黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制

李家誉[1,2]，佘敦先[1,2]，张利平[1,2]，夏 军[1,2]，
刘哲琼[1,2]，王绿绿[1,2]，齐贵增[3]，邓翠玲[4]
(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，武汉 430072；2.海绵城市建设与水系统科学湖北省重点实验室，武汉 430072；3.西北大学城市与环境学院，西安 710127；4.澜湄水资源合作中心，北京 100038)

摘要：基于黄土高原 1983—2015 年间的植被状况指数(VCI)与 1～48 个月尺度的标准化降水蒸散发指数(SPEI)和标准化降水指数(SPI)，利用 Pearson 相关系数法、线性回归法和 Mann-Kendall 趋势检验法等方法研究了黄土高原地区植被对气象干旱的多时间尺度时空响应特征。结果表明：(1)1983—2015 年，黄土高原植被状况整体趋于改善，但黄土高原整体干湿状况变化趋势不大。(2)黄土高原绝大部分区域植被变化与气象干旱指数呈现显著正相关关系，表明植被活动受到水分的限制较强。但是，过去几十年，黄土高原地区植被受到水分限制的影响程度有逐渐减轻的趋势。(3)黄土高原植被对短时间尺度的水分盈亏变化相对敏感，尤其是耕地和草地对 1～4 个月的 SPEI 更为敏感，而林地对 SPEI 的响应时间尺度较为分散。黄土高原 VCI 与 SPEI、SPI 的最大相关系数均主要出现在生长季(4—10 月)，表明水分条件在生长季对植被活动的影响较为显著。

关键词：黄土高原；植被状况指数；气象干旱；标准化降水蒸散发指数；标准化降水指数
中图分类号：Q948.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)06-0280-10
DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.034

Multi-scale Response Characteristics and Mechanism of Vegetation to Meteorological Drought on the Loess Plateau

LI Jiayu[1,2], SHE Dunxian[1,2], ZHANG Liping[1,2], XIA Jun[1,2],
LIU Zheqiong[1,2], WANG Lülü[1,2], QI Guizeng[3], DENG Cuiling[4]
(1.*State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072; 2.*Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan* 430072; 3.*College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an* 710127; 4.*Lancang-Mekong Water Resources Cooperation Center, Beijing* 100038)

Abstract: In this study, based on Vegetation Condition Index (VCI) of the Loess Plateau from 1983 to 2015, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and the Standardized Precipitation Index (SPI) at the scale of 1～48 months, we investigated the spatial-temporal response characteristics of vegetation to meteorological drought index at multi time-scales on the Loess Plateau through Pearson correlation coefficientmethod, linear regression method and Mann Kendall trend test method. The results showed that: (1) The overall vegetation condition of the Loess Plateau improved, but no significant drying or wetting trend could be detected in the study area during 1983 and 2015. (2) The change of vegetation was well positively correlated to the meteorological drought index in most areas of the Loess Plateau, indicating that the vegetation growth was largely restricted by the moisture in the study area. However, in the past few decades, such restriction effect from atmospheric moisture to the vegetation was gradually weakening. (3) The vegetation on the Loess Plateau was relatively much more sensitive to the change of water balance at a short time sale, the cultivated land and grassland were more sensitive to the SPEI of 1～4 months, while the response time-scale of forest land to SPEI was relatively scattered. Furthermore, the maximum correlation

收稿日期：2022-03-24
资助项目：国家自然科学基金面上项目(41877159,52179023)
第一作者：李家誉(1996—)，男，硕士研究生，主要从事区域干旱与植被响应研究。E-mail：lijiayuwhu2015@whu.edu.cn
通信作者：张利平(1972—)，男，教授，主要从事水文水资源研究。E-mail：zhanglp@whu.edu.cn

coefficient between VCI and SPEI or SPI on the Loess Plateau mainly occurred during the growing season (April to October), indicating that the water conditions had a much more significant effect on vegetation growth during growing season.

Keywords: the Loess Plateau; VCI; meteorological drought; SPEI; SPI

陆地植被是地球生态系统中重要的组成要素,也是地球碳、水和能量循环的重要纽带。水分条件贯穿植被的整个生长过程,是影响植被生长活动的关键环境因素之一,尤其是干旱半干旱地区植被生长受水分制约更为明显[1]。干旱作为世界上破坏性最大、带来损失最高的自然灾害之一,是当前陆地生态系统碳汇功能的重要胁迫因子,也是影响陆地植被变化最重要的因素之一[2]。在当今全球变化下,众多证据[1-3]表明,日益频发的干旱事件将显著抑制陆地植被生长,对陆地生态系统造成更严重、更持久且不可恢复的破坏,给陆地生态系统碳汇功能造成极大威胁。干旱一般分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱 4 种类型,其中气象干旱通常是指在一段时间内,蒸发量和降水量的收支不平衡,水分支出大于水分收入而造成的水分短缺现象[4]。在各种干旱类型中,气象干旱表现得最为直接,也是其他类型干旱发生的先导。气象干旱对植被的影响与植被类型、干旱持续的时间等因素相关,不同区域及不同类型的植被对水分需求不同,对气象干旱的响应也不尽相同,呈现出较大的空间分异性[3]。因此,明晰不同区域植被对气象干旱的响应特征对缓解气象干旱对植被系统的影响,以及因地制宜地制定抗旱对策等均具有重要意义。

已有众多研究表明,植被对气象干旱的响应具有多时间尺度的特征,如 Vicente-Serrano 等[3]利用标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)分析全球植被对气象干旱的响应特征指出,全球 72%的植被覆盖地区归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)与 SPEI 有显著相关性,植被对干旱的响应与干旱时间尺度关系密切,在空间上存在明显差异;孔冬冬等[5]对中国地区不同植被类型对干旱的响应研究表明,草地对短时间尺度 SPEI 较为敏感,灌木和森林次之,且多年平均水平衡在植被对干旱的响应中起关键作用,但在降水丰沛地区与高寒地区,NDVI 与 SPEI 相关性较弱;齐贵增等[6]研究发现,我国秦岭地区南北坡植被对不同时间尺度的干旱响应存在差异;也有研究[3]表明,区域植被状况与水分变化有较好的相关性,特别是在植被生长受水分影响明显的区域。但是,受气候特征、植被类型等多方面的影响,不同的区域植被对气象干旱的响应特征具有较强的时空变异性。

黄土高原位于我国典型气候敏感区,是全国干旱灾害最频繁的地区之一,也是当前研究植被对干旱响应的热点区域之一[7]。在全球变化及人类活动的双重影响下,黄土高原干旱的发生频次、影响范围与持续时间均在增加,对生态环境以及社会经济带来严重的威胁[8]。同时,黄土高原作为全世界水土流失最为严重的地区之一,黄土区广,植被生长环境恶劣[9]。为防治黄土高原地区水土流失问题,我国在黄土高原实施了一系列的植被恢复工程,特别是“三北防护林”和“退耕还林(草)”工程实施后,该地区植被覆盖率持续增加,从 1999 年的 31.6%增加到 2013 年的 59.6%[7],黄土高原生态环境得到初步改善。然而,大面积的植被恢复活动可能超出黄土高原的承载能力,少雨区域的植被已经出现退化甚至死亡,黄土高原的可用水资源量也因大规模的植被恢复工程趋于紧张[10]。因此,开展该地区植被对气象干旱的响应特征分析,以及水分限制对植被生长状况的影响研究对理解植被对干旱的响应机制具有重要的科学意义[11]。

