DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.016
靖娟利,孙佳荟,赵婷,等.西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):335-344.
JING Juanli, SUN Jiahui, ZHAO Ting, et al. Response of vegetation NPP to multiscale meteorological drought in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):335-344.

西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应

靖娟利[1,2], 孙佳荟[1], 赵 婷[1], 付宝苇[1]
(1.桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林 541006;2.生态时空大数据感知服务重点实验室,广西 桂林 541006)

摘　要:[**目的**]为研究植被对不同时间尺度干旱的响应机理,明确西南地区极端干旱事件频发对植被生长产生严重的负面影响。[**方法**]基于西南地区 2001—2019 年的 NPP 数据和 1～24 个月连续尺度的 SPEI 数据,采用相关分析法、最大值合成法及显著性检验等方法探究西南地区不同地貌类型植被 NPP 对多尺度 SPEI 的响应特征,并分析不同植被类型 NPP 对多尺度 SPEI 响应的差异性。[**结果**](1)在年际、季节及生长季尺度,植被 NPP 与 1～24 个月尺度 SPEI 的响应均以 1－3 月尺度占主导,表明植被 NPP 对短期干旱变化具有较好的响应,不同地貌分区响应时间表现出差异性。(2)空间上,植被 NPP 与 1～24 个月尺度 SPEI 的最大相关系数呈明显的异质性和季节性差异。年际相关性表现出从东南—西北呈显著正相关—显著负相关的变化趋势,季节相关性表现为夏季均以显著负相关占主导,春季、秋季和冬季均以显著正相关占主导,表明西南地区的夏季温度高且湿润,使植被生长受限,生长季正、负相关关系的区域面积比例相差不大,且呈显著正相关面积最大的地区为广西丘陵,呈显著负相关面积最大的地区为若尔盖高原。(3)不同植被类型 NPP 对 1～24 个月尺度 SPEI 的响应具有一定差异,尽管草地、灌丛、林地对 SPEI 的响应特征基本相似,但所有植被类型 NPP 在夏季随 SPEI 尺度的缩短呈负相关趋势越强烈。表明在夏季高温干旱条件下,各种植被类型都更易受到干旱的影响。[**结论**]研究结果为西南地区生态系统的保护和修复提供有效的科学支撑,同时,为防灾减灾及应对气候变化提供重要的理论依据,有助于制定更具针对性的政策和措施,推动西南地区的可持续发展。

关键词:西南地区;NPP;SPEI;气象干旱;干旱响应;相关分析
中图分类号:Q948.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0335-10

Response of Vegetation NPP to Multiscale Meteorological Drought in Southwest China

JING Juanli[1,2], SUN Jiahui[1], ZHAO Ting[1], FU Baowei[1]
(1.*School of Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi* 541006, *China*;
2. *Key Laboratory of Ecological Spatiotemporal Big Data Perception Service, Guilin, Guangxi* 541006, *China*)

Abstract:[**Objective**] This study was aimed to explore the response mechanism of vegetation to drought at different times scales and clarify the frequent occurrence of extreme drought events in southwest China on vegetation growth. [**Methods**] Based on vegetation net primary productivity (NPP) data from 2001 to 2019 and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) data on a continuous scale from 1－24 months in southwest China, correlation analysis, maximum synthesis method, significance test were used to analyze the responses of NPP of different geomorphic types and vegetation types to multi-scale SPEI in southwest China. [**Results**] (1) On the annual scale, seasonal scale and growing season, the responses of vegetation NPP and SPEI at 1－24 months were dominated by the January-March scale, vegetation NPP had a good response to short-term drought changes, but a relatively poor response to medium and long-term drought changes. (2) The response of NPP to SPEI at 1－24 month scale showed significant spatial heterogeneity and seasonal differences. The interannual correlation showed a trend of significant positive correlation to

收稿日期:2023-10-23　**修回日期:**2023-11-23　**录用日期:**2023-12-27　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-09
资助项目:国家自然科学基金项目(42161028)
第一作者:靖娟利(1977—),女,陕西西安人,硕士,教授,主要从事植被覆盖变化及其气候响应研究。E-mail:2003080@glut.edu.cn
通信作者:靖娟利(1977—),女,陕西西安人,硕士,教授,主要从事植被覆盖变化及其气候响应研究。E-mail:2003080@glut.edu.cn

significant negative correlation from southeast to northwest. The seasonal correlation showed that significant negative correlation was dominant in summer, significant positive correlation was dominant in spring, autumn, and winter. This indicated that in the southwest China, the summer temperature was high and humid, which limited vegetation growth the area with the largest positive correlation was Guangxi Hills, while the area with the largest negative correlation was Zoige Plateau. (3) The responses of NPP to SPEI from 1—24 months were different among different vegetation types. Although the response characteristics of grassland, scrub and forest land to SPEI were basically similar, the trend of negative correlation between NPP and SPEI became stronger with the scales of SPEI decreased in summer for all types of vegetation. This suggested that all types of vegetation are more susceptible to drought under high temperature and drought conditions in summer. [**Conclusion**] The research results provide effective scientific support for the protection and restoration of the ecosystem in the southwest China, provide an important theoretical basis for disaster prevention and reduction and coping with climate change, help formulate more targeted policies and measures to promote the sustainable development of southwest China.

Keywords: southwest region; NPP; SPEI; meteorological drought; drought response; correlation analysis

Received: 2023-10-23 **Revised**: 2023-11-23 **Accepted**: 2023-12-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-04-09

