 2003—2016 年 TCI、VCI 和 VHI 的变化趋势分布。空值为不显著区域

Fig.3 Temporal trends of TCI, VCI and VHI from 2003 to 2016. The null values indicate insignificant temporal trends

3.2 干旱对气候变化的响应

3.2.1 干旱指数对温度变化的响应

利用公式 7 计算了干旱指数年平均与年平均温度和年降水量的偏相关系数,为免地表覆盖变化的影响,剔除了 14 年内植被覆盖变化率超过 $\pm 3\%$ 的区域。干旱指数对温度变化响应的空间分布和不同气候区的统计结果如图 4 所示。在 23.4% 的区域 TCI 对气温为负相关,分布在中温带、南温带、北亚热带和高原气候区中部等地区,其余大部分区域不显著。除中亚热带东部以外,VHI 对气温为负相关,2.9% 的区域达到了 $P < 0.05$ 的显著水平,表明气温升高会导致该指数降低。而 VCI 对气温主要为正相关,但只有 2.3% 的区域达到了 $P < 0.05$ 的显著水平。总体而言,在所有的气候区,TCI 和 VHI 对气温呈现出一致的显著负相关,表明温度升高会导致干旱加剧;然而,除中热带外,VCI 对气温的变化均为正相关。

3.2.2 干旱指数对降水变化的响应

干旱指数与年降水量的偏相关系数空间分布及不同气候区的统计结果如图 5 所示。TCI、VCI 和 VHI 对降水响应的表现较为一致。在 2.5% 的区域内 TCI 对降水为正相关,主要分布在中温带东部、中亚热带东部和高原气候区等地;TCI 对降水的负相关主要分布在南温带和北亚热带,但比例低于 0.5%。VCI 和 VHI 对降水响应的分布相似,除南温带和高原气候区部分地区对降水为负相关以外,在其他气候区内 VCI 和 VHI 对降水为正相关,比例分别为 4.6% 和 5.5%。总体而言,在所有的气候区,VCI 和 VHI 对降水变化表现出一致的正相关,降水的增多有利于促进植被生长从而缓解干旱;而在南温带、北亚热带和北热带,TCI 对降水变化表现为负相关,除中热带 TCI 对降水变化的响应不显著以外,其余地区为正相关。作为综合干旱指数,VHI 在不同的气候区表现出一致的对气温的负相关和对降水的正相关,稳定性明显优于 TCI 和 VCI。

3.3 干旱对地表覆盖变化的响应

3.3.1 地表覆盖变化特征

2003—2016 年中国裸土、低矮植被和树木覆盖变化情况如图 6 所示,地表覆盖变化主要表现为裸土的减少和植被的增加。其中,64.2% 的地区裸土比例下降,18.7% 的地区裸土覆盖率没有发生变化;低矮植被覆盖率上升和下降的区域分别占 46.0% 和 47.0%;树木覆盖率在 47.0% 的地区升高,在 46.3% 的地区没有变化。在北温带、中温带的东北部、西北部南温带、北亚热带、中亚热带中和南亚热带的大部分地区,树木覆盖率的增