本文以黄土高原地区作为研究区域,采用植被状态指数(vegetation condition index, VCI)作为监测地表植被生长状况的指标,选用 SPEI 和标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)2 种指数作为表征气象干旱的指标,分析 1983—2015 年黄土高原植被状况的变化情况,及其对气象干旱指数的多时间尺度响应特征,研究结果可为黄土高原植被恢复与建设、水资源管理与利用等提供理论基础与科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

黄土高原地处北纬 33°45′—41°15′,东经 100°57′—114°27′,位于中国第二阶梯,地势总体呈现西北高、东南低的空间分布格局。黄土高原跨越我国多个行政区,包括青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省,面积达 64 万 km^2(图 1)。该区域气候属于温带大陆性气候,夏热冬冷,降水量从东南向西北递减,多集中于夏秋季[8]。黄土高原是世界最大黄土区,黄土占地面积达 60 万 km^2 以上,区域内土壤流失严重,水资源紧张,生态系统整体较为脆弱[10]。

1.2　数据来源

1.2.1　*归一化植被指数*　归一化植被指数为全球监测与模型组(global inventor modeling and mapping

studies，GIMMS）从先进甚高分辨率辐射仪（advanced very high resolution radiometer，AVHRR）获得的第 3 代 NDVI 数据（GIMMS－NDVI3g）v1 版本，时间跨度为 1982—2015 年，空间分辨率为 1/12°，时间分辨率为 15 天。GIMMS－NDVI3g 数据对云量、传感器退化、传感器间的差异等影响因素进行了校正。本文提取出黄土高原 1983—2015 年数据，并在每月取 2 个 15 天的最大值合成为逐月数据。为便于进行分析，使用 Spline 插值法将 NDVI 数据重采样至空间分辨率为 0.1°。考虑到 NDVI 值小于 0.1 的区域多为无植被覆盖区域，本文实际分析时未考虑该部分区域[5]。

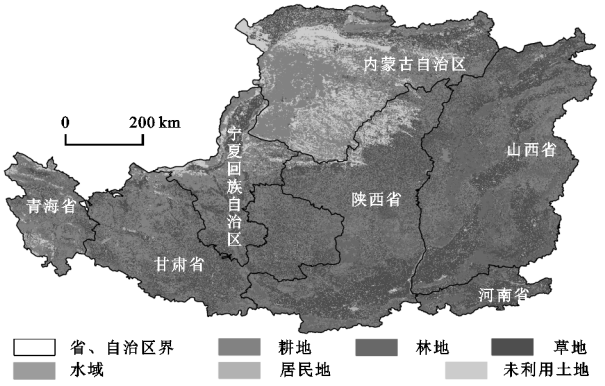


图 1 1990 年黄土高原土地利用类型

1.2.2 气象数据 本文所使用的气象数据源自国家青藏高原科学数据中心的中国区域地面气象要素驱动数据集[12-14]，包括地面降水率、近地面 2 m 气温、近地面 2 m 气压、近地面 2 m 空气比湿、近地面 10 m 全风速、地面向下短波辐射等。该数据集时间跨度为 1979—2018 年，空间分辨率为 0.1°，时间分辨率为 3 h，提取出黄土高原 1983—2015 年数据合成为逐日数据，并根据 FAO Penman－Monteith 公式计算得到潜在蒸散发（potential evapotranspiration，PET）并合成为逐月数据[4]，计算方法为：

$$\mathrm{PET}=\frac{0.408\triangle(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\triangle+\gamma(1+0.34\,u_2)} \tag{1}$$

式中：PET 为潜在蒸散发（mm/d）；△为饱和水汽压曲线斜率（kPa/℃）；R_n 为地表净辐射［MJ/（m·d）］；G 为土壤热通量［MJ/（m²·d）］；γ 为干湿表常数（kPa/℃）；T 为日平均气温（℃）；u_2 为 2 m 高处风速（m/s）；e_s 为饱和水汽压（kPa）；e_a 为实际水汽压（kPa）。

1.2.3 土地利用数据 本文所使用的土地利用类型数据源自中国科学院资源环境科学数据中心 1990 年和 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据[15]。该数据主要是以 Landsat TM/ETM 遥感影像为数据源，包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型，空间分辨率为 1 km，提取出黄土高原数据并重采样至空间分辨率为 0.1°。

1.3 研究方法

1.3.1 植被变化指标 植被状态指数通过对研究时期内的 NDVI 值归一化处理，得到表征植被在研究时段内相对生长状况的值，消除地理位置等因素的影响，可以更准确地表示植被在研究时段的变化情况，且 VCI 越大，植被生长状况相对越好。该指数目前被广泛应用于研究植被的时空变化及其对气候的响应研究[16]。具体计算方法为：

$$\mathrm{VCI}_{i,j}=100\times\frac{\mathrm{NDVI}_{i,j}-(\mathrm{NDVI}_{i,j})_{\min}}{(\mathrm{NDVI}_{i,j})_{\max}-(\mathrm{NDVI}_{i,j})_{\min}} \tag{2}$$

式中：$\mathrm{VCI}_{i,j}$ 和 $\mathrm{NDVI}_{i,j}$ 分别表示特定年份第 i 个格点第 j 个月的 VCI 和 NDVI 值；$(\mathrm{NDVI}_{i,j})_{\max}$ 和 $(\mathrm{NDVI}_{i,j})_{\min}$ 分别表示第 i 个格点的 j 月多年序列中的最大值和最小值。

1.3.2 气象干旱指标 本文选用 SPI 和 SPEI 2 种气象干旱指标来表征气象干旱的变化情况[4]。该 2 种气象干旱指数因计算简单、数据获取容易以及可以刻画不同时间尺度旱涝变化情况而得到广泛的应用。其主要计算过程为：

采用一定的概率统计分布拟合降水（P）或水分盈亏（P－PET）序列：

$$\mathrm{SPI}|\mathrm{SPEI}=\Phi^{-1}(F(D_n^k)) \tag{3}$$

式中：$\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态逆变化；D_n^k 为待分析的变量，表示 P 或 P－PET 在不同时间尺度上的聚合，计算方法为

对于 SPI：

$$D_n^k=\sum_{i=0}^{k-1}(P_{n-i}),n\geqslant k \tag{4}$$

对于 SPEI：

$$D_n^k=\sum_{i=0}^{k-1}(P_{n-i}-\mathrm{PET}_{n-i}),n\geqslant k \tag{5}$$

式中：n 为计算时的月数；k 为聚合的时间尺度，本文中 $k=1,2,3,\cdots,48$，表示 1～48 个月共 48 种时间尺度。

$F(\cdot)$ 为拟合 P 或 P－PET 的概率统计分布，计算方法为：

对 SPI 来说，常采用 Γ 分布概率分布拟合月 P 序列，参数采用极大似然法估算：

$$F(x)=\frac{1}{\Gamma(\gamma)}\int_0^x\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1}\mathrm{e}^{-\frac{x}{\beta}}\mathrm{d}\,\frac{x}{\beta},x>0 \tag{6}$$