在全球气候变暖背景下,西南地区高温、干旱事件频发,2009年秋至2010年春,以云南、贵州为中心的西南5省遭遇干旱,2013年夏季重庆、四川、贵州再次出现干旱[1]。频繁发生干旱事件导致区域水热条件发生明显变化,与此同时,干旱可能通过一系列复杂的机制,如水分胁迫、光合作用变化和植物激素调节等,对植被的生长发育产生深远影响,从而导致其返青期和枯黄期发生提前或者推迟现象[2],干扰植被的正常演替及服务功能。因此,研究植被对气象干旱的响应对西南地区生态系统的健康及可持续发展具有重要意义。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是植被光合作用所固定的有机碳总量和自养呼吸消耗量之差,作为陆面碳循环的重要参数,能反映植被群落的生产能力和生态过程[3],是生态系统功能和结构变化的重要表征[4],是判定生态系统健康状况的重要指标[5]。干旱指数作为衡量干旱严重程度的重要指标,已广泛用于干旱定量研究。目前,表征气象干旱的常用指数有帕默尔指数(palmer drought severity index,PDSI)、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index,SPEI)。SPI指数仅考虑降水,忽略其他气候因素,PDSI结合降水和蒸散的影响,但时间尺度固定,SPEI因其不仅考虑对潜在蒸散变化的敏感性且具有多尺度特征,在世界范围内得到广泛应用[6]。近年来,国内外学者在植被—气象干旱的响应方面已开展部分研究工作,HUANG等[7]基于多时间尺度SPEI数据与NPP数据研究发现,气象干旱是全球植被NPP年际变化的主要驱动因素;李家誉等[8]通过研究黄土高原地区VCI与SPEI和SPI的相关性发现,植被状况与多个时间尺度的气象干旱呈较好的正相关性,且在生长季,水分对植被的影响较为显著;靖娟利等[9]研究滇黔桂地区NDVI对典型时间尺度SPEI的响应特征(1,3,6,9,12,24月)发现,植被对短时间尺度SPEI响应比较敏感;CHEN等[10]调查1997—2009年气象干旱对植被NPP年际变化的影响发现,植被NPP与SPEI在全球范围内具有同向耦合性;孔冬冬等[11]和SUN等[12]基于植被NPP数据和SPEI数据研究中国不同区域典型尺度(1,3,6,9,12,24月)气象干旱对植被NPP的影响发现,多年平均水平衡是影响植被—干旱响应特征的关键因素,中国东北地区轻度干旱或温度较高的短期干旱可能增加植被NPP。上述研究在一定程度上为西南区域植被—气象干旱的响应机理研究奠定基础,但针对西南地区的研究仍存在研究区域受限或研究尺度不连续等问题,且集中在植被对典型尺度SPEI的响应特征,针对西南地区,综合考虑植被类型、地貌类型,并探究多尺度植被NPP对1～24月连续尺度SPEI响应的研究较少。

鉴于此,基于2001—2019年NPP数据、1～24月连续尺度的SPEI数据、植被类型数据,采用皮尔逊相关分析法、最大值合成法等,分析西南地区及5大地貌分区植被NPP与气象干旱的相互关系,并深入探究不同植被类型对干旱响应的异质性,从而充分揭示西南地区植被NPP对多尺度气象干旱的响应机

制，以期为西南地区生态健康监测及可持续发展提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

西南地区位于中国西南部（97°21′－112°04′E，20°54′－34°19′N），包括云南、贵州、四川、广西壮族自治区（广西区）4 个省级行政区和重庆市，是我国喀斯特地貌的集中分布区，属于气候变化敏感区和生态环境脆弱区，总面积为 137.63 万 km^2，占全国总面积的 14.33%。研究区地跨中国地貌的三级阶梯，地形崎岖，地质地貌复杂，地形总体呈西北高东南低的空间分布格局；地貌类型多样，主要包括广西丘陵、云贵高原、四川盆地、横断山地和若尔盖高原（图 1）。研究区地处北回归线附近，气候类型多样，气候垂直差异显著，其中，包括热带季风气候、高原山地气候及亚热带季风气候等。该地区的年降水量为 340～2 300 mm，雨季主要集中在5－8 月，年内降水分布差异较大，呈现出“南多北少，东多西少”趋势。季节明显分为干季和湿季，春季和冬季降水相对较少，而夏季和秋季降水较多，夏季降水量可能超过全年降水的 20%，因此，冬季旱灾和春季旱灾容易发生。该区域植被类型多样，高海拔的西北部主要分布高寒草甸和高山植被，中海拔地区则以针叶林、阔叶林和针阔混交林为主，而在低海拔的四川盆地等地区，植被主要是栽培植物。

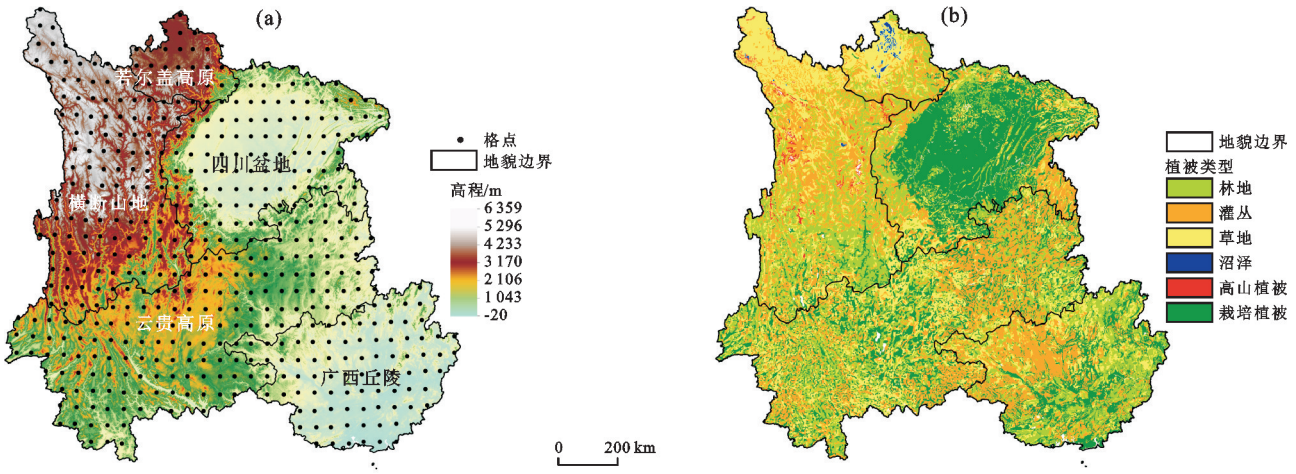

图 1　研究区地貌及植被类型分类

Fig. 1　Geomorphology of the study area and classification of vegetation types

1.2　数据来源

1.2.1　NPP 数据　来源于美国航空航天局（http://lpdaac.usgs.gov）对地观测数据集中的 MOD17A3 数据产品，空间分辨率为 500 m×500 m，时间分辨率为月，时间跨度为 2001－2019 年。该数据利用参考 BIOME－BGC 模型与光能利用率模型建立的 NPP 估算模型模拟得到陆地生态系统年 NPP，已在全球范围得到广泛应用。鉴于此，采用 MRT（MODIS reprojection tool）插件对 NPP 数据进行批量拼接、投影、格式转换等处理，再通过 ArcGIS 10.6 软件对处理过的影像进行裁剪，剔除无效值，最终得到 2001－2019 年逐月 NPP 时序数据。