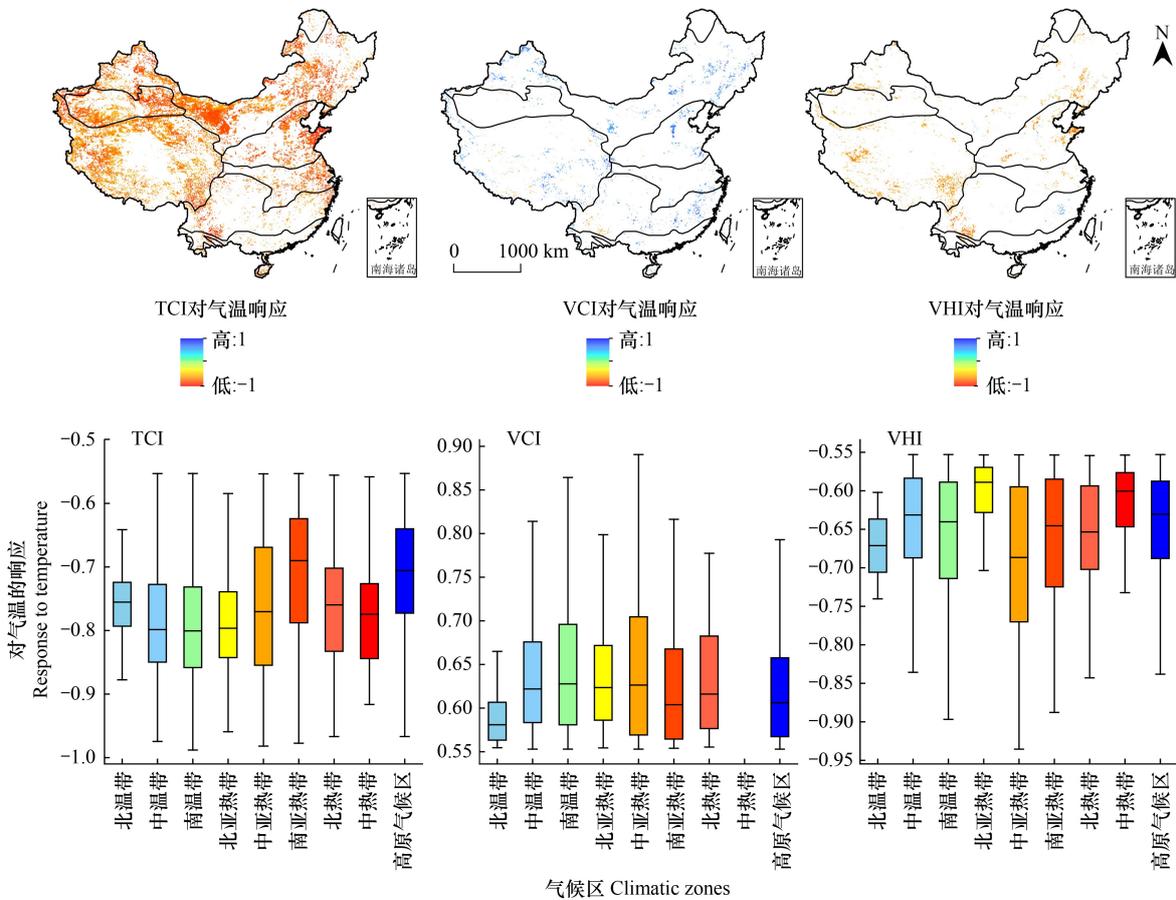


图 4 年 TCI、VCI 和 VHI 与温度偏相关的空间分布(空白区为相关性不显著区域)和偏相关系数统计结果

Fig.4 Partial correlations of annual TCI, VCI and VHI with temperature (Areas without significant correlations are masked with white color) and statistical results of partial correlations

加来自于裸土与低矮植被覆盖率的减少。在中温带的中部、西北部的南温带和高原气候区的大部分地区,这些地区树木覆盖率没有发生变化,主要反映为裸土和低矮植被之间的相互转化,其中高原气候区的中部、中温带的中部和西北部南温带等部分地区由裸土转变为低矮植被,其余地区整体上表现为低矮植被向裸土的转变。而在南温带的东部和北亚热带东部等沿海地区,受城市扩张的影响,裸土替代了植被。其余区域主要表现为树木向裸土或低矮植被的转变。

3.3.2 干旱指数对地表覆盖变化的响应

为研究干旱对地表覆盖变化的响应特征,分析了不同裸土和植被覆盖度变化范围内三个干旱指数的变化趋势,结果表明(图 7),总体而言,裸土覆盖率的降低和树木覆盖率的增加导致干旱指数增大趋势越明显,干旱减轻;而裸土覆盖率的增加和树木覆盖率的减少可能会导致干旱指数降低的趋势越明显,干旱加剧。

为探究在各气候带内干旱对地表覆盖变化的响应情况,计算了干旱指数变化趋势与裸土覆盖度、低矮植被覆盖度和树木覆盖度变化率之间的相关系数。结果如图 8 所示,VCI、TCI 和 VHI 的变化趋势均与裸土比例变化率负相关,即裸土比例的增加/减少会导致干旱指数的降低/上升、干旱的加重/减弱。除 VHI 在高原气候区与树木覆盖变化率负相关以外,三个干旱指数的变化趋势与树木覆盖度变化率正相关,树木覆盖度增大会导致干旱指数上升。干旱指数对低矮植被覆盖度变化的响应在不同气候区存在差异,在中温带和南温带,干旱指数的变化趋势与低矮植被覆盖度正相关,低矮植被覆盖的上升会导致干旱指数的增大;而在北温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带等地区,干旱指数的变化趋势与低矮植被覆盖度负相关,低矮植被覆盖的上升会