由于 Γ 分布不包括降水量为 0 的情况，所以 $P=0$ 时的事件概率为：

$$F(x=0)=\frac{m}{N} \tag{7}$$

式中：m 为降水量为 0 的样本数；N 为总样本数。

对 SPEI 来说，常采用三参数 Log-Logistic 概率分布拟合月 P－PET 序列，参数采用线性矩法估算：

$$F(x)=\left[1+\left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{8}$$

1.3.3　相关性分析与趋势诊断方法　本文使用 Pearson 相关系数描述黄土高原气象干旱(SPEI、SPI)与植被状况(VCI)之间的相关性[3]。对于 VCI,每个格点有 12 个(1～12 月)VCI 序列,对于 SPEI 和 SPI,每个格点有 48 个不同时间尺度(1～48 个月时间尺度)的序列。分别计算每个格点不同时间尺度 SPEI、SPI 与 VCI 对应月份的序列的相关系数,则每个格点每种相关系数(即 SPEI 与 VCI、SPI 与 VCI 2 种)均有 576(12×48)个相关系数值。分别取 576 个对应相关系数值中的最大值定义为最大相关系数 $R_{\text{SPEI-VCI}}$、$R_{\text{SPI-VCI}}$,计算公式为:

$$R_{i,j}=\begin{cases}\max[\text{corr}(\text{SPEI}_{i,j},\text{VCI}_i)]\\ \max[\text{corr}(\text{SPI}_{i,j},\text{VCI}_i)]\end{cases} \tag{9}$$

式中:$R_{i,j}$为第 i 月 j 个时间尺度下的最大相关系数,表明 SPEI 与 SPI 对应的水分变化(SPEI 对应水分盈亏,SPI 对应降水)对植被活动的控制程度,正相关表示干旱指数与植被状况的相关性较好,且相关系数越大,表明植被受大气水分的控制越强;相关系数小表示干旱指数与植被状况的相关性较差。max(·)表示取最大值;corr(·,·)表示 Pearson 相关系数;$\text{SPEI}_{i,j}$、$\text{SPI}_{i,j}$分别表示第 i 月 j 个时间尺度下的 SPEI、SPI 序列值;VCI_i表示 VCI 的第 i 月序列值。

最大相关系数对应的时间尺度分别记为 $Rs_{\text{SPEI-VCI}}$、$Rs_{\text{SPI-VCI}}$,可以反映区域植被对不同时间尺度气象干旱的敏感性,短(长)时间尺度且正相关表示植被对气象干旱的响应较快(慢)。最大相关系数对应发生的月份分别记为 $Rm_{\text{SPEI-VCI}}$、$Rm_{\text{SPI-VCI}}$,用来分析 VCI 对 SPEI 和 SPI 响应的季节性差异。

