

# 华北平原植被动态对气象干旱的响应特征

卢洪健, 胡智丹 (水利部水文局, 北京 100053)

**摘要** 基于中国华北平原 1982—2012 年 NDVI 和不同时间尺度 SPI/SPEI 数据, 分析了植被绿度年际波动对气象干旱时间尺度的响应特征。结果表明: 华北平原干旱对春季植被绿度的影响强于夏季, 对北部的影响强于南部; 植被绿度对长期干旱的响应更明显, 但局部和季节差异非常明显, 北部植被响应干旱的时间尺度较南部短; 生长季水分亏缺是其植被干旱脆弱性的主导因素。

**关键词** 植被绿度; 干旱; 时间尺度; 干旱脆弱性; 华北平原

中图分类号 S423; P467 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)36-0004-05

## Response Characteristics of Vegetation Greenness to Different Time-scale Meteorological Droughts in Northern China Plain

LU Hong-jian, HU Zhi-dan (Hydrology Bureau of Ministry of Water Resources, People's Republic of China, Beijing 100053)

**Abstract** We evaluated the response of different land biomes to drought by correlating the various timescale SPEI/SPI with a widely used indicator of vegetation activity, like the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Northern China Plain (NCP) during 1982-2012. The results showed that the NDVI of spring cultivated vegetation were more sensitive to drought than that of summer vegetation, and the impact of drought on vegetation greenness in northern was more significant than that in southern. The response of vegetation to drought was usually more obvious at a long scale, but the strongest response timescale in northern was shorter than southern. In a word, water deficit during the growing season was the main driver of vegetation vulnerability to drought.

**Key words** Vegetation greenness; Drought; Time-scales; Drought vulnerability; Northern China Plain

干旱是生态系统地上净初级生产力减少的主要驱动因子之一, 但不同的生态系统对干旱的敏感性存在较大差异<sup>[1-2]</sup>。由于不同植物群之间的水分利用策略存在很大的差异以及对干旱(水分亏缺程度)量化的困难, 加上温度上升与水分亏缺对植被的影响往往存在协同效应, 所以理解陆地植被(尤其是区域尺度上)对干旱的响应仍是一大挑战<sup>[3-4]</sup>。

干旱时间尺度是指由于干旱造成可识别的后果(如作物减产)出现时与干旱(水短缺)起始时间之间的时间滞后<sup>[5-7]</sup>, 不同的植被类型对不同时间尺度干旱的响应可能显著不同。以往的研究大多通过简单的降水距平(相对于平均状况)来考虑植被对气候的响应, 这会忽略温度的作用以及在何种干旱时间尺度上植被的响应最显著, 而这两者是识别气候波动的响应和理解植被对干旱的敏感性的根本要素<sup>[8]</sup>。有研究分析不同时间尺度上标准化降水蒸散指数(SPEI)与 3 种植被参数[分别为表征植被绿度的归一化植被指数(NDVI)、树木径向生长的树轮数据和地上净初级生产力]之间的关系, 揭示了全球范围内不同气候区的陆地植物群对干旱时间尺度的响应特征<sup>[9-10]</sup>。有学者采用多时间尺度 SPEI 和标准化降水指数(SPI)对地中海约旦河地区进行分析, 发现 NDVI 与 6 个月时间尺度的 SPEI 相关性最好, 但不同植被类型之间会存在较大差异, 不同季节内植被对干旱的响应特征也会明显不同<sup>[11]</sup>。也有研究者对中国西南地区进行分析, 发现植被绿度下降量出现的时刻与干旱事件之间存在 4~6 个月的滞后, 而且发现农田生态系统对干旱最敏感<sup>[12]</sup>。总之, 水分亏缺与植被响应之间的时间滞后受到植被类型、地区和土壤储水能力等因素的综合影响。

华北平原是我国重要的粮食主产区之一, 然而, 降水年际间的强烈波动使得其干旱发生较为频繁, 而近 10 多年来遭遇的少雨高温期更激发了一些破纪录的极端干旱事件, 导致区域粮食安全和生态系统生产力年际间的不稳定性呈加剧趋势<sup>[13-16]</sup>。笔者基于 NDVI 表征的植被绿度以及多时间尺度的气候干旱指数 SPI/SPEI, 分析了华北平原植被绿度变化与干旱时间尺度之间的关联性, 以期揭示植被干旱脆弱性的控制因素, 为气候变化下区域生态系统管理与功能保育提供参考。

