

淮河上游植被对气象干旱的响应

张特^{1,2}, 刘冀^{1,2}, 魏榕^{1,2}, 常文娟^{1,2}, 董晓华^{1,2}, 孙周亮^{1,2}

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘要:淮河流域是我国重要的农业基地之一,探究植被对气象干旱的响应规律有助于指导该地区的农业生产及生态保护。基于标准化降水蒸散指数(SPEI)和植被状态指数(VCI),采用线性趋势法探讨了淮河上游王家坝以上流域 2000—2014 年气象干旱及植被时空变化,并通过年最大相关系数(YR_{\max})和季最大相关系数(SR_{\max})分析了植被在年际和不同季节对气象干旱的响应特征。结果表明:(1)研究区 SPEI 整体以 $-0.089/a$ 速率呈非显著干旱化趋势,淮河以北地区干旱化趋势相对明显;(2)研究区 VCI 整体以 $0.053/a$ 速率呈显著上升趋势,整体植被状况逐渐好转,VCI 显著下降的区域多分布于城镇附近;(3)年际上,78.4% 的区域内 VCI 与 SPEI 显著相关,不同植被受气象干旱影响程度和敏感性整体差异不大;(4)春季和冬季植被受气象干旱影响的面积较广,分别有 68.9% 和 64.8% 的区域内 VCI 与 SPEI 显著相关,分布于流域西南、南部、北部和东部。夏季和秋季分别有 31.3% 和 15.0% 的区域内 VCI 与 SPEI 显著相关,夏季集中分布于流域中部,而秋季分布则比较零散;(5)春季和冬季不同植被的 SR_{\max} 整体差异较小,春季冬小麦和草地对气象干旱比较敏感,而冬季各类植被的敏感性差异不大。夏季和秋季各类植被的 SR_{\max} 整体上存在一定差异,但均未表现出显著相关性,植被普遍对 4 个月以下尺度的气象干旱敏感。2000—2014 年淮河上游地区植被对气象干旱响应特征的空间差异性较大,研究结果可为变化环境下的农业生产和生态保护政策制定提供理论支撑。

关键词:淮河上游; 气象干旱; 植被响应; SPEI 指数; VCI 指数

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0213-07

Response of Vegetation to Meteorological Drought in Upper Huaihe River Basin

ZHANG Te^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, WEI Rong^{1,2}, CHANG Wenjuan^{1,2}, DONG Xiaohua^{1,2}, SUN Zhouliang^{1,2}

(1.College of Hydraulic and Environment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China;

2.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: Huaihe River Basin is one of the major agricultural bases in China. Exploring the response of vegetation to meteorological drought has guide significance for agricultural production and ecological protection in Huaihe River Basin. Based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Vegetation Condition Index (VCI), the spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought and vegetation in the area above Wangjiaba in upper Huaihe River Basin from 2000 to 2014 were discussed by liner trend, the responses of vegetation to meteorological drought in interannual and different seasons were also analyzed by annual maximum correlation coefficient (YR_{\max}) and seasonal maximum correlation coefficient (SR_{\max}). The result show that: (1) SPEI of study area presented a non-significant declining trend by the interannual change rate of $-0.089/\text{year}$, and the relatively significant decline area was the north of Huaihe River; (2) VCI of study area showed a significant increasing trend by the interannual change rate of $0.053 a$, and the significant decline area concentrated in the vicinity of town; (3) on the interannual scale, there was 78.4% area where VCI was significantly correlated with SPEI, and there was no significant difference in impact and sensitivity of different vegetation to meteorological drought; (4) the area where the vegetation growth was more affected by meteorological drought in spring and winter was relatively larger, VCI and SPEI were significantly correlated in 68.9% and 64.8% of the whole area, these regions distributed in the southwest, south, north and east of the basin, respectively; there were 3 VCI were significantly correlated with SPEI in 31.3% and 15.0% of area in summer and autumn, respectively; in summer, the distribution concentrated in the middle of basin, but it scattered in autumn; (5) in spring and winter, the divergence of