本文采用线性趋势诊断法和 Mann-Kendall 趋势检验法检测各待分析变量的变化趋势,取置信水平 $\alpha=0.05$。

2　结果与分析

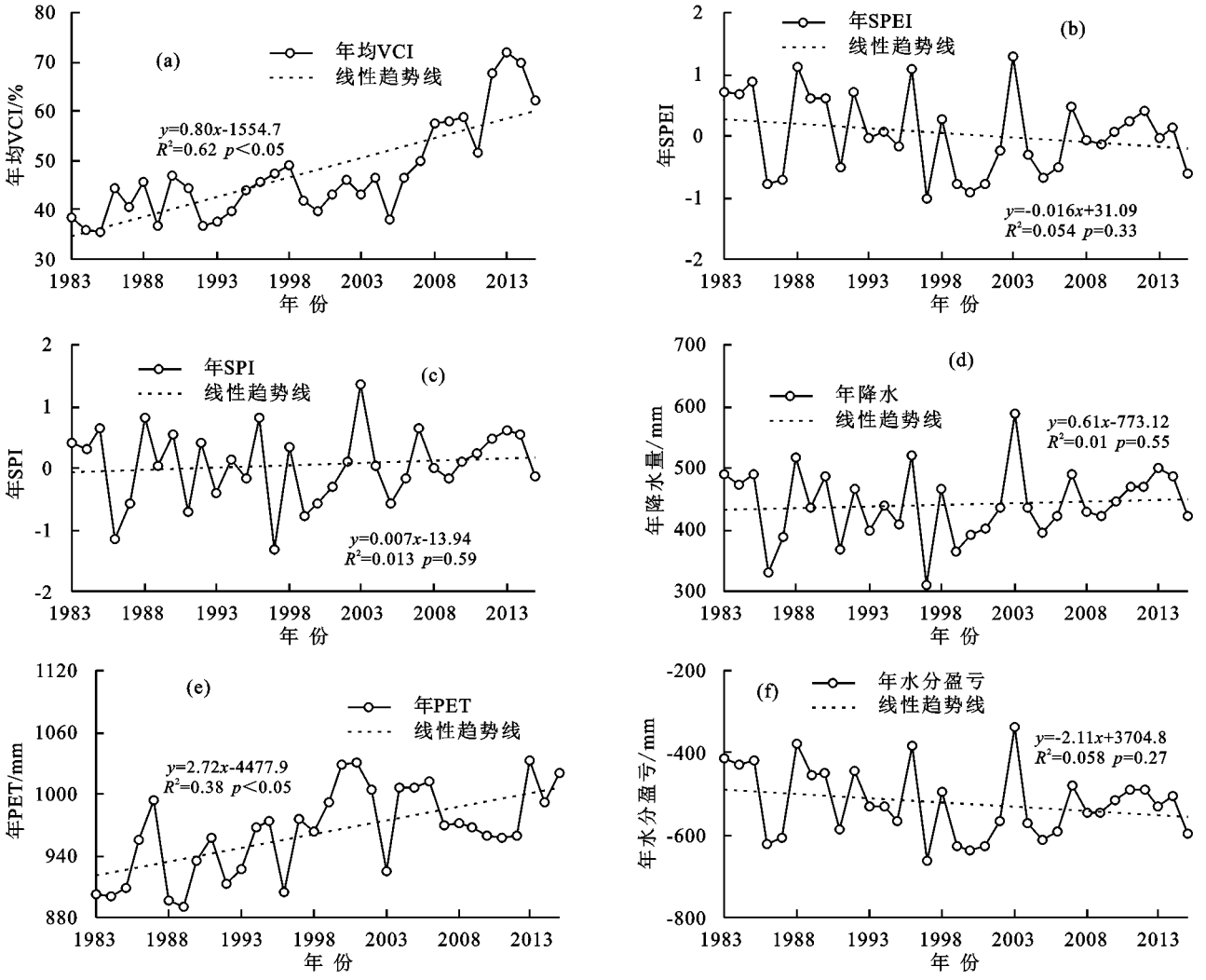
2.1　黄土高原植被指数、气象干旱指数和气象要素的时空变化趋势

本文统计了黄土高原地区年均 VCI、年 SPEI、年 SPI、年降水、年 PET 和年水分盈亏量的变化情况(图 2),其中年均 VCI 为每年 12 个月的平均值,年 SPEI 与年 SPI 取为当时间尺度为 12 个月时每年 12 月份的 SPEI 和 SPI 值。结果显示,1983—2015 年间,黄土高原地区年均 VCI 呈现显著上升趋势($p<0.05$,图 2a),表明黄土高原植被状况整体趋于改善,这与 Chen 等[7]的研究结论一致。从年 SPEI 和年 SPI 变化趋势来看(图 2b、图 2c),黄土高原地区过去几十年并未呈现出显著的变干或者变湿的趋势($p>0.05$)。值得注意的是,年 SPI 呈微弱上升的趋势,而年 SPEI 呈微弱下降趋势,表明干旱指标的选取对干湿趋势的诊断有一定的影响[17]。从影响因素来看,1983—2015 年黄土高原年降水量呈不显著的上升趋势,增加的幅度为 0.61 mm/a(图 2d),年潜在蒸散发量呈显著上升趋势,增加的幅度为 2.72 mm/a(图 2e),年水分盈亏量呈不显著的下降趋势,下降幅度为 2.11 mm/a(图 2f),表示黄土高原的大气水分呈不显著的减少趋势。SPI 的计算只考虑了降雨的影响,而 SPEI 的计算考虑了降雨和潜在蒸散发共同的影响,这导致了二者对黄土高原地区干湿趋势判断的不同。已有大量研究[3,18]表明,SPEI 因为同时考虑了降雨和蒸散发的影响,更适合表征气象干旱的变化。

从 1983—2015 年各要素线性变化趋势的空间分布(图 3)来看,黄土高原绝大部分地区(92.9%)的年均 VCI 呈上升趋势,76.1%的地区经 Mann-Kendall 趋势检验法检验为显著上升趋势(图 3a),表明研究区大部分区域在过去几十年植被恢复显著,这主要与区域内实施的大规模植被恢复与植被保护工程有关[10]。Li 等[19]采用 NDVI 分析了黄土高原地区植被的空间变化情况,与本文得到的结论一致。从年 SPEI 变化的空间分布(图 3b)来看,黄土高原有 76.7%的地区呈现干旱化趋势,主要分布在黄土高原境内甘肃省、陕西省、宁夏回族自治区大部以及山西省东部;23.3%的地区的年 SPEI 呈湿润化趋势,主要分布在毛乌素沙地西南部、包头以及吕梁山脉北部。年 SPI 的变化趋势空间分布(图 3c)则显示 68.2%的地区呈现湿润化趋势,分布在黄土高原中部大部分地区;31.8%的地区呈现干旱化趋势,集中在黄土高原西南部及陕西省南部。黄土高原年降水的变化趋势空间分布(图 3d)与年 SPI 的类似,年水分盈亏的变化趋势空间分布(图 3f)与年 SPEI 的相似。黄土高原大部分地区(89.7%)的年潜在蒸散发为上升趋势,63.9%的地区为显著上升趋势(图 3e),与年 SPEI 下降趋势区域大致相似,这与黄土高原地区潜在蒸散发的变化对 SPEI 变化影响较大有关[18]。

2.2　黄土高原植被对气象干旱的多尺度响应差异

2.2.1　黄土高原植被受气象干旱控制程度差异　$R_{\text{SPEI-VCI}}$的空间分布结果(图 4a)显示,绝大多数区域(91.7%)SPEI 与 VCI 均呈现出显著的正相关关系,其余 8.3%的地区呈现不显著的正相关关系,主要分布在毛乌素沙地、五台山与黄土高原西南部小部分区域。$R_{\text{SPI-VCI}}$的空间分布(图 4b)与 $R_{\text{SPEI-VCI}}$相似,SPI 与 VCI 有 96.8%的地区呈现显著正相关,占据黄土高原绝大部分地区;3.2%的地区呈现不显著的正相关关系,主要分布在黄土高原南部的部分区域。



注：p 值为 Mann-Kendall 趋势检验的显著性水平。

图 2 1983—2015 年黄土高原年均 VCI、年 SPEI、年 SPI、年降水量、年潜在蒸散发、年水分盈亏的时间变化趋势

$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 为正表示该地区植被活动受到大气水分的限制，即水分增多，植被生长状况改善；水分减少，植被生长状况变差[11]。黄土高原绝大部分区域 SPEI、SPI 与 VCI 的正相关性均较为显著，说明这些地区植被状况受到的大气水分控制较强。$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 较小的区域，表示该地区在某些时段植被活动受水分盈亏或降水影响不大，可能其他因素有关（如受人类活动影响、CO_2 的施肥效应等）[17]。

本文进一步分析了过去几十年黄土高原地区植被与 SPEI 和 SPI 最大相关系数的变化情况。以 10 年为滑动窗口期，分别计算滑动窗口期的 SPEI、SPI 与 VCI 的最大相关系数，利用线性趋势诊断法计算最大相关系数的变化趋势及其空间分布状况（图 5a 和图 5b）。结果显示，黄土高原 53.0% 的区域 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 呈下降趋势，20.4% 的区域 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 下降趋势显著，主要分布在黄土高原东、西南部；47.0% 的区域 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 呈上升趋势，42.1% 的区域 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 上升趋势显著，主要分布在黄土高原中部。$R_{SPI-VCI}$ 变化趋势空间分布与 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 的类似，黄土高原有 56.1% 的区域 $R_{SPI-VCI}$ 呈下降趋势，20.4% 的区域 $R_{SPI-VCI}$ 下降趋势显著；43.9% 的区域 $R_{SPI-VCI}$ 呈上升趋势，39.1% 的区域 $R_{SPI-VCI}$ 上升趋势显著。表明黄土高原超过 1/2 的区域植被受到水分限制的程度在减轻，但是 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 和 $R_{SPI-VCI}$ 2 种最大相关系数的下降趋势在较多区域均不显著，表明较多的水分限制对区域的水分限制减轻程度不明显，而上升趋势在较多区域显著，表明较多的水分限制加重区域的水分限制。

统计各个时间段 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 是否显著正相关区域的面积百分比[11]（图 5c 和图 5d），可以看出，$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 和 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 为显著正相关区域的面积百分比呈显著下降趋势，尤其是以 2007 年为结尾的 10 年滑动平均开始，往后至 2011 年下降趋势较为明显。与之相反，$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 和 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 为非显著正相关区域的面积百分比呈显著上升趋势，表明从 1983—2015 年，黄土高原的植被受到的水分限制程度减弱，主要是因为该时期受人类活动影响较为显著[20]，导致大气水分对植被的限制减弱。