## 1 数据来源与研究方法

**1.1 研究区概况** 华北平原地处拱卫京师的畿辅地带, 不仅是我国的政治、经济和文化中心, 而且其农业生产在我国有重要的战略地位, 全区耕地面积占全国的 1/6。按照农业气候区划, 华北平原属暖温带作物两年三熟区, 复种指数平均为 150%, 向南逐渐增大。主要种植作物是冬小麦—夏玉米, 一年两熟, 粮食产量约占全国的 1/7, 是我国的重要粮仓之一。区内土地质量差别悬殊, 虽然本区水热同季, 有助于作物生长, 农业生产潜力大, 但是由于降雨不多, 年内分配不均, 致使区域内缺水, 在一定程度上限制了光热资源的充分利用, 使得本区单位面积占有的水资源成为全国较低的地区之一, 面临着水资源安全和水短缺风险加重的问题, 因此整个区域内的粮食生产与农业干旱的发生关系十分密切。据统计, 华北地区旱灾平均受灾面积占全国受灾面积的比例最高, 尤其是自 20 世纪 80 年代以来持续近 30 年的干旱已成为制约该地区社会和经济发展的突出问题。

**1.2 数据来源与处理** 气象数据由中国气象局提供, 包括华北平原及周边 64 个气象站(图 1)的日均温和降水量的逐日观测数据。通过比较分析距离平方反比法(IDS)、梯度距离平方反比法(GIDS)和普通克里格法(OK)3 种插值方法的表现, 发现 GIDS 温度插值的平均绝对误差最小, 且能较细致地反映温度随海拔高程的变化<sup>[17]</sup>。该研究采用 GIDS 将逐

**基金项目** 水利部公益性行业专项(201301040)。

**作者简介** 卢洪健(1985—), 男, 江西修水人, 工程师, 博士, 从事水情报报工作和农业干旱风险管理研究。

**收稿日期** 2017-11-15

日的气象数据内插到华北平原所有的像元上(8 km 栅格),然后采用月均温、降水量分别计算 1、2、3、6、9、12、18 和 24 个月尺度的 1982—2012 年的逐月 SPI 和 SPEI。

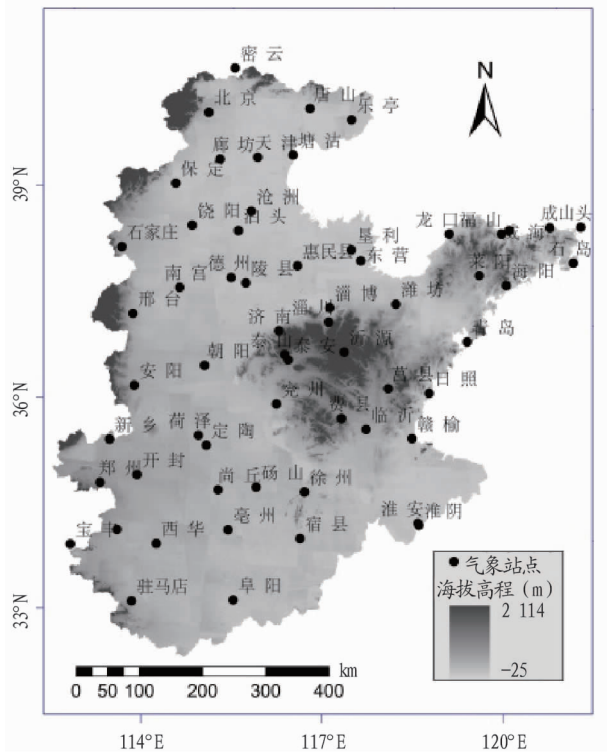


图1 研究区气象站点分布及土地利用类型

Fig. 1 Land use type and the distribution of meteorological stations in the study area

植被指数为 NOAA - AVHRR 的 1981—2006 年的 14 d 最大化合成的 8 km NDVI 数据和 Terra - Modis 卫星提供的 2000—2012 年的 16 d 最大化合成的 1 km NDVI 数据 (MOD13A2)。所有的遥感数据都统一转化为 Lambert 等积方位投影,空间分辨率为 8 km,并经过大气、几何纠正,消除云的影响。通过数据质量控制文件进行再处理,然后用 SG 滤波对 NDVI 进行去噪、平滑处理。最后,根据 2 套数据重叠时间段内的 NDVI 进行回归分析,融合成一套完整的 1982—2012 年的植被指数数据。