1.2.2　SPEI 数据　来源于气候研究委员会（CRU）SPEIbase v.2.7 数据集（http://digital.csic.es/handle/10261/153475），空间分辨率为 0.5°×0.5°，时间尺度为 1～48 月。SPEI 的计算是通过建立不同时间尺度的气候水平衡累积序列，然后采用 log－logistic 概率密度函数拟合建立数据序列并对累积概率密度进行标准正态分布转换，最终获取相应的 SPEI 时间变化序列，详细计算过程见文献[13]。采用的 SPEI 时间跨度为 2001－2019 年，时间尺度为 1～24 月。研究过程中将每个像元作为 1 个站点，并在 ArcGIS 10.6软件中利用多值提取至点工具将栅格数据的值提取到点，接着使用克里金插值法生成空间分辨率为 500 m 的 1～24 个月尺度 SPEI 数据集。

1.2.3　植被类型数据　植被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心《1∶100 万中国植被图集》，根据需求，在分析前将植被类型重分类为林地、灌丛、草地、沼泽、高山植被和栽培植被共 6 种。

1.3　研究方法

采用 Pearson 相关系数法探究西南地区植被 NPP 与 SPEI 的关系，涵盖 1～24 个月的时间尺度，记作 SPEI01～SPEI24。为研究干旱对植被生长的影响，将植被生长阶段分为不同的时间尺度进行分析，包括春季（3－5 月）、夏季（6－8 月）、秋季（9－11 月）、冬季（12 至翌年 2 月）及整个生长季（4－10 月）。为避免植被物候对植被 NPP 与 SPEI 相关性的影响，首先，计算逐月植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性，计算公式为：

$$R_{i,j} = \mathrm{cor}(\mathrm{NPP}_i, \mathrm{SPEI}_{i,j}) \tag{1}$$

式中：i 为月份；j 为 SPEI 尺度；R_i 为 i 月植被 NPP 与 i 月 j 尺度 SPEI 的相关系数。根据季节的定义将对应月尺度的相关系数进行最大值合成得到，季节、生长季、年际各植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 最大相关系数，在此基础上进一步分析不同植被类型及地貌类型对干旱的响应。相关系数最大值合成法已广泛用于植被—干旱响应研究中[14-15]，其计算公式为：

$$R_{\max}=\max(R_{ij}) \tag{2}$$

式中：$R_{\max}$ 为该像元在不同季节或年内所有月 R_{ij} 的最大值，$R_{\max}$ 的取值范围为(－1，1)，其绝对值越大，则相关性越高。在给定置信水平 $\alpha=0.05$ 下，根据相关系数检验临界值表，判断最大相关系数的显著性，并将显著性分为显著负相关、不显著负相关、不显著正相关和显著正相关 4 个等级。

2 结果与分析

2.1 年尺度植被 NPP 对多尺度 SPEI 的响应

为研究 2001—2019 年西南地区年尺度植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性，计算两者之间 Pearson 相关系数(12×24＝288 个)，通过最大值合成得到年尺度植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的最大相关系数空间分布(图 2a)。由图 2a 和图 2b 可知，植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 最大相关系数为－0.96～0.97，且大部分像元均通过显著性检验，呈显著正相关的面积占比为 63.9%，显著负相关的面积占比为 36.1%，在整个研究区具有较大的空间异质性，从东南—西北总体表现为显著正相关—显著负相关，说明植被 NPP 变化与气象干旱的强弱具有显著相关性。进一步统计分析(图 2d)可知，云贵高原呈显著正相关的面积占比最高(83.4%)，其次是广西丘陵(80.6%)和四川盆地(60.9%)，若尔盖高原呈显著负相关面积占比最大(91.4%)，其次为横断山地(62.9%)。从植被 NPP 对 SPEI 响应时间(图 2c、图 2e)来看，其响应时间以短时间尺度为主，且随 SPEI 时间尺度增大，显著性像元占比表现出逐渐减少趋势，其中 1～3 月尺度对应像元占整个研究区面积的 50.4%，4～6 月尺度占 20.8%，其余尺度所占像元比例都在 7.7%以下，其中 22～24 月尺度所占像元比例最小，仅为 1.3%。从不同地貌分区来看，广西丘陵、云贵高原及横断山地植被 NPP 对 SPEI 的响应以 1～6 月尺度为主，占比分别达到 87.2%，77.9%，63.7%，四川盆地 1～3 月尺度响应面积在各地貌分区中占比最少，为 32%；若尔盖高原 16～18 月尺度响应面积较其他地貌占比偏高，为 18.2%。

综上可知，年尺度植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性表现为从东南—西北呈显著正相关—显著负相关的变化趋势，云贵高原以显著正相关为主，而若尔盖高原以显著负相关为主，研究区整体植被 NPP 对短时间尺度 SPEI 响应较为敏感。