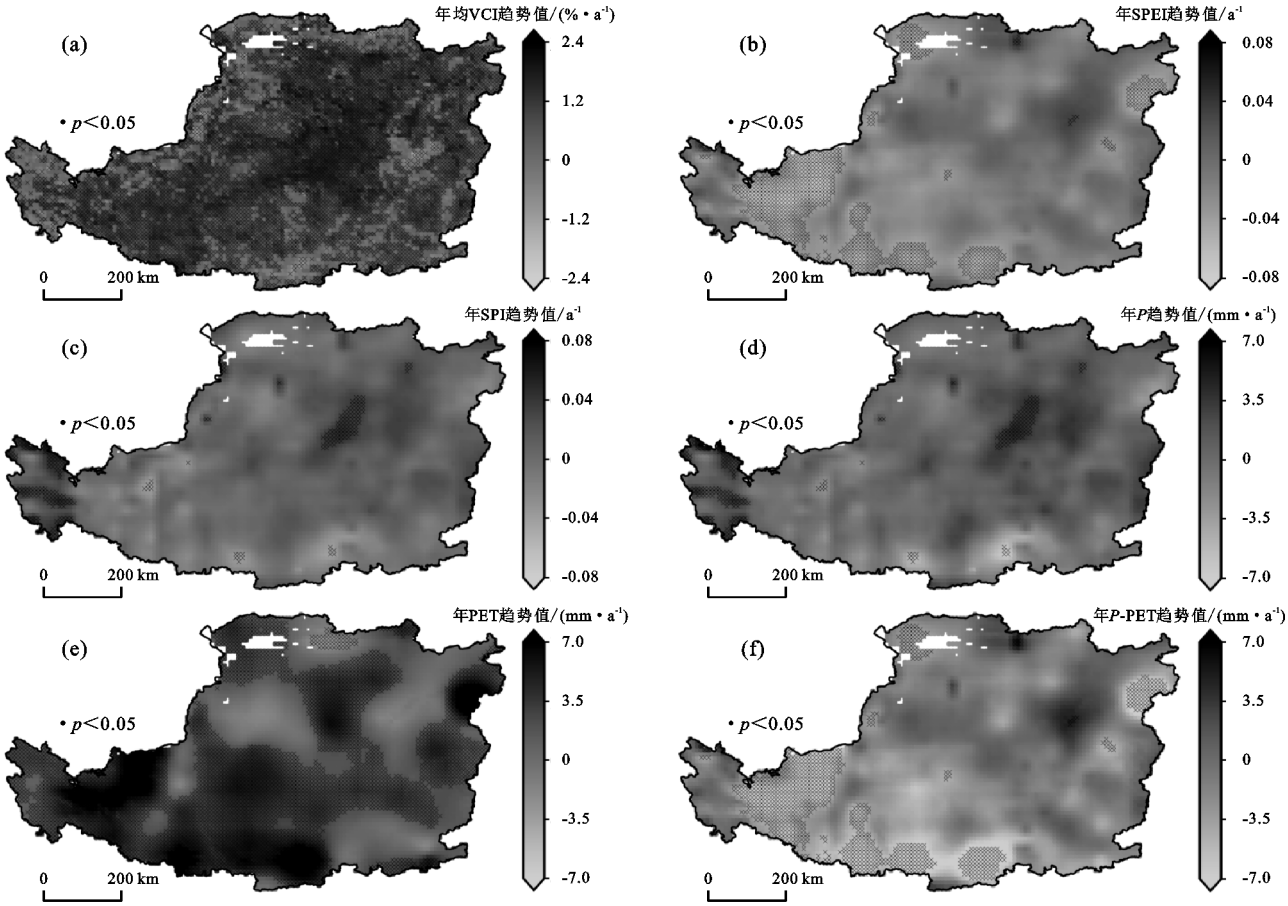
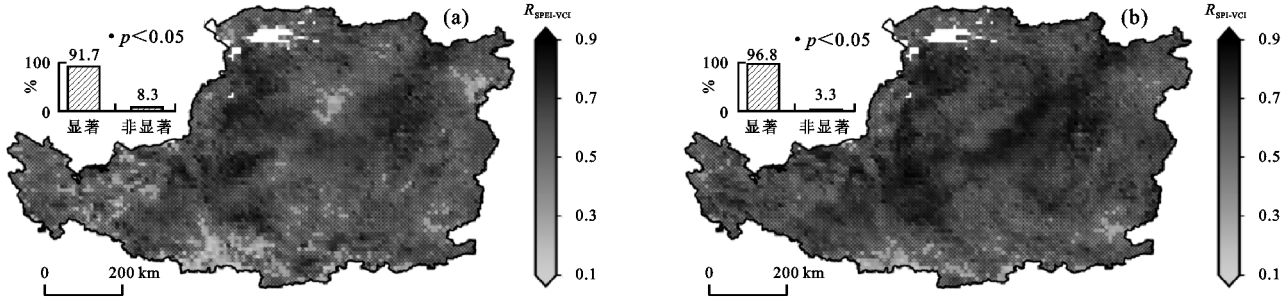


图 3　1983－2015 年黄土高原年均 VCI、年 SPEI、年 SPI、年降水量、年潜在蒸散发、年水分盈亏线性趋势诊断结果的空间分布



注:柱状图表示显著相关与非显著相关区域面积占比。

图 4　1983－2015 年黄土高原 $R_{SPEI\text{-}VCI}$、$R_{SPI\text{-}VCI}$ 空间分布

2.2.2　黄土高原植被对气象干旱的响应敏感性差异　短时间尺度 SPEI 或 SPI 相关性越大,说明植被对干旱变化的响应快;长时间尺度 SPEI 或 SPI 相关性越大,表明植被对干旱变化的响应慢,生态系统对干旱的抵抗力也越强[3]。本文通过统计 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生时对应的 SPEI 与 SPI 时间尺度,分析了黄土高原植被对不同时间尺度气象干旱响应的敏感性(图 6)。结果显示,$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 对应的时间尺度较为分散(图 6a 和图 6c),对应的时间尺度为 1～4 个月(31.2%)与 10～11 个月(13.9%)的区域相对较多,表明黄土高原植被对 1～4 个月与 10～11 个月的水分盈亏变化相对敏感。类似地,$R_{SPI\text{-}VCI}$ 对应的时间尺度也较为分散(图 6b 和图 6c),对应的时间尺度为 8～11 个月(26.4%)的区域相对较多,表明黄土高原植被对 8～11 个月的降水变化相对敏感,且 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 对应的长时间尺度(>12 个月)区域(55.6%)对比 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 对应的长时间尺度区域(46.9%)相对较多。结果表明,黄土高原地区植被状况与多个时间尺度的气象干旱呈较好的正相关性。

根据前文的分析,过去几十年黄土高原地区的植被状况变化显著,为剔除由于植被类型改变而带来的植被对干旱响应机制变化的影响,本文统计了黄土高原地区 1990 年和 2015 年耕地、林地和草地 3 种土地利用类型未发生改变的格点,并得到其 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生时对应的 SPEI 与 SPI 时间尺度(图 7a 和图 7b)。结果显示,草地对应的 SPEI 时间尺度中(图 7a),时间尺度为 3 个月的区域面积占比最多,占比为 16.8%,且草地对应的 SPEI 时间尺