**1.3 研究方法** 为分析干旱指数与 NDVI 之间的关系,即将一年中各个月 NDVI 与不同时间尺度 SPI 进行相关分析<sup>[18]</sup>。为了揭示华北平原和华北平原植被绿色度年际变化对干旱时间尺度的响应特征,该研究采用上述方法,以融合、插值处理后 1982—2012 年不同月份的 NDVI 表征植被绿色度,以 SPI 和 SPEI(1、2、3、6、9、12、18 和 24 个月尺度)表示干旱,进而分析 8 km 栅格水平上 NDVI - SPEI/SPI 的皮尔逊相关系数( $r$ ),然后统计不同月份不同时间尺度上最大的  $r$  及相应的时间尺度(月)。此外,以土地覆盖类型数据为掩膜,统计各土地利用类型相应的 NDVI 和 SPI/SPEI,并分析其  $r$ 。最后,以 NDVI - SPL/SPEI 最强的响应关系  $r$  表征植被的干旱脆弱性,分析其空间差异及其与水平衡、降水和海拔高程等因子的相关关系。

## 2 结果与分析

**2.1 华北平原植被绿色度 - 干旱时间尺度的响应特征** 分析 8 km 栅格水平上 1982—2012 年 NDVI 与不同时间尺度 SPEI/SPI 的关系,4—9 月的  $r$  的空间分布如图 2 所示,整体而言, $r$  基本为正,说明气象干旱对华北平原植被绿色度年际变化的影响很大,但不同月份、地区 NDVI 对各时间尺度干旱的响应差异明显。4—6 月的  $r$  比 7—9 月相对要大,北部地区的  $r$  比南部相对更大,长时间尺度上的  $r$  比短时间尺度相对更大。但也存在一些十分明显的局部差异,例如,4 月南部地区的  $r$  明显比北部高(3~6 个月尺度上),7 月北部大部分地区在短时间尺度上的  $r$  要显著高于长时间尺度上。但是南部一些地区 7—9 月 NDVI 与 SPEI 的  $r$  多为负,8 月尤为如此,这很可能是因为该时段内的水分相对充沛,干旱相对很弱,莫兴国等<sup>[13]</sup> 研究表明,夏玉米生育期内黄河以南水分有盈余;而黄河以北地区水分亏缺 0~100 mm,这显然是北部地区 7—9 月的  $r$  为正的主要原因。综上可知,春季干旱对整个华北平原植被绿色度都具有显著影响,而夏季干旱对北部地区植被的影响要显著强于对南部地区。

对 4—9 月 NDVI 与 1、3、6、9、12、18 和 24 个月尺度的 SPEI/SPI 的  $r$  进行比较分析,提取每个栅格上最大的  $r$ (6 个月 × 7 个尺度)以及相应的时间尺度(月),结果如图 3 所示。很显然, $r$  的总体格局为北部大于南部,但也存在一些很明显的局部特征,如北部石家庄—邢台一带以及黄河下游沿岸多数地区的  $r$  都很低,这可能与其灌溉条件较好有关,而鲁西南和河南商丘—亳州一带的  $r$  则较高,可能受山地丘陵地形和土壤质地的影响较大。与 SPI 相比,SPEI 的  $r$  相对更高,说明联合考虑水供应和需求对干旱程度影响的干旱指数,总体上更能反映出干旱对植被绿色度的影响程度;只是在北部的泊头—廊坊一带,SPI 的  $r$  反而高于 SPEI。

分析整个区域不同植被类型 NDVI 年际变化与不同时间尺度 SPEI/SPI 的相关关系。结果表明,不同植被类型 NDVI 对干旱的响应特征存在较大的差异(图 4、5)。就常绿林来讲,其在生长季的旺期 6—7 月不仅对短期的(1~6 个月尺度)水平衡(降水 - 蒸散)亏缺敏感,而且对长期(12~24 个月尺度)干旱的响应很好;与之不同的是,落叶林在 7 月主要是对短期干旱很敏感。此外,在 2 月对 9~12 个月尺度的干旱的响应也较好。灌木在 6—7 月对干旱时间尺度的响应与常绿林类似,但在 8 月对长期干旱的响应也好,而在 9 和 10 月对 1~2 个月尺度的水分亏缺还较为敏感。