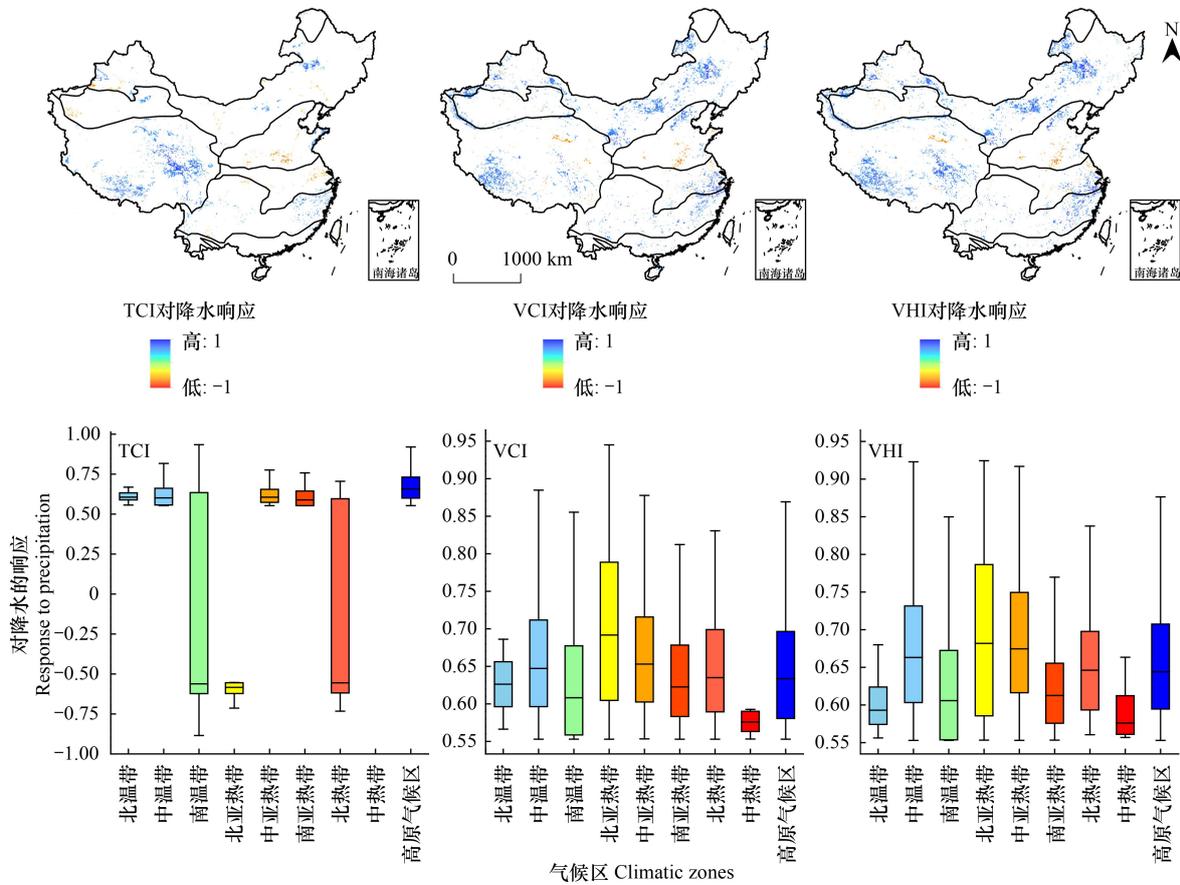


图5 年 TCI、VCI 和 VHI 与降水偏相关的空间分布(空白区为相关性不显著区域)和偏相关系数统计结果

Fig.5 Partial correlations of annual TCI, VCI and VHI with precipitation (Areas without significant correlations are masked with white color) and statistical results of partial correlations

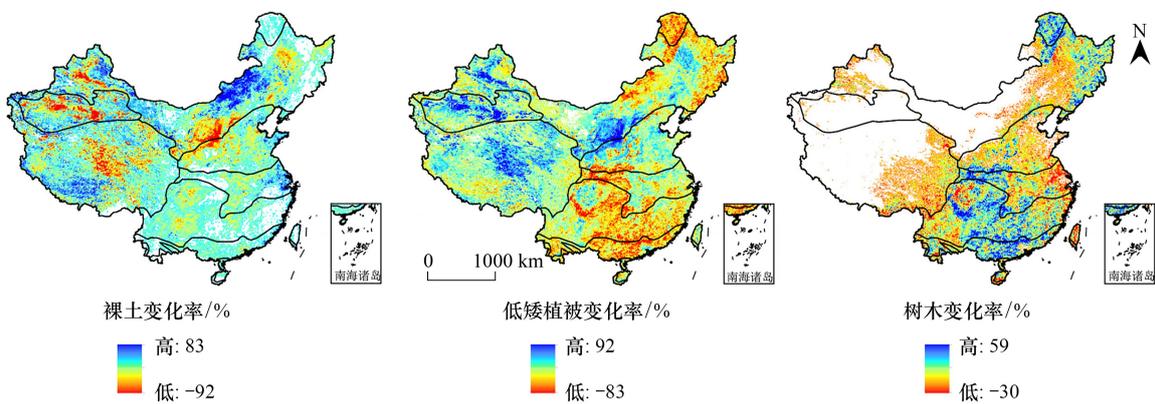


图6 2003—2016年裸土、低矮植被和树木变化率,空值为无变化区域

Fig.6 Bare ground, nontree vegetation and tree change ratio from 2003 to 2016, and the null value is the area without change

导致干旱指数的降低;在高原气候区,VCI 和 VHI 的变化趋势与低矮植被覆盖度正相关。干旱指数对低矮植被覆盖度变化的响应取决于低矮植被覆盖度的变化是由于裸土还是树木的转变有关。