收稿日期: 2019-06-26

修回日期: 2019-07-21

资助项目: 国家自然科学基金(51709151); 国家重点研发计划课题(2017YFC0405606); 三峡大学硕士学位论文培优基金(2019SSPY001)

第一作者: 张特(1996—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 961740186@qq.com

通信作者: 刘冀(1980—), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 主要从事流域水文模拟与防洪调度研究。E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

SR_{max} among different vegetation was small; wheat and grass were more sensitive to meteorological drought in spring, but the sensitivities of different types of vegetation were not significant in winter; the SR_{max} of various vegetation showed some differences in summer and autumn without significant correlation, and vegetation was generally sensitive to meteorological at the scale of less than 4 months. The response characteristics of vegetation to meteorological drought in the upper Huaihe River Basin had large difference in space from 2000 to 2014, these research results can provide theoretical support for formulating policy of agricultural production and ecological protection in the changing environment.

Keywords: upper Huaihe River Basin; meteorological drought; response of vegetation; SPEI; VCI

干旱作为一种区域水分异常缺乏的自然现象,对生态环境具有深远影响^[1]。在气候变化的大背景下,未来我国的干旱形势将日益严峻^[2],探讨植被对干旱的响应规律对于认识极端气候事件下生态环境脆弱性极其重要^[3]。由于对干旱机理和植被生理规律认识不足,当前植被对干旱的响应规律仍是一个有待解决的问题。

淮河流域位于我国南北气候分区地带,旱涝灾害频发。标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、Z 指数(Z-Index)、帕尔默指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)等干旱指数经常被用于定量评估淮河流域的干旱程度^[4-6],但这些指数存在物理机制不明确或不易计算等缺点。Vicente 等^[7]于 2010 年提出了物理机制明确且计算简便的标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Index, SPEI)在我国有着广泛的应用^[8]。同时遥感技术的不断发展为揭示区域植被动态变化特征提供了有效的技术手段,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能有效地反映植被覆盖特征,可用于植被动态监测^[9]。植被状态指数(Vegetation Condition Index, VCI)通过对 NDVI 逐像元归一化,使其在时间和空间上具有可比性,用于反映植被的受旱程度,能有效地进行干旱监测^[10]。由于干旱对生态环境的影响越来越大,植被对干旱的响应研究引起了很多关注。胡君德等^[11]基于 NDVI 和 Palmer 指数分析了鄂尔多斯高原植被对干旱的响应规律,结果表明夏季干旱很大程度上制约了秋季植被生长;赵舒怡等^[12]在华北地区开展了植被覆盖度与干旱条件的相关性研究,认为草原对干旱反应最为强烈,而森林反应不明显;刘世梁等^[13]分析了云南省植被对干旱的响应特征,发现月尺度上 NDVI 指数对 SPEI 指数有一定的滞后效应。

尽管近年来淮河流域的 NDVI 整体表现出上升趋势,植被状况有所好转^[14],但受气象条件影响,NDVI 年际波动较大,淮河流域植被对气象干旱的响应规律仍不明确。由于干旱具有累积性,且不同区域、不同植被对干旱的响应规律不同,二者的关联需

要从更细致的时空尺度进行讨论。本文以淮河上游为研究区,基于 SPEI 指数与 VCI 指数,探究研究区内植被对气象干旱的响应规律,以期为研究区生态保护及农业生产提供科学依据。

1 研究区概况

淮河流域位于我国气候过渡带,流域内年平均降雨约 1 040 mm,年平均气温 11~16 °C,汛期降水占年降水量的 60%~80%,独特的气候条件和地理位置导致流域内的旱涝问题比较严重。本文以淮河王家坝水文站以上流域为研究区,流域面积约 30 630 km²,流域内以农业区为主,约占流域面积的 68.8%,主要种植冬小麦、玉米和水稻^[15];林区主要分布于淮河源生态保护区,约占流域面积的 17.6%,流域概况如图 1 所示。