农业植被的响应特征与自然植被的差异较大(图 5),其中平原水田在 3 月对 2~3 个月尺度的干旱较为敏感,而在 5、7 和 8 月对长时间尺度上的水分亏缺响应较好。山地旱地和丘陵旱地的响应特征基本一致,在 5—7 月和 9—10 月对各时间尺度的干旱都有较强的响应,但也是在 6 月对 2~3 个月尺度的水分亏缺最为敏感,这是因为山地和丘陵地形不利于土壤储存水分,而 6 月又是作物生长需水旺盛时期,因此对短时间尺度上的水分亏缺较为敏感。平原旱地在 7 和 10 月对 1~3 个月尺度的干旱的响应最好,而在 5、8 和 9 月

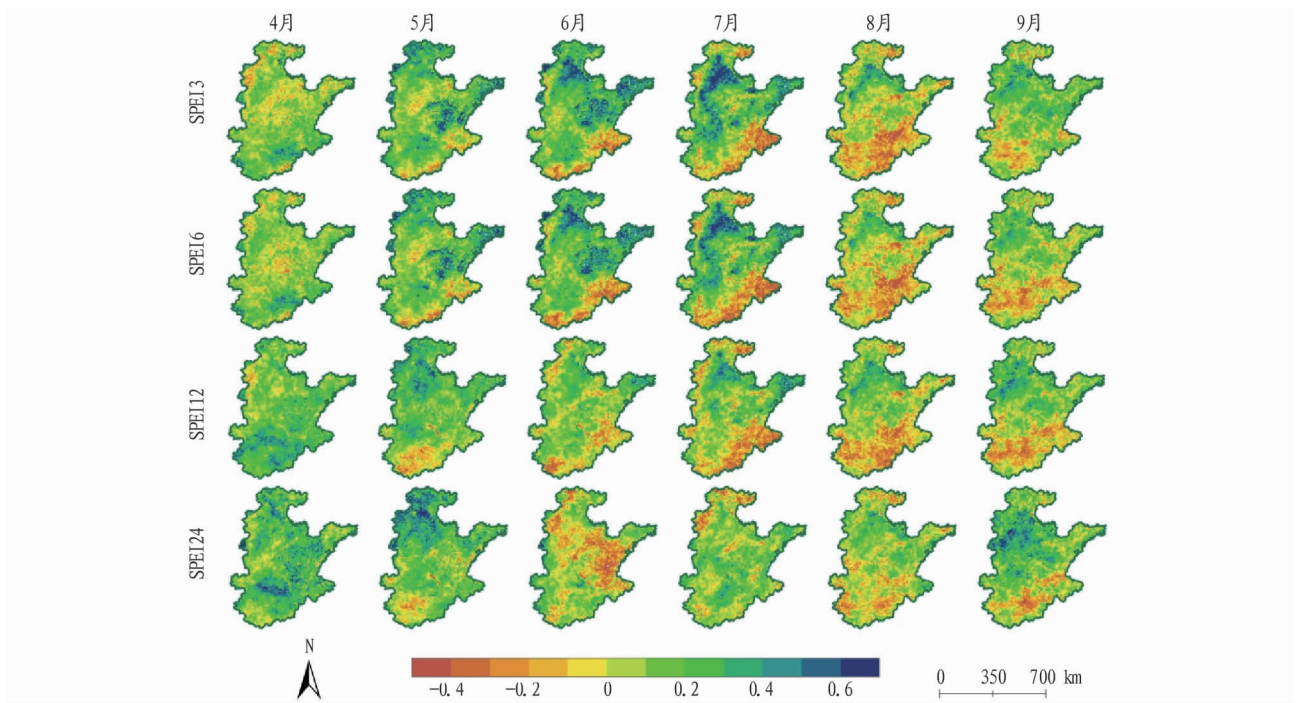
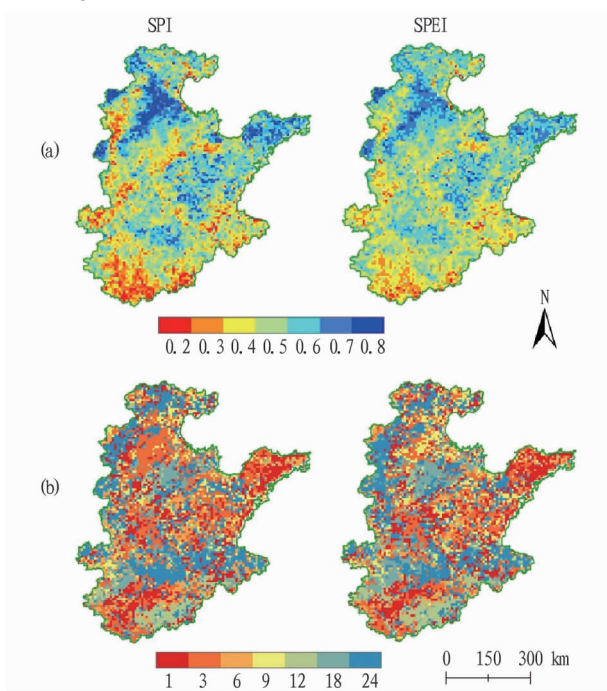