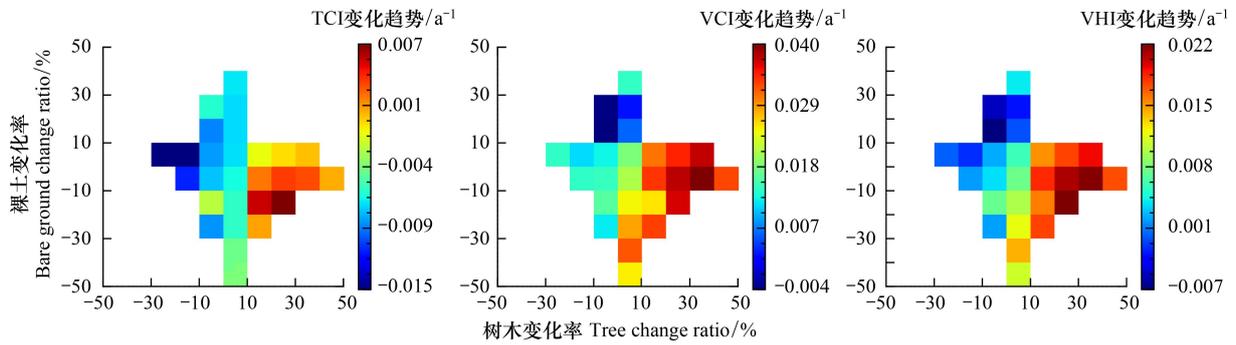


图 7 树木及裸土覆盖变化对 VHIs 趋势的联合影响

Fig.7 Combined effects of tree and bare ground cover changes on VHIs trends

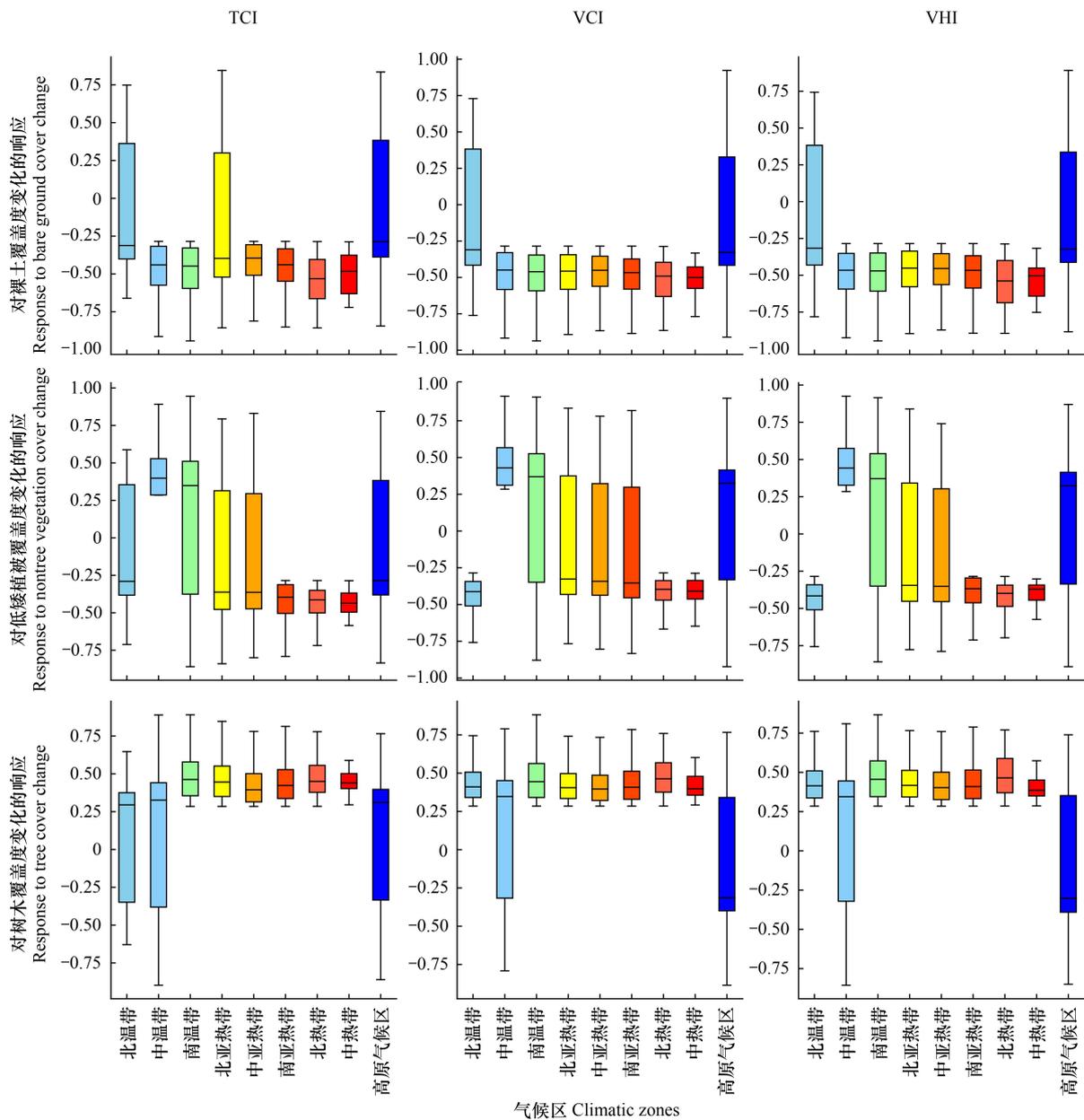


图 8 不同气候带内 VHIs 变化趋势对裸土、低矮植被和树木覆盖度变化的响应

Fig.8 Response of VHIs trends to changes of bare ground, nontree vegetation and tree cover changes in different climatic zones

4 讨论

4.1 干旱指数与 SPEI 和 SMCI 的比较

图 9 展示了 TCI、VCI 和 VHI 分别与 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 年平均值的相关性。TCI 与 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 在大部分区域呈正相关, $P < 0.1$ 的面积比例分别为 44.0%、45.8% 和 21.6%; $P < 0.05$ 的面积分别占 34.1%、35.9% 和 15.0%, 主要分布在北温带、中温带东北部、中亚热带东部和高原气候区等部分地区。VCI 与 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 的相关性较弱, $P < 0.1$ 的正相关面积比例分别为 15.5%、18.0% 和 14.7%; $P < 0.05$ 的正相关面积比例分别为 10.5%、12.2% 和 10.0%, 主要分布在亚热带地区。VCI 与 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 负相关达到 $P < 0.1$ 显著水平的面积比例分别为 5.3%、5.2% 和 4.9%; 达到 $P < 0.05$ 的面积比例分别为 3.1%、3.0% 和 3.3%, 主要分布于中温带东北部、南温带和高原气候区的部分地区。在大部分区域, VHI 与 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 正相关, 达到 $P < 0.1$ 显著水平的面积比例分别为 40.6%、44.5% 和 26.6%; 达到 $P < 0.05$ 显著水平的面积比例分别为 29.9%、34.0% 和 19.8%。