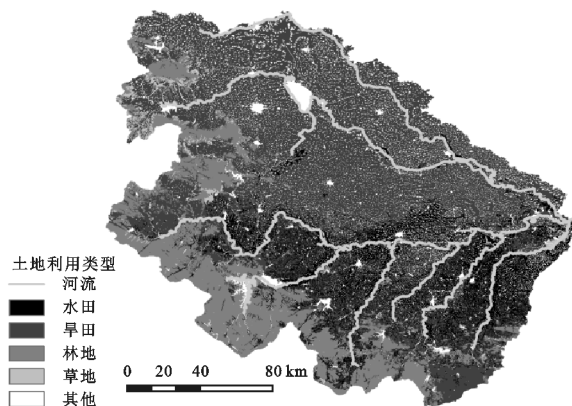


图 1 研究区地理位置及土地利用

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文所采用的气象数据为中科院青藏所发布的中国高分辨率月气象数据集 (doi: 10.3972/westdc.002.2014.db) 的月降水及气温资料,该数据集结合了中国气象局常规气象观测数据、Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、以及 TRMM 降水资料,分辨率为 10 km,数据年限为 1978—2014 年,为了匹配遥感数据的分辨率,将其重采样至 1 km 尺度。遥感数据包括植被和土地利用数据,植被数据来源于 NASA 的 MOD13A3 月 NDVI (<https://ladsweb.modaps.eos->

dis.nasa.gov),空间分辨率为1 km,本文选取的数据年限为2000年2月至2014年末;土地利用数据来源于淮河水利委员会,分辨率为30 m,由于2000—2013年淮河流域土地利用变化幅度不大^[14],因此本文采用2005年土地利用情况进行分析。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI) 由于地表蒸散的存在,降水不是决定干旱的唯一因素。Vicente采用降水与潜在蒸发的亏缺程度来量化干旱程度,提出了标准化降水蒸散指数SEPI,可有效评估不同时间尺度的干旱。计算方法如下:

$$D_j^k = \sum_{i=j-k+1}^j (P_i - PET_i) \quad (1)$$

式中: D 为水分亏缺量; P 为降雨量; PET 为潜在蒸发量; k, i, j 分别为分析时段的时间尺度和起、止时间。

采用三参数Log-logistic分布函数将 D 拟合成均值为0,标准差为1的正态分布:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^\beta \right]^{-2} \quad (2)$$

对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (3)$$

$$W = \begin{cases} \sqrt{-2\ln P}, & p \leq 0.5 \\ \sqrt{-2\ln(1-P)}, & p > 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{SPEI} = \begin{cases} W - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}, & p \leq 0.5 \\ \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} - W, & p > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.001308$ 。

2.2.2 植被状态指数(VCI) NDVI指数可以用来表征地表植被覆盖情况,但植被特征随季节变化明显,仅用NDVI指数无法判断干旱引起的植被变化情况。植被状态指数(VCI)能反映在当前水分供给条件下的生理状况,对于干旱胁迫具有良好的表征能力^[16]。其计算方法如式(6)所示:

$$\text{VCI} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (6)$$

式中:VCI为植被状态指数,其值越大表明当前植被长势越好;NDVI为当月植被指数;NDVI_{min}与NDVI_{max}分别为年内对应月份NDVI的最小值和最大值。同理,VCI也可拓展到年、季节尺度进行分析。

2.2.3 相关性分析 采用Person相关系数法分析VCI与SPEI的相关程度,计算方法见式(7)。将1—12月的VCI指数分别与12种时间尺度(1~12个月)的SPEI指数进行相关性分析,即每个网格得