图2 华北平原4—9月NDVI与不同时间尺度SPEI的相关系数

Fig. 2 The correlation coefficient between NDVI in Northern China Plain from April to September and SPEI of different time scale



注: a. 皮尔逊相关系数( $r$ ), 其值表示每个栅格4—9月NDVI与不同时间尺度SPI/SPEI最大的相关系数; b. 最大相关系数对应的SPI/SPEI时间尺度(月)

Note: a. Pearson correlation coefficient ( $r$ ), which suggested the maximum correlation coefficient between NDVI from April to September for each grid and SPI/SPEI of different time scale; b. The corresponding SPI/SPEI time scale for the maximum correlation coefficient

图3 华北平原干旱与植被绿度关系的空间分布模式

Fig. 3 Spatial distribution pattern of the dry in Northern China Plain and green relationship of vegetation

对长期的水分亏缺更为敏感。由此可见,对于主要种植冬小麦和夏玉米的华北平原来说,不同作物甚至同一作物在生长季的不同阶段对于干旱时间尺度的响应都可能存在较大差异。

综合分析各植被类型、月份NDVI对不同尺度上的水供给(SPI)和水平衡(SPEI)的响应特征,发现随着时间尺度的增大,两者的平均 $r$ 都逐渐增大,但在18个月时,响应开始减弱;但不同季节、植被类型之间的响应差异很大,尤其表现在1~6个月的短时间尺度上(图6)。因此,在对华北平原植被干旱胁迫的影响评估与监测过程中,不仅要考虑短时间尺度上的水分亏缺,也要考虑长时间尺度上的累积干旱效应。综合来讲,华北平原植被绿度的变化对于干旱的响应在18个月时间尺度上最明显。

**2.2 植被干旱脆弱性影响因素分析** 为了解释NDVI变化与干旱时间尺度响应关系(即植被干旱脆弱性)的空间分布差异,分析图2中的 $r$ 与其相应生长季多年平均水量平衡( $P - PET$ )之间的关系,拟合结果如图7所示。总体而言,各植被类型拟合的皮尔逊相关系数 $r$ 为负,换言之,水分亏缺越厉害的地区,干旱对植被绿度的影响越强,即植被干旱脆弱性越大。但是不同植被类型间的这种相关性明显不同,平原旱地、平原水田和自然植被(包括林地、草地、灌丛和稀树草原)的 $r$ 都小于 $-0.80$ , $P$ 小于 $0.01$ ,且决定系数( $R^2$ )分别为 $0.74$ 、 $0.74$ 和 $0.60$ ;说明生长季水量平衡(水分亏缺)是其植被干旱脆弱性空间分异的主要驱动因素。而对山地旱地和丘陵旱地来说,虽然其NDVI-SPEI的相关系数普遍高于平原地区,但它与水量平衡之间并非线性响应关系,即简单的水量平衡并不能很好地解释NDVI-SPEI响应关系的强弱,这一方面是因为拟合的点较少,更重要的原因是,山地和丘陵地区水循环过程更为复杂多变,径流对水平衡的影响很大,所以