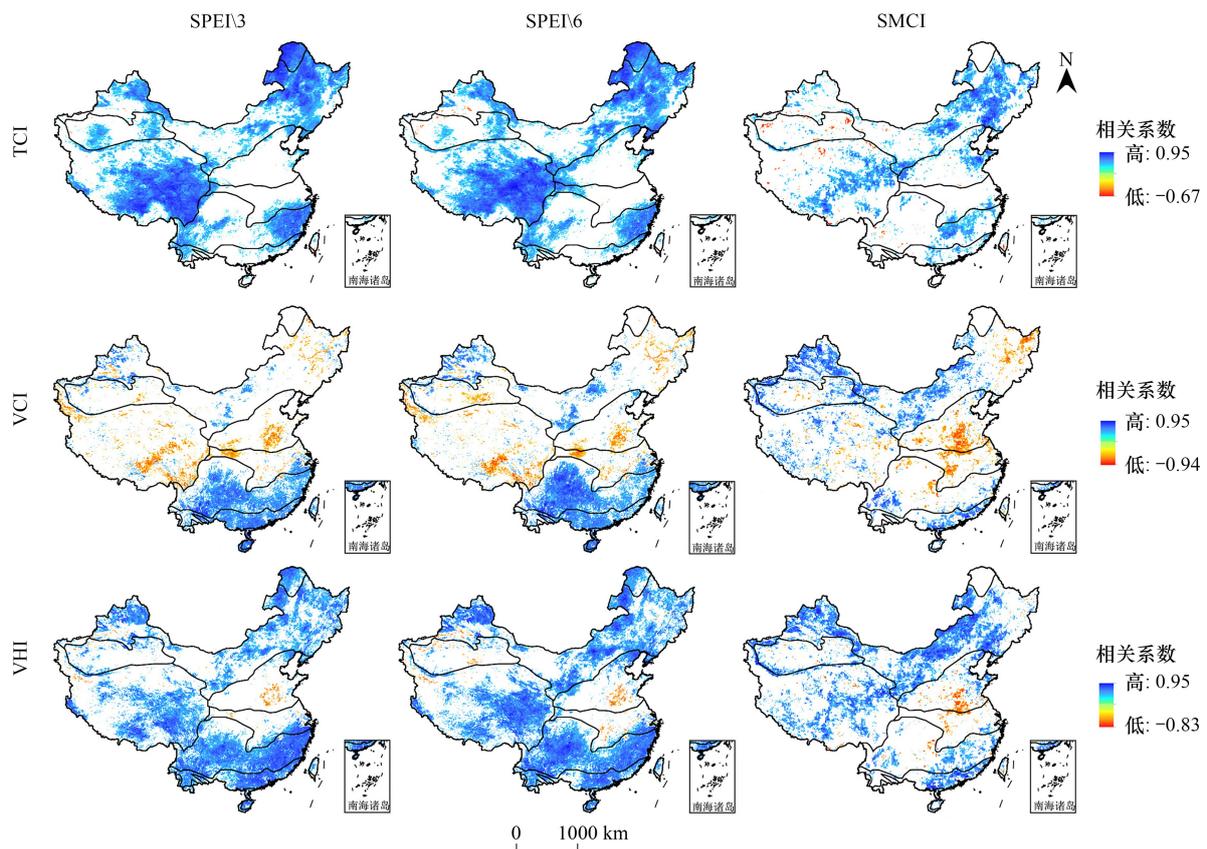


图 9 年干旱指数 TCI、VCI、VHI 与 SPEI\3、SPEI\6、SMCI 相关性的空间分布, 空值为不显著 ($P > 0.1$) 区域

Fig.9 Spatial distribution of correlations of annual mean TCI, VCI and VHI with SPEI\3, SPEI\6, and SMCI. The null values indicate insignificant correlations ($P > 0.1$)

SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; SMCI: 土壤湿度状态指数 Soil moisture condition index

根据 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 计算的月干旱频率分布如图 10 所示, 对比图 2 可以发现, TCI 和 VCI 监测的月干旱频率分布与 SPEI\3 和 SPEI\6 较为一致, 但在南温带和北亚热带的东部地区存在较大的差异; 而根据 VHI 监测的月干旱频率分布与 SMCI 较为一致, 但在中温带的西部地区差异明显。就不同气候区和整个研究区域平均而言(表 3), TCI 和 VCI 监测的月干旱频率与 SPEI\3 和 SPEI\6 较为接近, 明显高于 SMCI 的监测

结果。VHI 监测的月干旱频率明显低于 SPEI\3 和 SPEI\6,略高于 SMCI。以上分析表明,TCI、VCI 和 VHI 具有较强的大范围干旱监测能力。

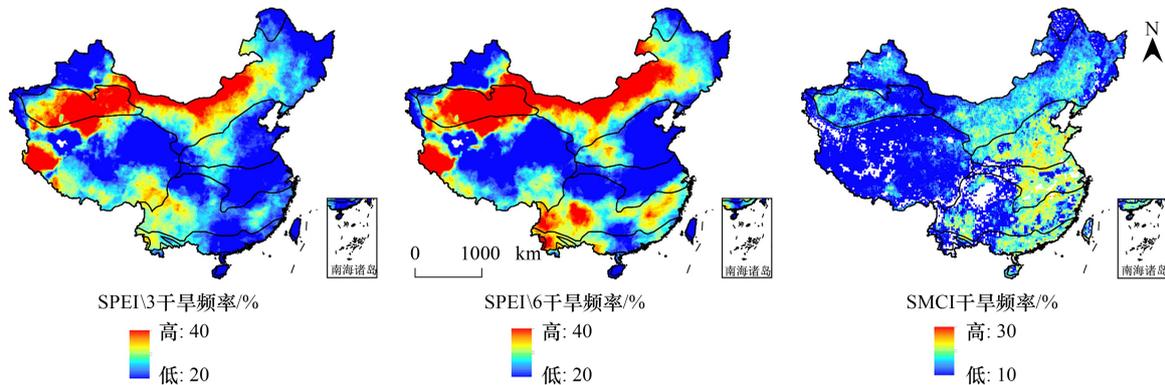


图 10 根据 2003—2016 年 SPEI\3、SPEI\6 和 SMCI 确定的月干旱频率分布

Fig.10 Frequency of monthly drought determined according to SPEI\3, SPEI\6 and SMCI from 2003 to 2016

表 3 不同指数计算的不同气候区中度及以上月干旱发生频率平均值/%

Table 3 Average frequency of monthly moderate and above drought in different climatic zones determined by different indices