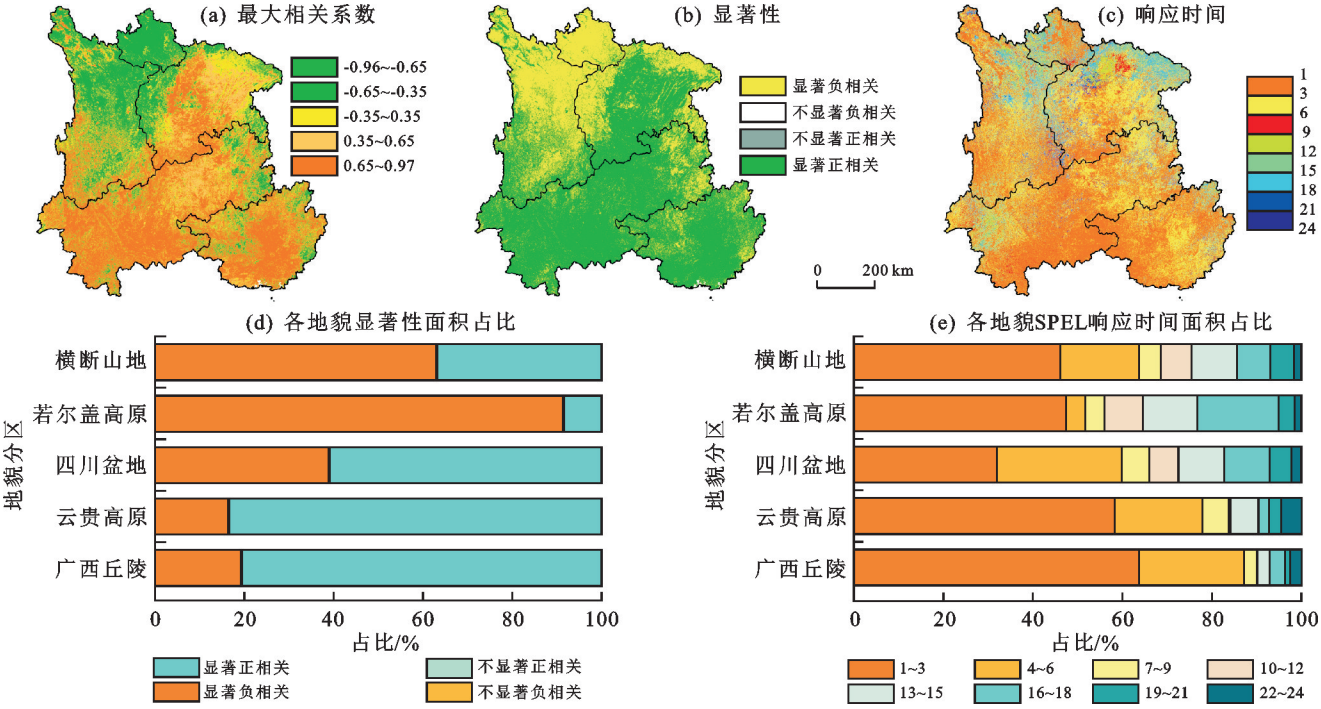

图 2 不同地貌分区年际植被 NPP 与多尺度 SPEI 的最大相关系数及响应时间空间分布及统计分析

Fig. 2 Spatial distribution and statistical analysis of maximum correlation coefficient and response time between annual vegetation NPP and multi－scale SPEI in different geomorphic regions

由图 3 可知，西南地区四季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 最大相关系数显著性具有较强的空间分异特征。春季、秋季和冬季均以正相关为主，面积占比分别为 65.1%，72%和 79.4%，春季集中分布在四川盆地、云贵高原和广西丘陵的西南部，秋季云贵高原和广西丘陵分布面积达到最大，冬季分布区向四川盆地、若尔盖高原扩张。夏季与其他季节相反，以负相关关系占主导，面积占比为 74.3%，呈正相关的区域占比为 25.7%，且仅在四川盆地中部呈显著正相关。

不同地貌分区各季节最大相关系数显著性占比也表现出差异性。广西丘陵夏季呈显著负相关的面积占比为 75.1%，其余季节呈显著正相关面积占比均高于 57.7%，其中，秋季显著正相关面积占比达到 95.2%。横断山地及若尔盖高原在春季、秋季和冬季呈显著正相关和负相关面积占比相近，夏季则以显著负相关为主导，面积占比均大于 79.2%。除夏季外，四川盆地和云贵高原其余季节呈显著正相关的面积占比均大于呈显著负相关的面积占比。

综上可知，夏季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 相关性在各地貌分区以负相关关系占主导。广西丘陵在秋季呈显著正相关面积达到各季节尺度中最大，若尔盖高原及横断山地夏季呈显著负相关的面积分别达到 96.1%和 79.2%，四川盆地和云贵高原除夏季外，均以显著正相关为主导。

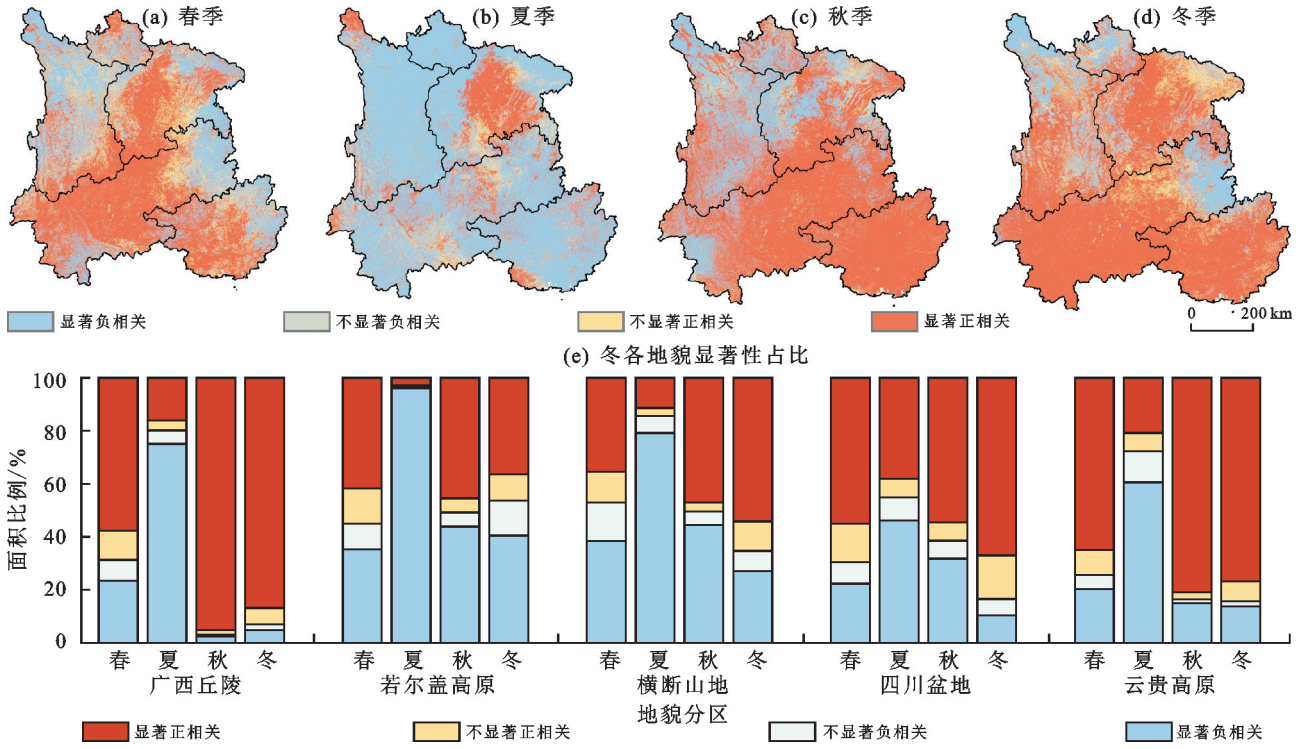

图 3　不同地貌分区季节植被 NPP 与多尺度 SPEI 最大相关系数显著性空间分布及统计分析

Fig. 3　Spatial distribution and statistical analysis of the significance of maximum correlation coefficients between seasonal vegetation NPP and multi－scale SPEI in different geomorphic regions