导致植被绿度对简单的气候水平衡表征的干旱并未呈线性的响应。生长季水平衡达 -400 mm 的山地旱地,植被干旱脆

弱性最强,但对水分亏缺小于 400 mm 的地区,NDVI - SPEI 的相关系数反而是随水分亏缺量减少而增大的。

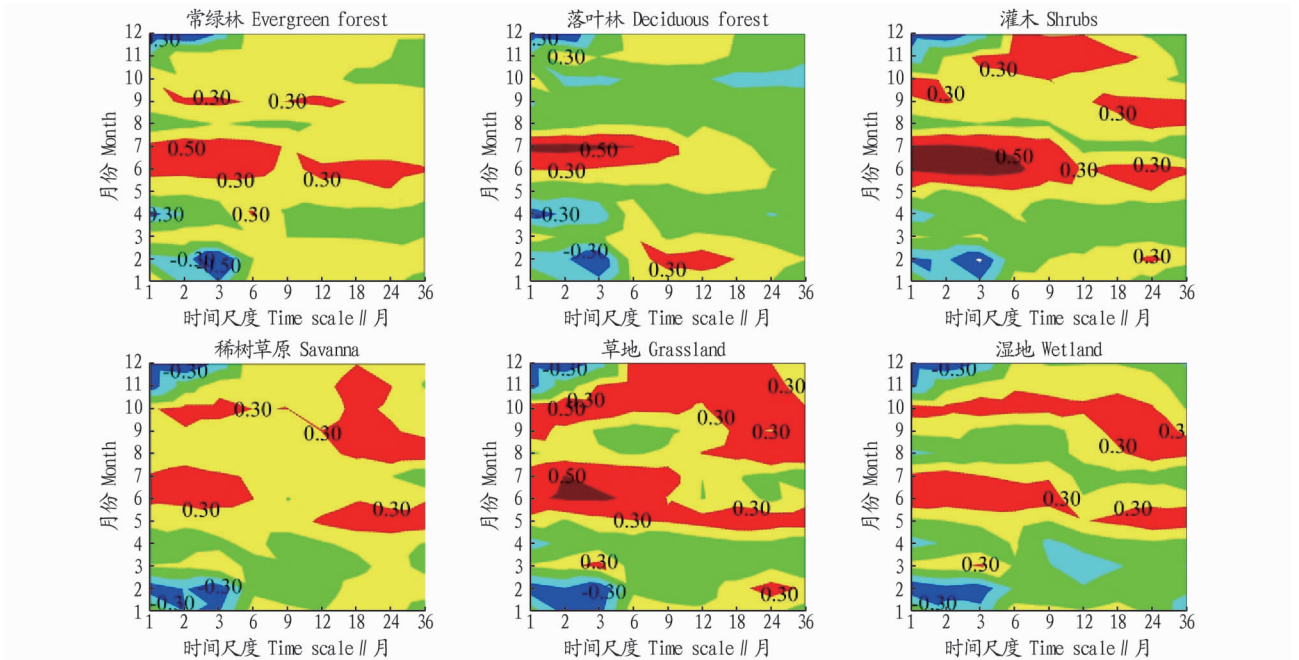


图 4 华北平原自然植被 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的相关系数

Fig. 4 The correlation coefficient between NDVI of natural vegetation in Northern China Plain and SPEI of different time scale