度相对集中于短时间尺度(1～4 个月,4 种时间尺度占比为 40.6%),而对于＞12 个月的时间尺度(占比 36.0%),每种时间尺度占比均较小(大多数＜2.0%)。耕地对应的 SPEI 时间尺度也显示出相似的结果(图 7a),时间尺度为 3 个月的区域面积占比最多,占比为 9.9%,1～4 个月 4 种时间尺度占比为 29.3%,对于＞12 个月的时间尺度(占比 45.7%),每种时间尺度占比也均较小(大多数＜2.0%)。林地对应的 SPEI 时间尺度则显示不同的结果(图 7a),林地对应的 48 种时间尺度占比较为分散,每种面积占比均未超过 5.5%,占比较多的有 2 个月(5.3%),22 个月(4.9%),36 个月(4.7%),13 个月(4.1%)等,短时间尺度(1～4 个月)占比为 12.9%,长时间尺度(大于 12 个月)占比为 73.7%,对比草地和耕地长时间尺度占比相对较大。这与植被类型的本身生长机制有关,耕地与草地主要为 1 年生植被,而林地主要为多年生植被。黄土高原耕地、草地和林地的 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生时对应的 SPI 时间尺度则无较大区别(短时间尺度总占比分别为 16.9%,14%,11%,长时间尺度(＞12 个月)总占比分别为 64.7%,78.3%,73.7%,但对比 SPEI 时间尺度,三者对应的 SPI 时间尺度为长时间尺度的占比都相对较多(图 7b)。由此说明,尽管降水的变化对植被的影响较大,但是仅考虑降水的气象指标较难反映出黄土高原地区不同植被类型对水分的响应变化。

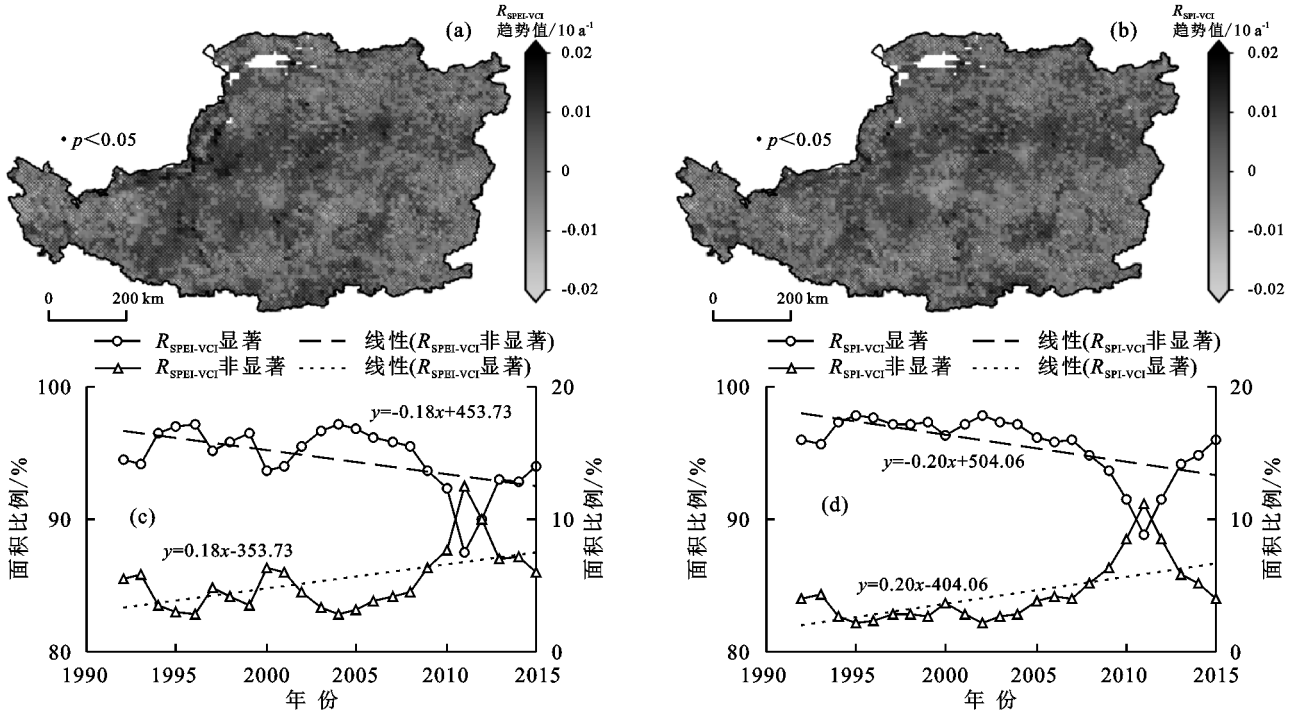


图 5 基于滑动窗口得到的 1983—2015 年黄土高原 $R_{SPEI\text{-}VCI}$、$R_{SPI\text{-}VCI}$ 线性变化趋势空间分布及 $R_{SPEI\text{-}VCI}$、$R_{SPI\text{-}VCI}$ 显著与非显著正相关区域面积占比的时间变化趋势

2.2.3 黄土高原植被对气象干旱的响应季节差异

本文进一步地统计了 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生的月份及空间分布(图 8)。根据谢宝妮等[21]的研究,黄土高原地区植被的生长季范围大致是 4—10 月份。可以看出,黄土高原 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 主要出现在植被生长季,面积占比分别为 88.4%和 91.5%(图 8c),只有少部分区域的 $R_{SPEI\text{-}VCI}$(6.6%)与 $R_{SPI\text{-}VCI}$(4.4%)出现在冬季。因此,可以看出,从植被对气象干旱的响应来看,在植被生长季,水分条件对植被的影响较为显著,而在冬季,水分条件对植被生长的影响并不显著。

3 讨 论

3.1 黄土高原植被受气象干旱控制程度差异

黄土高原地处半湿润半干旱区,降水量从东南向西北递减,蒸散发量大,植被生长活动多受到大气水分的控制,表现为区域内植被指数与气象干旱指数显著正相关,这与张华等[22]研究黄土高原植被受气象干旱控制程度的结果相一致,表明黄土高原大部分区域植被受到水分限制,在进行生态保护和植被恢复实践时应注意合理安排植被恢复面积,避免过密种植,减少对该区域水资源的过度消耗。但不同地区植被活动对气象干旱的响应特征具有较强的时空变异性,黄土高原植被指数与气象干旱指数非显著正相关的区域为毛乌素沙地、五台山地区和黄土高原南部。从 20 世纪 60 年代至 21 世纪初,当地政府与群众在毛乌素沙地开展了治理改造沙漠生态环境的工程,该区域的沙漠化程度得到有效改善,植被覆盖率显著增加[23]。因此,毛乌素沙地的植被活动受到人类植被恢复工程的影响较大,使得毛乌素沙地的植被指数与

气象干旱指数的相关性较差。山西省东北部的五台山地区海拔较高,最高海拔处 3 061 m,山顶处属于高寒气候,其中的植被类型多属耐寒植被,四季常绿[24],植被受大气水分控制较弱,导致五台山地区植被指数与气象干旱指数的相关性较差。黄土高原南部的部分地区降水较多,该区域内的植被基本不受到水分的限制,从而导致植被指数与气象干旱指数的相关性较差。