2.2　季节尺度植被 NPP 对多尺度 SPEI 的响应

由图 4 可知，西南地区四季植被 NPP 对 1～24 月尺度 SPEI 的响应时间也表现出一定差异性。春季植被 NPP 对 7～9 月尺度 SPEI 的响应面积较其他季节大，占比为 12.7%，其余季节占比都在 5.7%以下，夏季植被 NPP 对各尺度 SPEI 的响应面积相近，秋季植被 NPP 对 1～3 月尺度 SPEI 的响应面积占比最大，为 74.5%，冬季植被 NPP 对 4～6 月尺度 SPEI 响应面积较其他季节占比最大，为 22.2%。

不同地貌分区各个季节植被 NPP 对 1～24 月尺度 SPEI 的响应以 1～3 月尺度占主导。春季若尔盖高原植被 NPP 对 4～12 月尺度 SPEI 的响应面积较其他季节明显增加，面积占比达到 39.6%。广西丘陵和四川盆地夏季植被 NPP 受 4～15 月尺度 SPEI 影响面积增加，分别达到 52.5%和 45.1%。秋季广西丘陵植被 NPP 受 4～6 月尺度 SPEI 的影响面积高于其他季节，为 30.2%。冬季四川盆地植被 NPP 受 4～6 月尺度 SPEI 的影响面积明显高于其他季节，达到 41.7%。

综上可知，季节尺度植被 NPP 对 1～24 月尺度 SPEI 的响应也以 1～3 月尺度为主，对于 4～15 月尺度的响应在不同季节及地貌分区中存在一定差异。

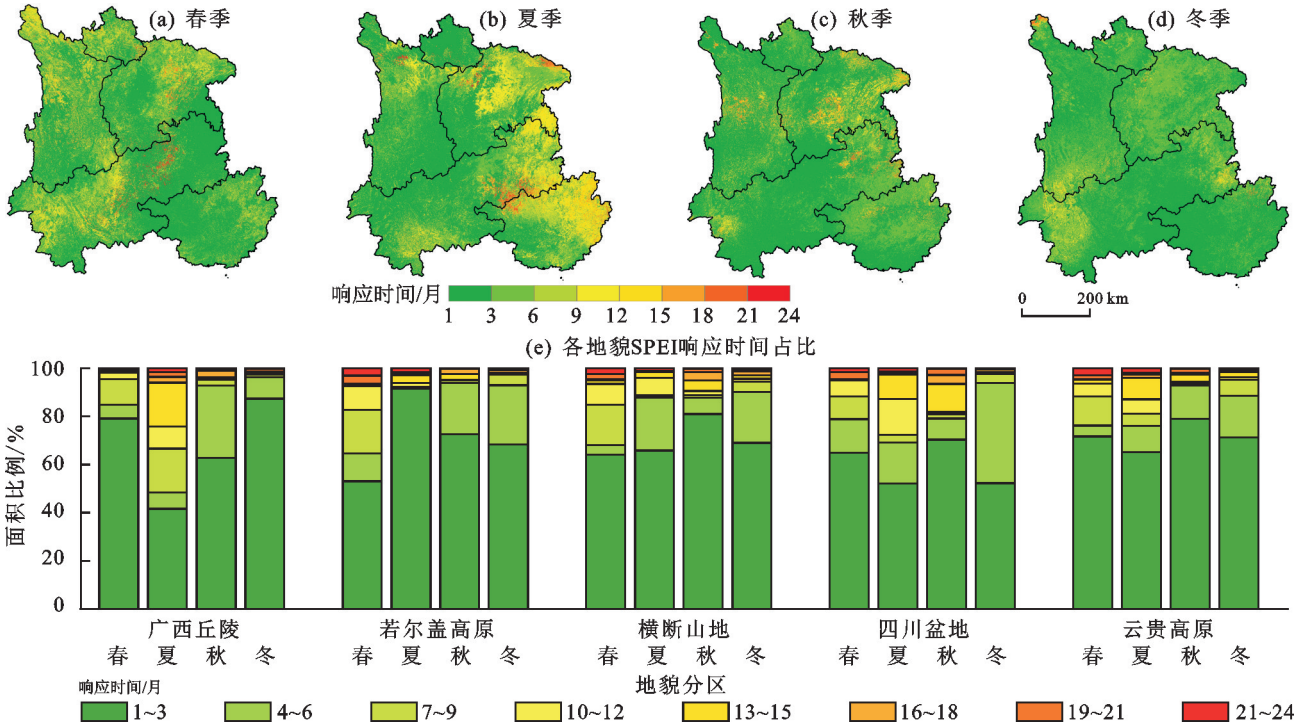

图 4 不同地貌分区季节植被 NPP 对多尺度 SPEI 的响应空间分布及统计分析

Fig. 4 Spatial distribution and statistical analysis of seasonal vegetation NPP responses to multi-scale SPEI in different geomorphic regions

2.3 生长季 NPP 对多尺度 SPEI 的响应

由图 5 可知，生长季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的最大相关系数通过显著性检验的像元占大部分，且正、负相关关系的区域占比相差不大，分别为 53.4%和 46.6%。进一步统计分析可知，广西丘陵呈显著正相关面积占比最高(74.7%)，其次是云贵高原(65.8%)和四川盆地(57%)，若尔盖高原呈显著负相关面积占比最大(95.7%)，其次为横断山地(75.5%)和四川盆地(41.1%)。从植被 NPP 对 1～24 月尺度 SPEI 的响应时间来看(图 2b、图 2d)，1～3 月尺度对应像元占整个研究区面积的 63.3%，4～6 月尺度占 10.7%，其余尺度所占像元比例都均<7.3%，且22～24 月尺度所占像元比例最小，仅为 1.9%。从不同地貌分区来看，广西丘陵在 1～3 月尺度响应中面积占比最大(89.3%)，横断山地最少(46.9%)，各地貌分区植被 NPP 对 SPEI 的响应在 1～6 月尺度中占比排序为广西丘陵(92.7%)>云贵高原(75.6%)>若尔盖高原(75.5%)>四川盆地(66.1%)>横断山地(64.5%)。

综上可知，生长季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性在若尔盖高原和横断山地以负相关为主，而在四川盆地、云贵高原和广西丘陵以正相关关系为主；研究区整体的响应时间以 1～3 月为主，不同地貌分区存在差异性。

2.4 不同类型植被 NPP 和 SPEI 相关性分析

根据研究区地貌特点及气候类型将植被分为 6 大类：草地、沼泽、灌丛、栽培植被、林地和高山植被(图 6)。其中，草地、灌丛、林地 NPP 在各个季节尺度与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性趋势表现出相似性，在春季、秋季和冬季均与 11～20 月尺度 SPEI 呈较高正相关性，在夏季随着 SPEI 尺度的递减负相关趋势逐渐增强。在各个季节栽培植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 相关系数在 6 种植被类型中均值最大，达到 0.37 以上，且除夏季以外均表现为正相关。随着 SPEI 时间尺度递减，沼泽 NPP 在夏季、生长季和年季均呈较强的负相关性，相关系数达到－0.70 以下。高山植被与其他类型植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 相关系数在各季节中的趋势有所不同，仅在秋、冬两季表现出正相关趋势，但相关系数不高，仅有 0.04。