气候区 Climatic zones	TCI	VCI	VHI	SPEI\3	SPEI\6	SMCI
北温带 North temperate zone	25.9	25.6	11.8	20.6	23.3	1.8
中温带 Central temperate zone	27.8	32.9	18.9	27.4	30.6	13.1
南温带 South temperate zone	27.8	29.5	19.2	30.0	31.6	14.9
北亚热带 North subtropical zone	28.0	26.6	18.4	18.9	19.8	16.0
中亚热带 Central subtropical zone	28.0	24.3	18.2	24.5	28.1	12.4
南亚热带 South subtropical zone	26.8	24.0	17.9	21.8	27.0	13.8
北热带 North tropical zone	25.5	22.7	17.7	21.4	25.0	10.7
中热带 Central tropical zone	22.6	21.9	17.7	15.7	18.4	15.9
高原气候区 Plateau climate zone	26.0	25.0	12.9	24.6	24.1	6.4
整个研究区域 The entire study area	27.0	28.0	17.0	26.0	28.0	11.0

4.2 干旱指数的变化特征

3 个干旱指数的变化趋势并不一致,VCI 与 VHI 变化趋势的空间分布基本相似,但与 TCI 存在较大的差异(图 3)。人工植树造林改善了我国的植被覆盖情况,表现为 NDVI 的显著增大^[51],从而导致全国大部分地区的 VCI 明显上升。在全球变暖的背景下我国气温显著增加,从而会导致地面温度的上升和 TCI 的降低^[51];在 VCI 明显上升的地区,植被覆盖度增大,部分抵偿气温升高导致的地表温度上升,气温和植被覆盖度变化的共同作用使得 TCI 变化趋势不明显。VHI 是 VCI 和 TCI 的平均值,在 VCI 明显增大、TCI 变化趋势不明显的地区,VHI 与 VCI 的变化趋势相似。相反,在 TCI 明显降低、VCI 变化趋势不明显的地区,VHI 与 TCI 的变化趋势相近。

VCI 和 VHI 的变化趋势表明,2003—2016 年期间我国大部分地区的干旱有所缓解,在南亚热带、中亚热带、中温带中部和北亚热带大部分地区尤为明显;但在南温带东部和高原气候区的部分地区,干旱有所加剧。TCI 指示,我国西部的部分地区在 2003—2016 年期间的干旱有所加剧。3 个干旱指数的变化趋势共同指示出我国南温带、中温带和高原气候区等部分地区变得更干燥,与图 2 中干旱频率较高的区域相吻合,表明发生极端干旱的可能性和频率相比其他区域会更高。

4.3 气候变化对干旱指数的影响

在全球变暖的背景下,气候变化引起的干旱可能会变得更加频繁,这给生态环境构成了巨大威胁^[52],研

究表明,区域气候变暖和水资源缺乏所引起的干旱是造成树木死亡率明显增加的主要原因^[53-54]。温度的升高会导致植被蒸散增加,而植被的蒸腾过程需要从土壤中获取水分,土壤缺水会使得植物根系受损和气孔阻力增加,导致蒸腾减少,从而减弱光合作用,由此阻碍植物生长^[55]。植被对温度的负响应关系早在上世纪就已有学者提出^[56],且这种关系与植被蒸腾和土壤湿度密不可分^[57-58],这与图 4 中 TCI 和 VHI 对温度变化的负相关结果相符合。然而,研究表明植被对温度的响应存在空间异质性。在中国大部分地区,VCI 与温度的偏相关系数大于 0,说明温度升高促进了植被生长、导致 VCI 增大^[59-60]。

降水的增加在导致地表温度降低的同时,促使土壤水分上升,有利于植被生长^[61]。图 5 表明,在大部分区域 3 个干旱指数与降水量之间显著正相关。但是,在南温带、北亚热带和北热带的部分地区,主要位于华北平原的东部地区,TCI 与降水量负相关。根据 TCI 的计算公式可见,温度上升、TCI 下降^[28],而地表温度取决于区域植被覆盖和地表土壤水分状况,降水的减少经常伴随着辐射的增加和气温的上升,在有灌溉或湿润地区,植被覆盖度反而会上升,导致地表温度的降低。在地表温度与降水量变化趋势一致的地区,TCI 难以有效监测干旱状况^[61-62]。

4.4 地表覆盖变化对干旱指数的影响

气候变化和人类活动等元素所导致的地表覆盖变化对区域内干旱的影响巨大^[63-64]。裸土转变为植被,会导致地表反射率的降低和净太阳辐射的升高,从而导致潜热和显热的增大。且植被覆盖的地表面相对于裸土覆盖的地表面粗糙度更大,湍流更强,空气和水汽混合动力阻力更小^[65],蒸腾的增加会导致区域内大气湿度的上升,从而改变当地降水和水文过程^[66]。

总体而言,如图 7 和 8 所示,在大部分区域裸土覆盖率的降低和树木覆盖率的增加会导致地表温度的降低、NDVI 的上升和干旱指数的增大,这与许多研究结果一致^[67-70]。研究表明,1982—2020 年期间高原气候区的大部分区域 NDVI 显著上升、其东部及南部部分区域的 NDVI 下降^[71]。本文分析发现,在高原气候区内,树木的覆盖度降低、而低矮植被的覆盖度明显上升,大面积低矮植被的增加导致该地区 NDVI 显著上升,使得树木覆盖度与 VCI 和 VHI 的负相关,有别于其他气候区。

5 结论

基于气温、降水及多源遥感数据,采用趋势分析和偏相关分析方法,本文研究了 2003—2016 年中国 3 个干旱指数的时空变化特征、干旱发生的频率以及干旱指数对气候和地表覆盖变化的响应。主要结论如下:

2003—2016 年期间,中国大部分地区的月干旱发生频率为 20%—30%,其中中温带中部和南温带部分地区的干旱频率更高。干旱指数的变化趋势表明,大部分区域的干旱缓解和局部的干旱加剧。干旱缓解主要分布在北温带、中温带的东北部、北亚热带、中亚热带和南亚热带的大部分地区。而干旱加剧的区域主要分布在南温带、北亚热带等沿海地区以及高原气候区的部分地区。

大多数气候区内,干旱指数对温度的响应不一致,温度上升会导致 TCI 和 VHI 降低(干旱加重)、VCI 的上升(干旱减轻)。所以,利用这 3 个指数监测温度上升导致的干旱时会得出不一致的结论。在大部分区域,3 个干旱指数与降水量正相关,他们在监测降水减少导致的干旱时有较好的一致性。裸土覆盖率降低和树木覆盖率上升会导致干旱指数的上升,而低矮植被覆盖率变化的对干旱指数的影响存在空间差异,取决于低矮植被覆盖度的变化是源于裸土还是树木覆盖度的变化。在利用基于遥感的干旱指数监测干旱时,要考虑地表覆盖变化的作用。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Summary for Policy Makers of the Synthesis Report of the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张强, 张良, 崔显成, 曾剑. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- [3] Kogan F, Guo W. Early twenty-first-century droughts during the warmest climate. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(1): 127-137.
- [4] 陈怀亮, 张红卫, 刘荣花, 余卫东. 中国农业干旱的监测、预警和灾损评估. 科技导报, 2009, 27(11): 82-92.

- [5] Palmer W C. Meteorological drought. Washington; US Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [6] Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 2007, 21(5) : 821-833.
- [7] Anderson M C, Zolin C A, Sentelhas P C, Hain C R, Semmens K, Yilmaz T M, Gao F, Otkin J A, Tetrault R. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174.
- [8] McKee T, Doesken N, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993.
- [9] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7) : 1696-1718.
- [10] Guo H, Bao A M, Liu T, Ndayisaba F, Jiang L L, Zheng G X, Chen T, de Maeyer P. Determining variable weights for an Optimal Scaled Drought Condition Index (OSDCI) : evaluation in Central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231 : 111220.
- [11] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12) : 2875-2887.
- [12] Gidey E, Dikinya O, Sebego R, Segesebe E, Zenebe A. Analysis of the long-term agricultural drought onset, cessation, duration, frequency, severity and spatial extent using Vegetation Health Index (VHI) in Raya and its environs, Northern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 2018, 7(1) : 1-18.
- [13] Seiler R A, Kogan F, Sullivan J. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Advances in Space Research*, 1998, 21(3) : 481-484.
- [14] Kogan F N. Contribution of remote sensing to drought early warning. *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*, 2000.
- [15] Marumbwa F M, Cho M A, Chirwa P W. An assessment of remote sensing-based drought index over different land cover types in southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(19) : 7368-7382.
- [16] Kogan F N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions. *Proceedings of 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, 1987.
- [17] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(8) : 1405-1419.
- [18] 曲学斌, 吴昊, 越昆, 刘朋涛, 李翕然. 4 种遥感干旱指数在内蒙古东部干旱监测中的对比研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1) : 81-88.
- [19] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 吴新玲. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应. *生态学报*, 2018, 38(3) : 1028-1039.
- [20] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 张小飞. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化. *生态学报*, 2007, 27(11) : 4563-4575.
- [21] 李新尧, 杨联安, 聂红梅, 任丽, 胡胜, 杨煜岑. 基于植被状态指数的陕西省农业干旱时空动态. *生态学杂志*, 2018, 37(4) : 1172-1180.
- [22] Wang Y P, Liu W Z, Li G, Yan W M, Gao G Y. A bibliometric analysis of soil and water conservation in the loess tableland-gully region of China. *Water*, 2018, 11(1) : 20.
- [23] Kogan F, Salazar L, Roytman L. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(9) : 2798-2814.
- [24] Liu W L, Wang S X, Zhou Y, Wang L T, Zhu J F, Wang F T. Lightning-caused forest fire risk rating assessment based on case-based reasoning: a case study in DaXingAn Mountains of China. *Natural Hazards*, 2016, 81(1) : 347-363.
- [25] Salazar L, Kogan F, Roytman L. Using vegetation health indices and partial least squares method for estimation of corn yield. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(1) : 175-189.
- [26] Bayarjargal Y, Karnieli A, Bayasgalan M, Khudulmur S, Gandush C, Tucker C J. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1) : 9-22.
- [27] Jiao W Z, Zhang L F, Chang Q, Fu D J, Cen Y, Tong Q X. Evaluating an enhanced Vegetation Condition Index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental United States. *Remote Sensing*, 2016, 8(3) : 224.
- [28] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11) : 91-100.
- [29] Kogan F. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2002, 83(48) : 557.
- [30] Han Y, Li Z Y, Huang C, Zhou Y Y, Zong S W, Hao T Y, Niu H F, Yao H Y. Monitoring droughts in the greater Changbai Mountains using multiple remote sensing-based drought indices. *Remote Sensing*, 2020, 12(3) : 530.
- [31] Zou L D, Cao S, Sanchez-Azofeifa A. Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests.