到144个相关系数,将各网格最大的相关系数作为年最大相关系数YR_{max}。

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{12} (\text{VCI}_i - \overline{\text{VCI}})(\text{SPEI}_{i,j} - \overline{\text{SPEI}}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{12} (\text{VCI}_i - \overline{\text{VCI}})^2} \sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{12} (\text{SPEI}_{i,j} - \overline{\text{SPEI}}_j)^2}} \quad (7)$$

$$\text{YR}_{\max} = \max(R_{i,j}) \quad (8)$$

式中: i 为月份; j 为干旱时间尺度; $R_{i,j}$ 为 i 月VCI与 j 个月尺度气象干旱间的相关系数;YR_{max}为各网格年最大相关系数。

每个网格在不同季节包含36个相关系数,将每个网格在各季节内的最大相关系数作为季最大相关系数。

$$\text{SR}_{\max} = \max(R_{k,j}) \quad (9)$$

式中: k 为月份; j 为干旱时间尺度; $R_{k,j}$ 为 k 月VCI与 j 个月尺度气象干旱间的相关系数;SR_{max}为网格季最大相关系数。

3 结果分析与讨论

3.1 气象干旱与植被时间变化特征

采用12个月尺度的SPEI表征年际干旱程度,研究区2000—2014年年际SPEI与VCI变化情况如图2E所示。年SPEI以-0.089/a速率呈非显著下降趋势($p > 0.05$),其中2001年的SPEI值低至-1.70,流域整体达到重旱程度,为最严重干旱年,年降雨量仅680 mm,为多年平均降雨量的65%;2011—2013年为持续干旱年,根据《河南省水资源公报》记载,这些年份研究区内均发生了较为严重的干旱事件,表明SPEI能有效地表征研究区干旱程度。2001年VCI为0,表明研究时段内2001年植被状态最差,受同期干旱的影响较大。VCI在年际间有一定波动,整体以0.053/a的速率显著上升($p < 0.05$),研究区植被活动有所增强。

各季节的干旱程度采用3个月尺度的SPEI进行评估,不同季节的SPEI与VCI变化如图2A—D所示。研究区春、夏、秋、冬季SPEI的线性趋势分别为0.021/a, -0.084/a, 0.012/a, -0.098/a,夏季和冬季整体呈干旱化趋势,而春季和秋季整体呈湿润化趋势,但变化趋势均不显著($p > 0.05$)。对于植被而言,各季节VCI线性趋势分别为0.042/a, 0.053/a, 0.056/a, 0.042/a,均呈显著上升趋势($p < 0.05$),表明各季节植被活动整体有所增强。春季SPEI与VCI的相关系数达0.61($p < 0.05$),二者变化具有较高的一致性,表明研究区植被在春季受干旱影响较大,其他季节二者相关性并不显著。