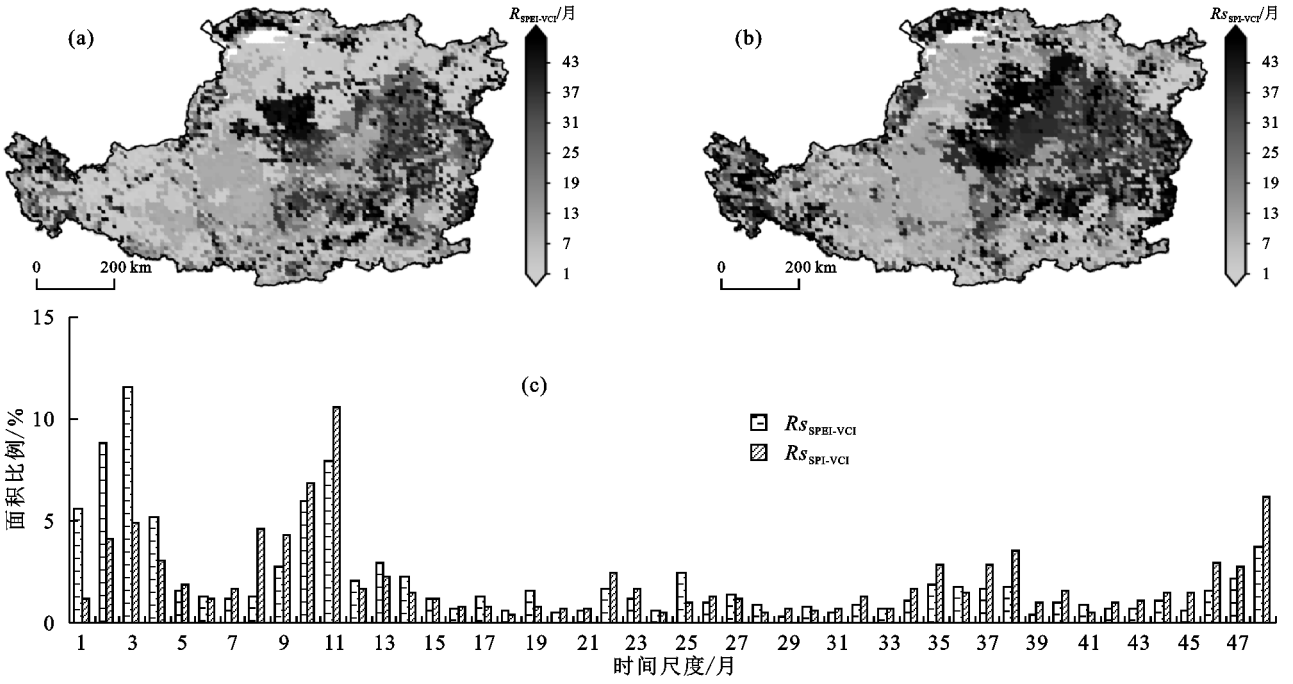


图 6　1983－2015 年黄土高原$Rs_{SPEI-VCI}$、$Rs_{SPI-VCI}$空间分布、$Rs_{SPEI-VCI}$和$Rs_{SPI-VCI}$各时间尺度对应的区域面积占比

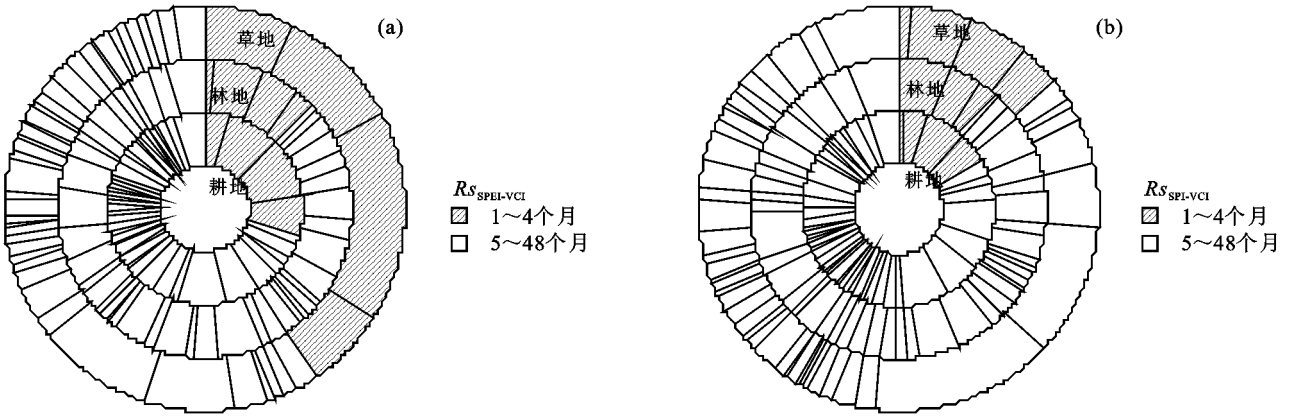


图 7　1983－2015 年黄土高原耕地(最内圆环)、草地(最外圆环)和林地(中间圆环)对应的 1～4 个月和 5～48 个月的$Rs_{SPEI-VCI}$、$Rs_{SPI-VCI}$面积占比

我国在黄土高原实施了一系列的植被恢复工程,特别是“三北防护林”和“退耕还林(草)”工程实施后,该地区植被覆盖率持续增加[7],因此该区域植被的变化与大气水分的变化相关性减弱,导致 1983—2015 年黄土高原的较多区域的植被受到水分限制的程度减弱。然而,黄土高原的可用水资源量也因大规模的植被恢复工程趋于紧张[10],因此,在植被受到水分限制加重的区域,加重程度较多为显著趋势。

3.2　黄土高原植被对气象干旱的响应敏感性差异

黄土高原存在较多生态区,从东至西依次为阔叶林生态区、农业与草原生态区、荒漠草原生态区、高寒草甸草原生态区[25],不同类型植被抵抗与适应干旱的能力不同,表现为不同类型植被分别对不同时间尺度的气象干旱敏感。众多研究[3,16,26]表明,黄土高原作为半湿润半干旱区,且草地和耕地主要为一年生植被,根系一般较浅,对干旱的抵抗力较弱,为适应干旱环境应对变化的水资源,对水分的变化较为敏感,因此对气象干旱的响应较快,主要对短时间尺度的 SPEI 敏感。林地作为多年生植被,对干旱的抵抗力一般较草地与耕地强,短时间尺度的干旱可能不会对林地造成不利影响,因此林地对应的 SPEI 时间尺度对比草地和耕地,长时间尺度(>12 个月,林地占比 73.7%,草地占比 36.0%,耕地占比 45.7%)占比相对较多,但是黄土高原林地并无明显主导的 SPEI 时间

尺度(对应的 48 种时间尺度占比均未超过 5.5%),可能的原因为黄土高原部分地区的林地植被为适应干旱环境的树种,也对短时间尺度的 SPEI 敏感。黄土高原耕地、草地和林地的 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生时对应的 SPI 时间尺度无较大差异,可能的原因为 SPI 仅考虑降水因素,而蒸散发也是生态环境水循环中重要的一部分,黄土高原潜在蒸散发量大,是黄土高原区域水平衡和植被变化中不可忽视的因素,因此仅考虑降水难以反映出不同植被类型对水分的响应变化。总体上,黄土高原区域植被主要对中短时间尺度的气象敏感,因此该区域的植被恢复实践应注意因地制宜,选择适应干旱的植被类型。