综上可知，夏季，西南地区不同植被类型 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性随 SPEI 尺度的递减均表现出负相关关系逐渐增强趋势。草地、灌丛、林地的相关性变化规律呈现高度相似，沼泽和高山植被的相关性在夏季、生长季和年季中均表现为随 SPEI 尺度的递减，负相关关系逐渐增强趋势。

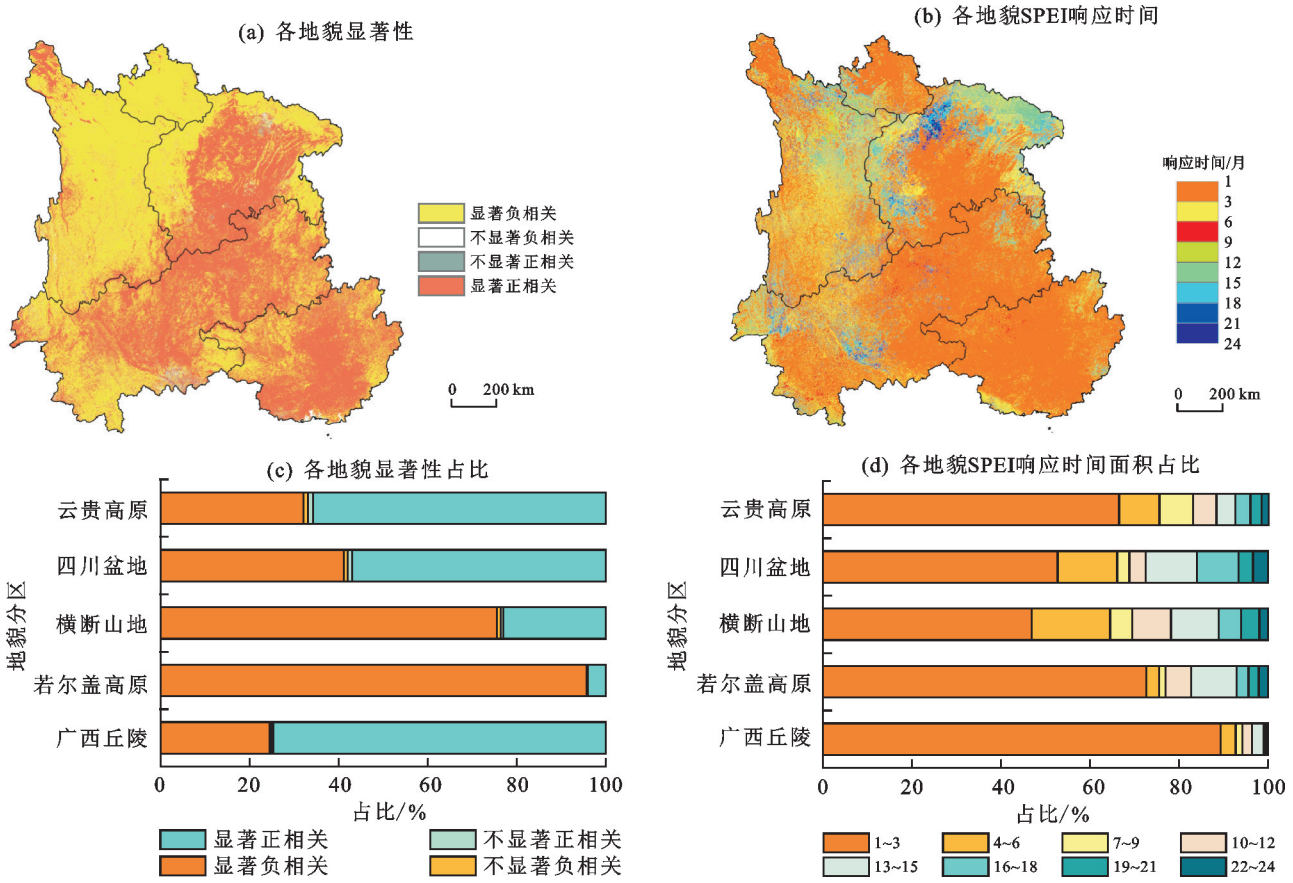

图 5　不同地貌分区生长季植被 NPP 与多尺度 SPEI 最大相关系数显著性、响应时间空间分布及统计分析

Fig. 5　Spatial distribution and statistical analysis the significance of maximum correlation coefficient and response time between growing season vegetation NPP and multi－scale SPEI in different geomorphic regions

3　讨 论

3.1　植被 NPP 对多尺度 SPEI 响应的空间差异性

西南地区年尺度及生长季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的最大相关系数空间分布以显著相关为主，其中，四川盆地、云贵高原、广西丘陵大部分地区以显著正相关为主，而横断山地和若尔盖高原以显著负相关为主，与西南地区的气候、地形特征有一定关系。研究区自西北向东南随着地势的降低，降雨量逐渐增加，气温逐渐升高，但由于降雨量季节分配不均，因而干旱程度降低（SPEI 值增大）有助于促进 NPP 增长，而横断山地及若尔盖高原以显著负相关为主，与该区海拔较高有关，虽然降雨量不均，但植被生长受温度因子的影响更高，过于湿润降低温度，进而抑制植被生长。季节尺度中，夏季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的响应在各地貌分区中以负相关关系为主，表明夏季温度高，在湿润化环境下植被生长受到抑制，即土壤水分对植物光合作用和 NPP 的限制增加[16]，与 LAI 等[17]研究中国植被 NPP 与 SPEI 的负相关关系主要分布在中国西南地区、青藏高原地区及长江中下游地区的结果吻合，春季云贵高原呈显著正相关面积占比当季最大（65%），该季节是植被生长的关键期，从 3 月开始，随温度升高，降雨量增加，植被进入发芽期，当降雨量减少，植被生长就被抑制，因此，大部分地区呈显著正相关，秋季和冬季在各地貌分区中显著性呈相同趋势。生长季，若尔盖高原呈显著负相关的区域占比达到 95.7%，主要原因是若尔盖高原海拔高低悬殊，植被存在明显的垂直地带性分异，随着海拔升高，温度逐渐降低，植被也从针叶林和阔叶林向高山草甸过渡，水分是限制低海拔地区植被生长的主要因子，而高海拔地区植被生长则主要受温度限制，此结论在 CHEN 等[18]研究中也得到证实，在川西高原地区影响植被的主导因子是海拔。