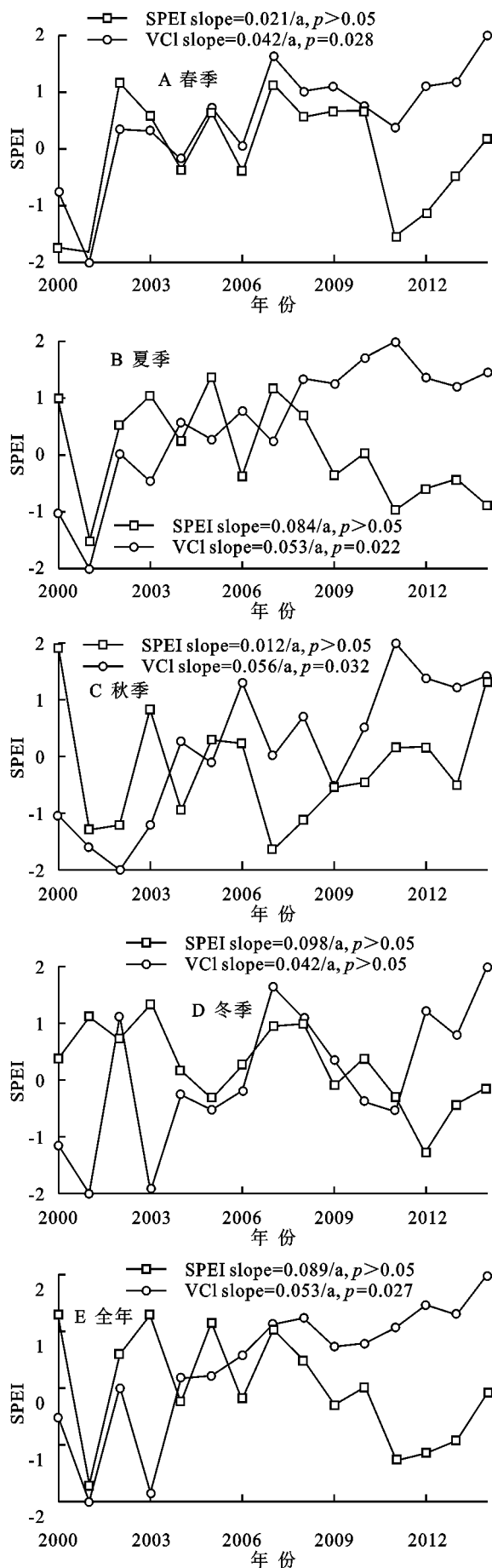


图2 春季、夏季、秋季、冬季、年 SPEI 与 VCI 变化趋势

3.2 气象干旱与植被空间变化特征

图 3 为年际、不同季节 SPEI 与 VCI 的空间变化情况,由图 3 可知,年尺度上,99.3%的区域呈干旱化趋势,但各处变化趋势均不显著($p > 0.05$),流域西北部和东部的干旱趋势相对明显。VCI 呈显著上升趋势的区域约占流域面积的 96.5%,表明研究区植被状况有所好转,约 3.5%区域 VCI 呈显著下降趋势,零散分布于研究区各处,且多为城镇区域附近。各季节 SPEI 呈下降趋势($p > 0.05$)的面积占比分别为 29.4%,98.2%,16.4%,97.8%,但不同季节 SPEI 变化程度的空间分布差异较大,春季和秋季研究区南部干旱趋势相对明显,而夏季和冬季 SPEI 减少趋势相对明显的地区主要位于研究区北部和中部。春季、夏季和秋季 VCI 变化趋势空间分布与年尺度上比较相似,VCI 显著下降的区域面积占比分别为 3.5%,2.8%,1.6%,冬季 VCI 呈显著下降趋势的面积最广,约占流域面积的 17.6%,主要分布于研究区东南部及西部地区。

3.3 植被与干旱的相关性分析

由于植被可利用的土壤水分取决于前期降雨、蒸散发,因此不同区域、不同植被对干旱的响应规律会有所差异。 YR_{max} 可用于表征干旱对植被的影响程度, YR_{max} 对应的时间尺度用于反映植被对干旱的敏感性,即 YR_{max} 越大表明干旱对植被的影响越大, YR_{max} 对应的时间尺度越大表明植被对短期干旱的抵抗能力越强^[17]。

图 4 为 VCI 与 SPEI 的年最大相关系数(YR_{max})和不同季节的季节最大性关系数(SR_{max})空间分布。研究区 YR_{max} 介于 0.08~0.94 之间,各像元均呈正相关关系,植被生长受气象干旱的限制,其中达到显著正相关($p < 0.05$)的区域占流域面积的 78.4%,主要分布于流域北部、西部、西南以及东部部分区域;流域南部地区的 YR_{max} 普遍未达到显著正相关。对于 YR_{max} 对应的干旱时间尺度分布而言,流域西南和西部地区 VCI 对 11~12 个月 SPEI 响应敏感,该区域内以林地植被为主,抗旱能力强;中部植被以农作物为主,对 9~10 个月 SPEI 敏感,可能是受到农业灌溉的影响;北部以及中部部分区域植被对 3~4 个月 SPEI 敏感,植被生长主要受季节性水分影响;对 1~2 个月 SPEI 响应敏感的区域集中分布于流域南部与中部地区,对短期水分条件敏感。