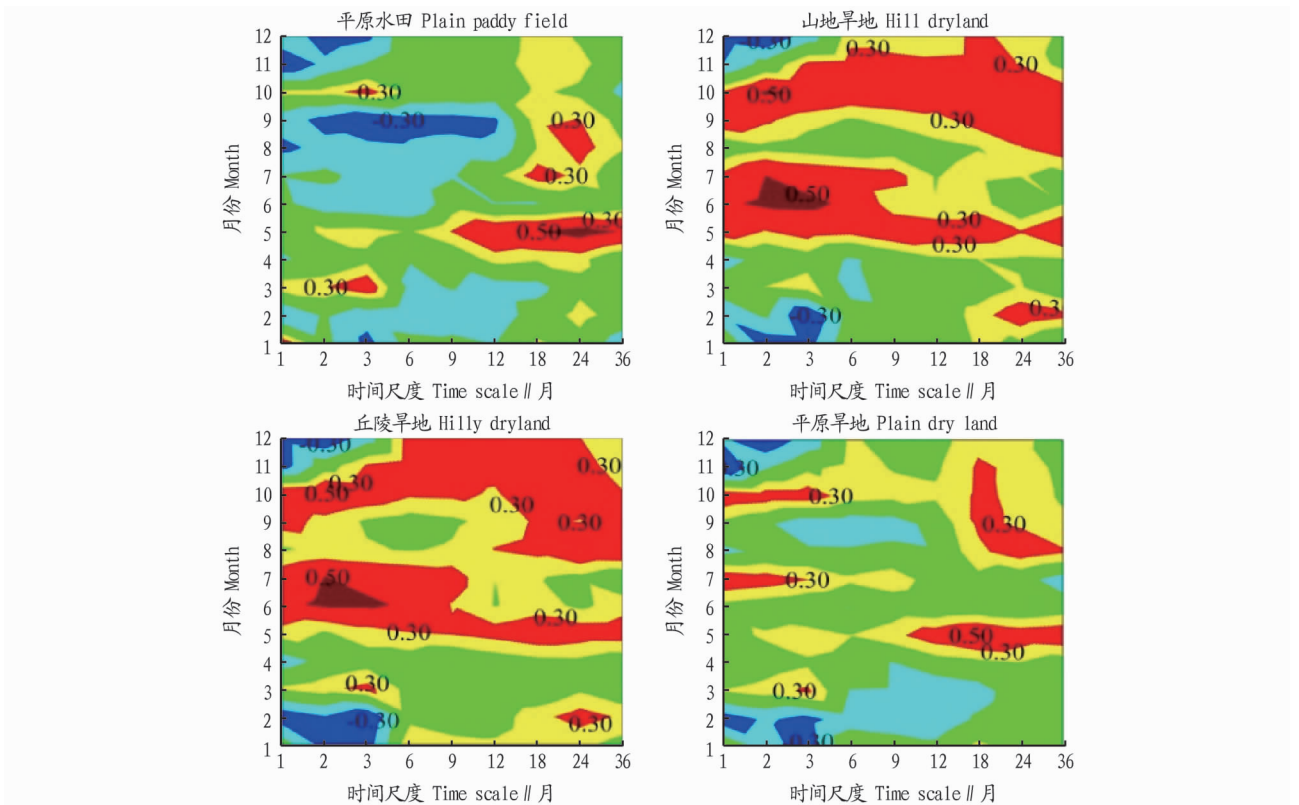


图 5 华北平原农业植被 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的相关系数

Fig. 5 The correlation coefficient between NDVI of agricultural vegetation in Northern China Plain and SPEI of different time scale

### 3 结论与讨论

该研究分析了中国华北平原植被动态 (NDVI) 对不同时间尺度干旱 (SPEI/SPI) 的响应特征,并探讨了不同土地覆盖类型的响应差异,以期揭示其区域/局地尺度上植被绿度对

干旱时间尺度的响应规律,并试图解释不同植被类型干旱脆弱性空间差异的主要驱动因素。就华北平原而言,干旱对春季植被绿度的影响比夏季植被绿度强,对北部植被绿度的影响比南部强。其植被 NDVI 对干旱时间尺度的响应特征较

复杂,河北省中部、山东省大部分地区以及河南南部一些地区对短期干旱敏感,而河北西北部、河南中部和山东西北部、江苏北部的少部分地区对长期的水分亏缺响应更强。自然植被在其生长季旺期6—7月对短期和长期干旱的响应都较