从植被 NPP 与 SPEI 响应时间分布来看，西南地区年际、季节及生长季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的最大相关系数对应的 SPEI 时间尺度均以短时间尺度为主，且随 SPEI 时间尺度增加，显著性像元比例表现出逐渐减少趋势，表明西南地区植被 NPP 对于短期地表水分异常及季节尺度的干湿变化具有较好的响应，而对于中长期，尤其是年尺度的干湿变化的响应相对较差。与 ZHOU 等[19]研究结论基本吻合，西南喀斯特地区植被对 6 个月及以下时间尺度的干旱响应敏感。而在东北地区的研究中植被

NPP 对于长时间尺度 SPEI(6 月、12 月)的反应最为显著($p<0.05$)[12]。研究结果表明,不同气候条件、植被类型、土壤类型等因素对植被—气象干旱的响应特征具有重要影响。

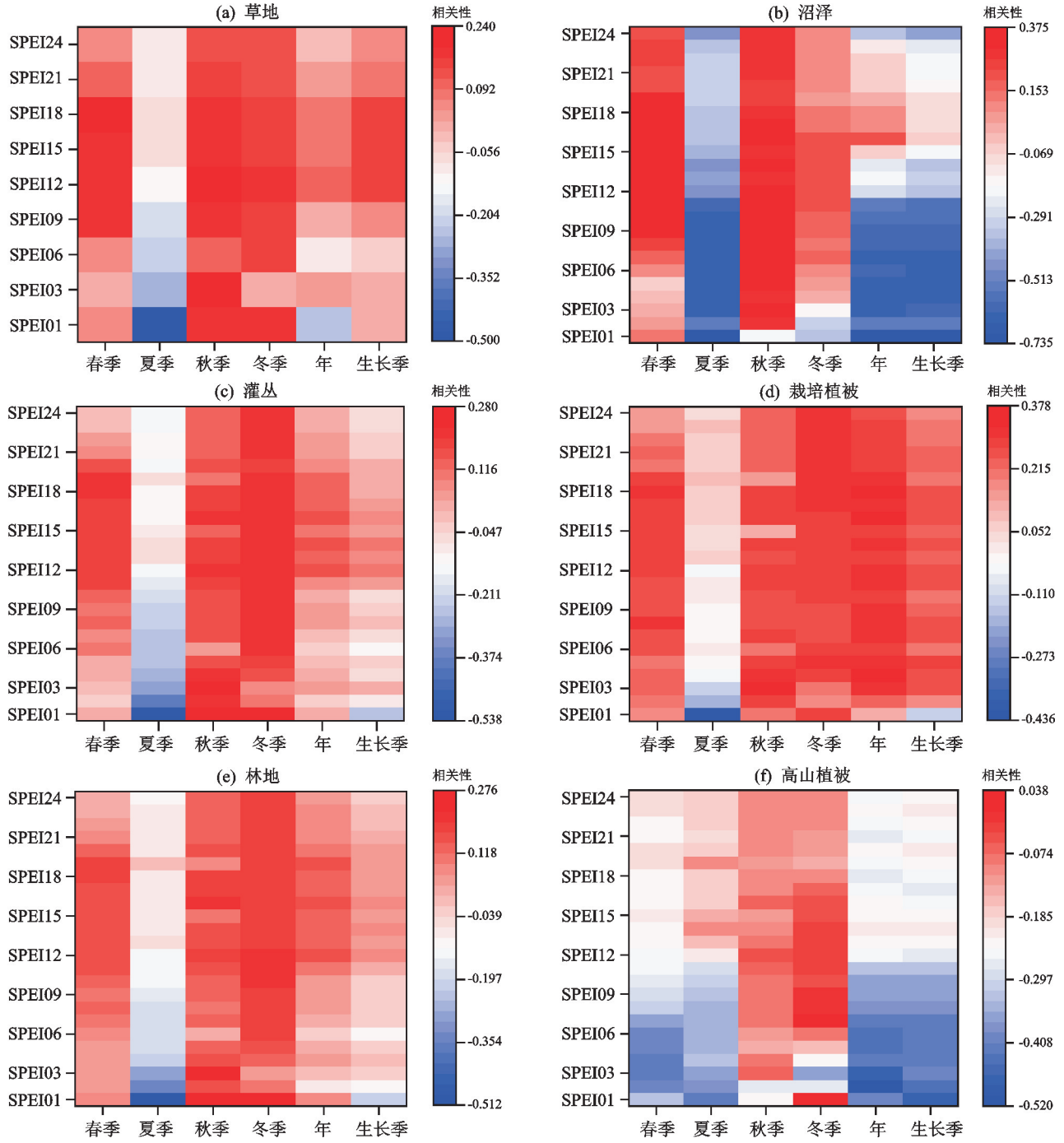

图 6 不同植被类型 NPP 与多尺度 SPEI 的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between NPP of different vegetation types and multi-scale SPEI

3.2 不同类型植被 NPP 对多尺度 SPEI 的响应特征

从不同类型植被 NPP 对 SPEI 的响应来看,不同植被类型 NPP 与 1~24 月尺度 SPEI 的相关性在夏季均表现出负相关,其中,沼泽和高山植被在夏季、年际和生长季较其他植被类型负相关趋势明显,草地、灌丛和林地 NPP 在各个季节尺度与 1~24 月尺度 SPEI 的相关性表现出相同趋势。沼泽和高山植被大多分布在横断山地和若尔盖高原,该区海拔高,夏季和生长季中高山植被进入生长关键阶段,因而,温度对植被的生长起到至关重要的作用,而降水的增多可能导致植被生长受挫[20],呈显著负相关。此外,植被 NPP 与 1~24 月尺度 SPEI 的相关性差异与植被分布及构成差异有关,袁先雷等[21]对新疆地区植被对多时间尺度干旱的响应研究也发现,在不同区域、不同植被类型对干旱的敏感性存在差异,林地与长时间尺度 SPEI 相关性较大。

3.3 不足与展望

本文系统探讨西南地区及 5 大地貌分区不同植被类型对多尺度 SPEI 响应的敏感性及空间差异性,有助于进一步理解植被—气象干旱响应的规律性。然而,在全球气候变化背景下,西南地区极端高温事件不断增多[22],但降水两极分化,极端强降水频率增加,干旱强度呈增强趋势[23],不同植被类型受极端干旱影响的程度也不同。因此,深入探讨植被生长对极端干旱的响应需要重点关注。西南地区是我国喀斯特地貌的核心分布地带,国家及地方政府实施多项生态保护政策,有效地遏制石漠化,对该区植被的改善起到积极的促进作用[24]。生态工程前后植被对气候的反馈效应也是后续需要关注的重点。