各季节 SR_{max} 通过显著性检验的面积比例与区域平均 SR_{max} 从大到小依次为冬季(68.9%,0.58)、春季(64.8%,0.56)、夏季(31.3%,0.44)、秋季(15.0%,0.37),研究区植被在春季和冬季易受干旱影响,夏季和秋季受干

旱影响相对较小。对于 SR_{max} 的空间分布而言,春季和冬季的分布规律比较类似,流域西南、北部、中部及东部部分地区 SR_{max} 较高,夏季 SR_{max} 较高的区域主要集中在流域中部,秋季 SR_{max} 普遍未通过显著性检验,仅中部及西北部少部分区域 SR_{max} 较高。

不同季节 SR_{max} 对应的干旱尺度在空间分布上具有显著差异,春季研究区东南部和北部植被主要对

1~6 个月尺度的干旱敏感,而中部和西南部植被对 9~12 个月尺度干旱敏感;夏季植被普遍对 1~4 个月尺度干旱更加敏感,研究区东部和西部部分植被则对 9~12 个月尺度干旱敏感;秋季大部分植被对 1~4 个月尺度干旱比较敏感;冬季植被普遍对 7~12 个月尺度干旱敏感,部分植被对 1~4 个月尺度干旱敏感,零散分布与流域各处。