强,春季农业植被在2—4月对短时间尺度干旱的响应较强,而夏季农业植被在5—9月对长期的累积水分亏缺最敏感,但不同土地利用类型间的差异较大。

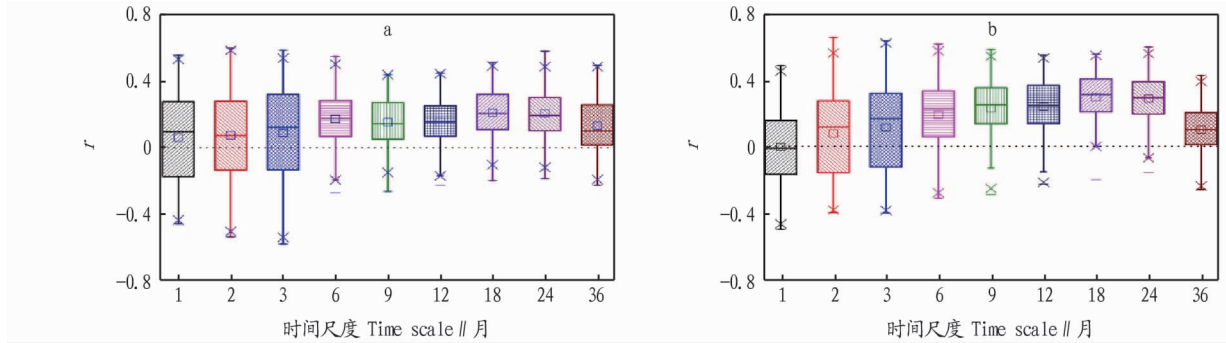


图6 华北平原 NDVI 与 SPEI(a) 和 SPI(b) 相关系数  $r$  的统计盒图

Fig. 6 Statistical box figure of NDVI and the correlation coefficient of SPEI(a) and SPI(b) in Northern China Plain

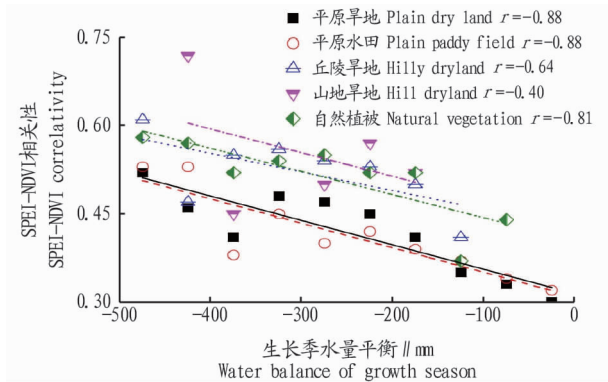


图7 华北平原 NDVI - SPEI 最大相关系数与生长季(4—9月)水量平衡之间的关系

Fig. 7 The relationship between the maximum correlation coefficient of NDVI-SPEI and water balance of growth season from April to September in Northern China Plain

研究还表明,生长季水量平衡( $P - PET$ )是华北平原自然植被、平原水田和平原旱地植被干旱脆弱性空间分异的主要控制因素,山地和丘陵旱地植被脆弱性的影响因素较复杂。这可能是因为,就华北平原植被活动变化的驱动因素而言,人类活动的作用占主导地位,但气候变化也是重要因素,且前者的作用相对更大。

#### 参考文献

- [1] ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. *Forest ecology and management*, 2010, 259(4): 660 - 684.
- [2] LAW B E. Regional analysis of drought and heat impacts on forests: Current and future science directions[J]. *Global change biology*, 2014, 437: 3595 - 3599.
- [3] CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 [J]. *Nature*,

- 2005, 437(7058): 529 - 533.
- [4] DAI A G. Drought under global warming: A review[J]. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate change*, 2010, 2: 45 - 65.
- [5] GUTTMAN N B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm [J]. *Journal of the American water resource association*, 1999, 35(2): 311 - 322.
- [6] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of hydrology*, 2010, 391(1): 202 - 216.
- [7] PANU U S, SHARMA T C. Challenges in drought research: Some perspectives and future directions [J]. *Hydrological science journal*, 2002, 47(S1): 19 - 30.
- [8] VICENTE SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of climate*, 2010, 23(7): 1696 - 1718.
- [9] VICENTE-SERRANO S M, CAMARERO J J, AZORIN-MOLINA C. Diverse response of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere [J]. *Global ecology and biogeography*, 2014, 23(9): 1 - 35.
- [10] VICENTE-SERRANO S M, GOUVIEA 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 of the United States of America*, 2013, 110(1): 52 - 57.
- [11] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions [C]// WILHITE D A. *Drought: A Global Assessment*. London: Routledge, 2000: 3 - 18.
- [12] ZHAO M S, RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940 - 943.
- [13] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应 [J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 589 - 598.
- [14] 宋艳玲, 董文杰. 1961 - 2000 年干旱对中国冬小麦产量的影响 [J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 235 - 240.
- [15] 唐饶, 孙睿. 基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 646 - 655.
- [16] 徐建文, 居辉, 刘勤, 等. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 460 - 470.
- [17] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值 [J]. *地理学报*, 2002, 57(1): 47 - 56.
- [18] LEI J, PETERS A J. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. *Remote sensing of environment*, 2003, 87(1): 85 - 98.