4 结 论

(1)年尺度中云贵高原植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的最大相关系数呈显著正相关面积占比最大(83.4%),而横断山地呈显著负相关面积占比最大(91.4%),说明 SPEI 的上升对云贵高原植被 NPP 增长促进作用明显,而对横断山地植被 NPP 增长的抑制作用更为明显。生长季最大相关系数呈显著正相关和负相关的面积占比最大的地区分别为广西丘陵(74.7%)和若尔盖高原(95.7%)。夏季植被 NPP 与 1～24 月尺度 SPEI 的相关性在各地貌分区以显著负相关占主导,与研究区夏季温度高且湿润,植被生长受限有关。

(2)生长季植被 NPP 对 1～24 月尺度 SPEI 的响应最为敏感,冬季最弱。由于西南地区植被 NPP 对短期地表水分异常具有较好的响应,因此,在年尺度、季节尺度和生长季植被对气象干旱的响应均以 1～3 月尺度为主。

(3)不同植被类型对气象干旱的敏感性存在差异性。其中,草地、灌丛、林地 NPP 在各个季节对 1～24 月尺度 SPEI 的相关性趋势相似,栽培植被相关系数在 6 种植被类型中均值最大,且以正相关为主,高山植被仅在秋、冬两季中表现为正相关。随着 SPEI 时间尺度的增加,沼泽 NPP 在夏季、年际和生长季均呈很强的负相关性。

参考文献:

[1] 姚玉璧,张强,王劲松,等.中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1409-1417.
YAO Y B, ZHANG Q, WANG J S, et al. The response of drought to climate warming in southwest in China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(9):1409-1417.

[2] 张晶,郝芳华,吴兆飞,等.植被物候对极端气候响应及机制[J].地理学报,2023,78(9):2241-2255.
ZHANG J, HAO F H, WU Z F, et al. Response of vegetation phenology to extreme climate and its mechanism[J]. Acta Geographica Sinica,2023,78(9):2241-2255.

[3] 刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.
LIU W R, LI X T, LI T, et al. Spatiotemporal variations of forest NPP and related driving factors based on MODIS and CASA models in Yichun[J].Chinese Journal of Ecology,2022,41(1):150-158.

[4] 茆杨,蒋勇军,张彩云,等.近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应[J].生态学报,2022,42(7):2878-2890.
MAO Y, JIANG Y J, ZHANG C Y, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its ecological engineering[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(7):2878-2890.

[5] GAO T, XU B, YANG X C, et al. Aboveground net primary productivity of vegetation along a climate-related gradient in a eurasian temperate grassland: Spatio-temporal patterns and their relationships with climate factors [J].Environmental Earth Sciences,2017,76(1):e56.

[6] WU X P, ZHANG R R, BENTO V A, et al. The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020[J].Remote Sensing,2022,14(18):e4658.

[7] HUANG L, HE B, CHEN A F, et al. Drought dominates the interannual variability in global terrestrial net primary production by controlling semi-arid ecosystems [J].Scientific Reports,2016,6(1):e24639.

[8] 李家誉,佘敦先,张利平,等.黄土高原植被变化对气象干旱多尺度响应特征与机制[J].水土保持学报,2022,36(6):280-289.
LI J Y, SHE D X, ZHANG L P, et al. Multi-scale response characteristics and mechanism of vegetation to meteorological drought on the Loess Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(6):280-289.

[9] 靖娟利,王永锋,和彩霞.滇黔桂地区 NDVI 变化及其对 SPEI 的响应特征[J].长江流域资源与环境,2022,31(8):1763-1775.
JING J L, WANG Y F, HE C X. Spatial and temporal variations of NDVI and its response to SPEI in Yunnan-Guizhou-Guangxi region[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(8):1763-1775.

[10] CHEN T, WERF G R, JEU R A M, et al. A global analysis of the impact of drought on net primary produc-

tivity[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(10): 3885-3894.

[11] 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.
KONG D D, ZHANG Q, GU X H, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 7908-7918.

[12] SUN B F, ZHAO H, WANG X K. Effects of drought on net primary productivity: Roles of temperature, drought intensity, and duration[J]. Chinese Geographical Science, 2016, 26(2): 270-282.

[13] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[14] 罗新兰,李英歌,殷红,等.东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应[J].生态学杂志,2020,39(2):412-421.
LUO X L, LI Y G, YIN H, et al. Response of NDVI to SPEI at different temporal scales inNortheast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 412-421.

[15] 宋进喜,齐贵增,佘敦先,等.中国植被生产力对干湿变化的响应[J].地理学报,2023,78(7):1764-1778.
SONG J X, QI G Z, SHE D X, et al. Response of vegetation productivity to wet and dry changes in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1764-1778.

[16] XIAO J F, ZHUANG Q L, LAW B E, et al. Assessing net ecosystem carbon exchange of U.S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1): 60-69.

[17] LAI C G, LI J, WANG Z L, et al. Drought-induced reduction in net primary productivity across mainland China from 1982 to 2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): e1433.

[18] CHEN S T, GUO B, ZHANG R, et al. Quantitatively determine the dominant driving factors of the spatial-temporal changes of vegetation NPP in the Hengduan mountain area during 2000—2015[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(2): 427-445.

[19] ZHOU Q W, LUO Y, ZHOU X, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China: A remote sensing approach[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 460-470.

[20] 和彩霞.西南地区 NDVI 动态变化及其与 SPEI 的关系研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2023.
HE C X. Study on the relationship between dynamic changes of NDVI and SPEI in southwest China[D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2023.

[21] 袁先雷,彭志潮,刘雪宁.新疆地区植被对多时间尺度干旱的响应研究[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):129-136.
YUAN X L, PENG Z C, LIU X N. Different time-scale responses of vegetation to the SPEI drought index in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 129-136.

[22] 王昊.西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D].北京:北京林业大学,2020.
WANG H. Temporal and spatial variation of extreme climate indices and its impact on NDVI in southwestern China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[23] 靖娟利,和彩霞,王永锋,等.西南地区 1902—2018 年干旱时空演变特征分析[J].水土保持研究,2022,29(3):220-227.
JING J L, HE C X, WANG Y F, et al. Spatiotemporal evolutioncharacteristics of meteorological drought in southwest China from 1902 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 220-227.

[24] TONG X W, WANG K L, YUE Y M, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54: 105-113.