- International Journal of Biometeorology, 2020, 64(4): 701-711.
- [32] Yang W Z, Guo W, Kogan F. VIIRS-based high resolution spectral vegetation indices for quantitative assessment of vegetation health: second version. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(21): 7417-7436.
- [33] Jiang R G, Liang J C, Zhao Y, Wang H, Xie J C, Lu X X, Li F W. Assessment of vegetation growth and drought conditions using satellite-based vegetation health indices in Jing-Jin-Ji region of China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13775.
- [34] Singh R P, Roy S, Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(22): 4393-4402.
- [35] Kogan F, Adamenko T, Guo W. Global and regional drought dynamics in the climate warming era. Remote Sensing Letters, 2013, 4(4): 364-372.
- [36] Li B, Su H B, Chen F, Wu J J, Qi J W. The changing characteristics of drought in China from 1982 to 2005. Natural Hazards, 2013, 68(2): 723-743.
- [37] Pei F S, Wu C J, Liu X P, Li X, Yang K Q, Zhou Y, Wang K, Xu L, Xia G R. Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 215-227.
- [38] Zhao S, Cong D, He K, Yang H, Qin Z. Spatial-temporal variation of drought in China from 1982 to 2010 based on a modified temperature vegetation drought index (mTVDI). Scientific Reports, 2017, 7: 17473.
- [39] Didan, K. MOD13A3 MODIS/Terra vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V006, 2015.
- [40] 占文凤, 洪发路, 陈阳毅. 2003—2019 年全球逐日 1km 分辨率地表温度日均温产品数据集, 国家生态科学数据中心, 2021.
- [41] Hansen, M., Song, X. Vegetation Continuous Fields (VCF) Yearly Global 0.05 Deg, 2018.
- [42] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901—2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [43] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1): 52-57.
- [44] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, Albrecht F, Balsamo G, Brocca L, Chung D, Ertl M, Forker M, Gruber A, Haas E, Hamer P D, Hirschi M, Ikonen J, de Jeu R, Kidd R, Lahoz W, Liu Y Y, Lecomte P. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: state-of-the art and future directions. Remote Sensing of Environment, 2017, 203: 185-215.
- [45] Gruber A, Scanlon T, Van D S R, Wagner W, Dorigo W. Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. Earth System Science Data, 2019, 11(2): 717-739.
- [46] Zhang A Z, Jia G S. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 12-23.
- [47] Zhang L F, Jiao W Z, Zhang H M, Huang C P, Tong Q X. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 96-106.
- [48] Zhao X Y, Xia H M, Liu B Y, Jiao W Z. Spatiotemporal comparison of drought in Shaanxi-Gansu-Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1570.
- [49] 王涛, 杨梅焕. 榆林地区植被指数动态变化及其对气候和人类活动的响应. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1133-1140.
- [50] Huang F, Xu S L. Spatio-temporal variations of rain-use efficiency in the west of Songliao plain, China. Sustainability, 2016, 8(4): 308.
- [51] Xue Y X, Lu H W, Guan Y L, Tian P P, Yao T C. Impact of thermal condition on vegetation feedback under greening trend of China. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147380.
- [52] Zhang X Q, Lei Y C, Pang Y, Liu X Z, Wang J Z. Tree mortality in response to climate change induced drought across Beijing, China. Climatic Change, 2014, 124(1/2): 179-190.
- [53] Phillips O L, Aragão L E O C, Lewis S L, Fisher J B, Lloyd J, López-González G, Malhi Y, Monteagudo A, Peacock J, Quesada C A, Van D H G, Almeida S, Amaral I, Arroyo L, Aymard G, Baker T R, Bánki O, Blanc L, Bonal D, Brando P, Chave J. Drought sensitivity of the amazon rainforest. Science, 2009, 323(5919): 1344-1347.
- [54] Peng C, Ma Z, Lei X, Zhu Q, Chen H, Wang W, Liu S, Li W, Fang X, Zhou X. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. Nature Climate Change, 2011, 1(9): 467-471.
- [55] 刘永强. 植被对干旱趋势的影响. 大气科学, 2016, 40(1): 142-156.
- [56] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 940-948.
- [57] Nemani R, Pierce L, Running S, Goward S. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. Journal of Applied Meteorology,

- 1993, 32(3): 548-557.
- [58] Boegh E, Soegaard H, Hanan N, Kabat P, Lesch L. A remote sensing study of the NDVI-Ts relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Sahel based on high-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(3): 224-240.
- [59] Karnieli A, Bayasgalan M, Bayarjargal Y, Agam N, Khudulmur S, Tucker J C. Comments on the use of the vegetation health index over Mongolia. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(9-10): 2017-2024.
- [60] Sun D L, Kafatos M. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): 24406.
- [61] 彭攀, 王让会, 蒋焯林, 吴晓全. 植被-地温指数(NDVI-LST)在新疆干旱监测中的适用性. *生态学报*, 2018, 38(13): 4694-4703.
- [62] Meng X H, Evans J P, McCabe M F. The impact of observed vegetation changes on land-atmosphere feedbacks during drought. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(2): 759-776.
- [63] 李斌, 王慧敏, 秦明周, 张鹏岩. NDVI、NDMI 与地表温度关系的对比研究. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 585-596.
- [64] 李秀花, 师庆东, 郭娟, 巴音达拉, 常顺利, 齐家国. 中国西北干旱区 1981—2001 年 NDVI 对气候变化的响应分析. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 12-16.
- [65] Liu S, Lu L, Mao D, Jia L. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 769-783.
- [66] Ellison D N, Futter M, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806-820.
- [67] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101(428): 193-202.
- [68] Charney J, Quirk W J, Chow S H, Kornfeld J. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, 34(9): 1366-1385.
- [69] Zeng N, Neelin J D, Lau K M, Tucker C J. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 1999, 286(5444): 1537-1540.
- [70] 丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 613-621.
- [71] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 马伟东, 刘峰贵, 陈琼, 周强, 夏兴生, 牛百成. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应. *生态学报*, 2022, 42(12): 4770-4783.