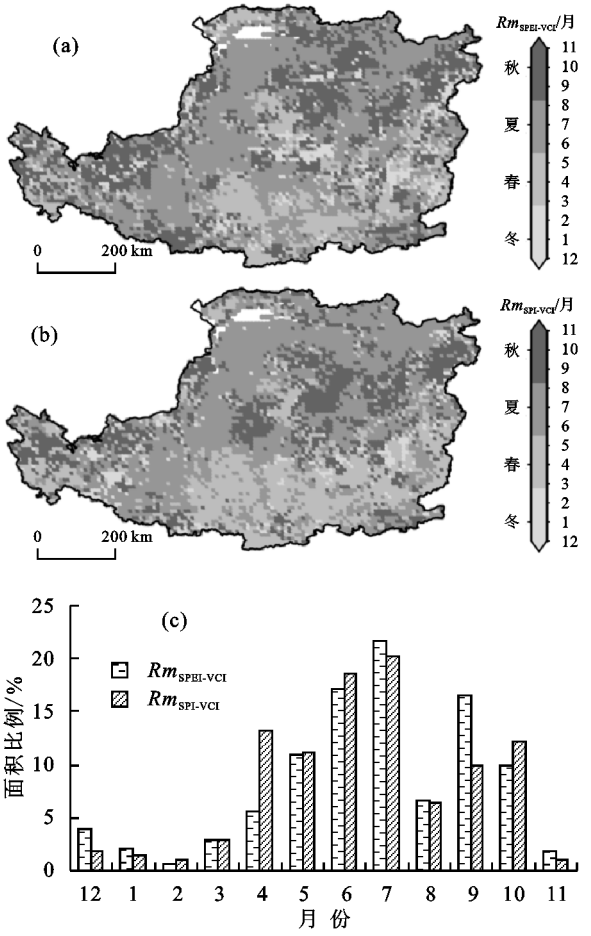


图 8 1983—2015 年黄土高原 $Rm_{SPEI\text{-}VCI}$、$Rm_{SPI\text{-}VCI}$ 空间分布及 $Rm_{SPEI\text{-}VCI}$ 和 $Rm_{SPI\text{-}VCI}$ 对应各月份区域面积占比

3.3 黄土高原植被对气象干旱的响应季节差异

黄土高原植被对气象干旱的响应在季节上有一定差异,$R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 发生的月份主要发生在夏秋季,主要是黄土高原的植被生长季,这与 Vicente-Serrano 等[3]研究植被对气象干旱响应季节特征分析相一致。植被的生长活动主要发生在生长季,期间对水分需求旺盛,受水分限制影响较大;并且黄土高原冬季降水较少,气温较低,不利于植被生长,大部分植被在冬季停止生长活动,因此黄土高原植被指数主要在生长季与气象干旱指数有较好的相关性。

综上,本文研究结果揭示了黄土高原植被对气象干旱的多尺度响应差异,为区域的生态保护和植被恢复工程建设提供了理论和指导意义。在黄土高原进行生态保护和植被恢复实践时,应充分考虑不同气候区水分条件以及区域内植被类型的差异,在受水分限制严重的地区应避免过度植树造林,因地制宜。

4 结 论

(1)1983—2015 年黄土高原年均 VCI 呈显著上升趋势,年 SPEI 和年 SPI 分别呈微弱下降和上升趋势,表明黄土高原的植被状况具有显著变好的趋势,但干湿状况变化不显著。

(2)黄土高原绝大部分区域植被变化与气象干旱指数呈现显著正相关关系,表明植被活动受到水分的限制较强。但黄土高原超过 1/2 区域的 10 年滑动窗口期的最大相关系数为下降趋势,表明黄土高原较多区域受到大气水分限制的程度在减轻,并且 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 和 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 为非显著正相关区域的面积占比均在逐渐上升,表明 1983—2015 年黄土高原越来越多植被受到大气水分限制的程度较轻。

(3)黄土高原 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 对应的时间尺度为 1~4 个月与 10~11 个月的区域相对较多,耕地和草地对应的 SPEI 时间尺度相对集中于短时间尺度(1~4 个月),而林地对 SPEI 的响应时间尺度较为分散,不同的植被类型对气象干旱的敏感性有一定差异;$R_{SPI\text{-}VCI}$ 对应的时间尺度为 8~11 个月的区域相对较多,耕地、草地和林地对应的 SPI 时间尺度无较大差别,仅考虑降水因素较难反映出黄土高原地区不同植被类型对水分的响应变化。黄土高原 $R_{SPEI\text{-}VCI}$ 与 $R_{SPI\text{-}VCI}$ 主要出现在生长季(4—10 月),面积占比分别为 88.4% 和 91.5%,表明水分条件在植被生长季的影响较为显著。

本研究表明,黄土高原地区植被对气象干旱的响应具有一定的时空分异性,生态保护和植被恢复实践应因地制宜。

参考文献:

[1] Mo K, Chen Q W, Chen C, et al. Spatiotemporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 138-147.

[2] Zscheischler J, Mahecha M D, von Buttlar J, et al. A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production[J]. Environmental Re-

search Letters,2014,9(3):e35001.

[3] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2013,110(1):52-57.

[4] 中国气象局.GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2017.

[5] 孔冬冬,张强,顾西辉,等.植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J].生态学报,2016,36(24):7908-7918.

[6] 齐贵增,白红英,赵婷,等.秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及空间差异[J].地理学报,2021,76(1):44-56.

[7] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J].Nature Geoscience,2015,8(10):739-741.

[8] Fu B J, Wang S, Liu J B, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2017,45(1):223-243.

[9] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

[10] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.

[11] Jiao W Z, Wang L X, Smith W K, et al. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades[J].Nature Communications,2021,12(1):e3777.

[12] 阳坤,何杰.中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)[EB/OL]. (2021-04-20)[2021-10-06]. https://dx.doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.

[13] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J/OL].Scientific Data,2020,7(1):25. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y.

[14] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(1):38-46.

[15] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL].(2018-07-02)[2021-11-20]. http://www.resdc.cn/DOI.

[16] 李明,葛晨昊,邓宇莹,等.黄土高原气象干旱和农业干旱特征及其相互关系研究[J].地理科学,2020,40(12):2105-2114.

[17] Lian X, Piao S L, Chen A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021,2(4):232-250.

[18] Vicente-Serrano S M, Van der Schrier G, Beguería S, et al. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates[J].Journal of Hydrology,2015,526:42-54.

[19] Li S, Liang W, Fu B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569/570:1032-1039.

[20] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.

[21] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等.基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J].农业工程学报,2015,31(15):153-160.

[22] 张华,徐存刚,王浩.2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J].地理科学,2020,40(6):1029-1038.

[23] 高建伦,王晶晶,任永庆,等.毛乌素沙地降水和气温变化特征及其与植被因子的关系[J].水土保持研究,2022,29(2):200-205.

[24] 吕秀枝,郭东罡,上官铁梁.五台山冰缘地貌植物群落多样性分析[J].冰川冻土,2010,32(3):626-633.

[25] 中国科学院生态环境研究中心.中国生态系统评估与生态安全格局数据库[EB/OL].(2010-11-02)[2021-11-20]. http://www.ecosystem.csdb.cn/.

[26] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery[J]. Nature, 2017,548(7666):202-205.