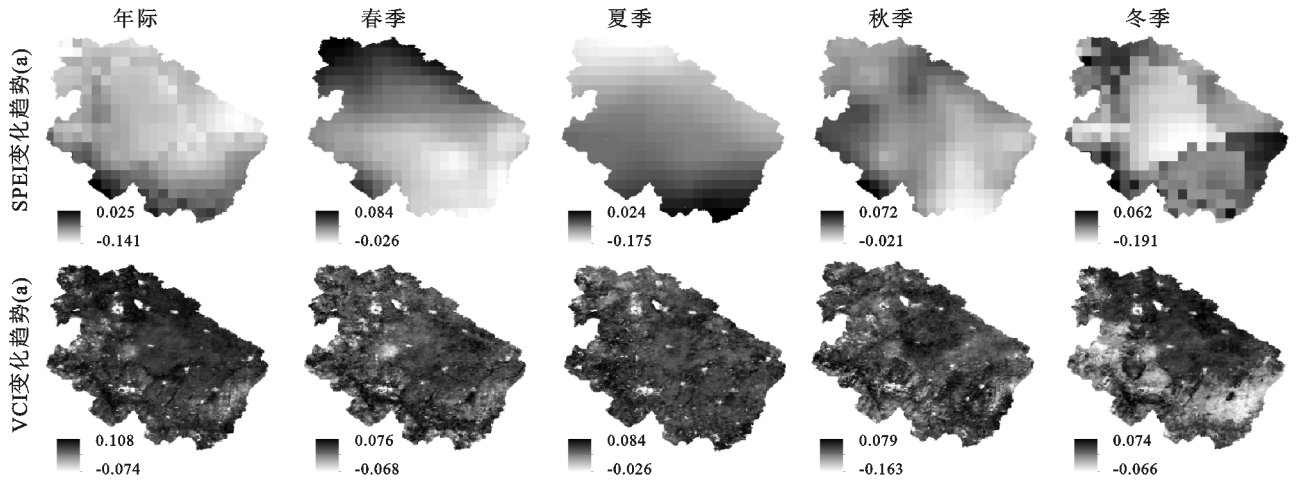


图 3 年际、不同季节 SPEI 与 VCI 空间变化趋势

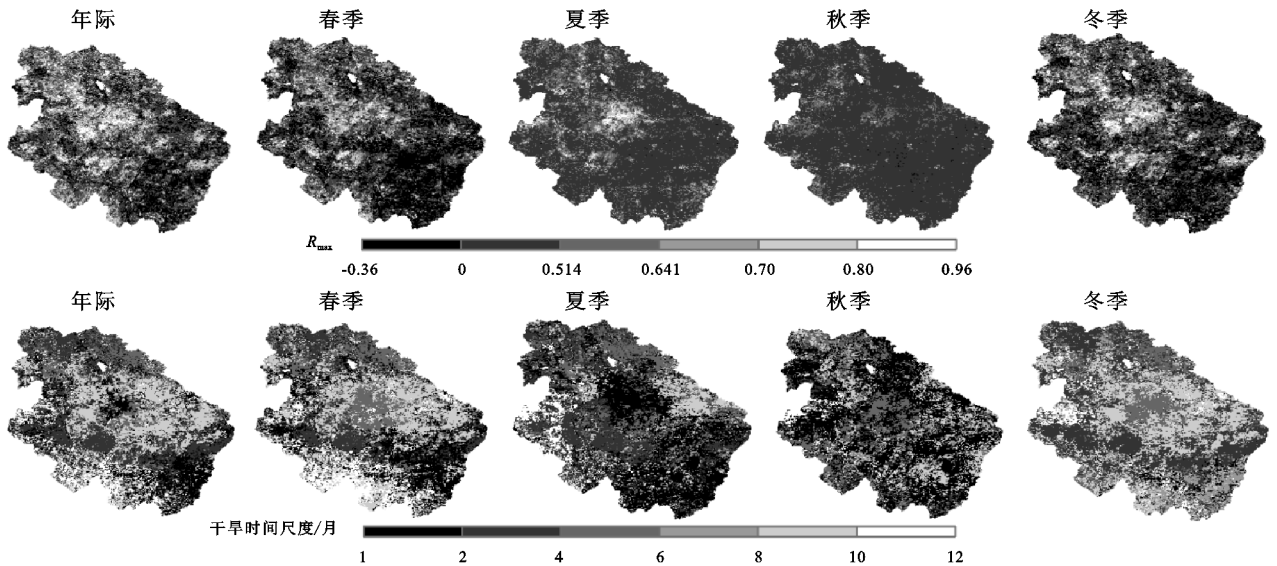


图 4 年、季节 R_{max} 与对应干旱时间尺度空间分布图(图中 R_{max} 大于 0.514 时代表 0.05 置信水平上显著相关)

为了探究不同植被对气象干旱的响应差异,对不同土地利用类型植被的 YR_{max} 、各季节的 SR_{max} 及其对应的干旱时间尺度进行统计分析,结果如图 5 所示。研究区主要作物为冬小麦、水稻和玉米,水田区域仅在夏季和秋季存在。整体上看,图 5A 中作物、林地和草地的 YR_{max} 分布差异不大,中位数分别为 0.61,0.60,0.59,气象干旱对 3 种植物的影响程度相差无几,但图 5B 中 YR_{max} 对应的干旱时间尺度上存在一定差异,草地整体对 4 个月尺度干旱敏感,而作物和林地整体对 5 个月尺度干旱敏感。

图 5A 中,不同植被在春季和冬季的 SR_{max} 分布

差异不大,中位数分别为:旱田作物(0.56,0.58)、林地(0.56,0.55)和草地(0.56,0.57),各类植被受干旱影响显著,但图 5B 中不同植被 SR_{max} 对应的干旱尺度有所差异,春季林地整体对 10 个月尺度干旱敏感,而旱田作物和草地对 5 个月干旱比较敏感,冬季各类植被整体对 4~5 个月尺度的干旱比较敏感。在夏季和秋季,各类植被的 SR_{max} 存在一定差异,中位数分别为:水田(0.38,0.27)、旱田(0.46,0.38)、林地(0.43,0.42)和草地(0.41,0.41),各类植被的平均 SR_{max} 均未通过 0.05 水平显著性检验,夏季水田和草地植被整体对 3 个月尺度干旱敏感,其他植被则对 4 个月尺度

干旱敏感,秋季林地整体对 3 个月尺度的干旱敏感,

其他植被则对 1 个月尺度的干旱比较敏感。

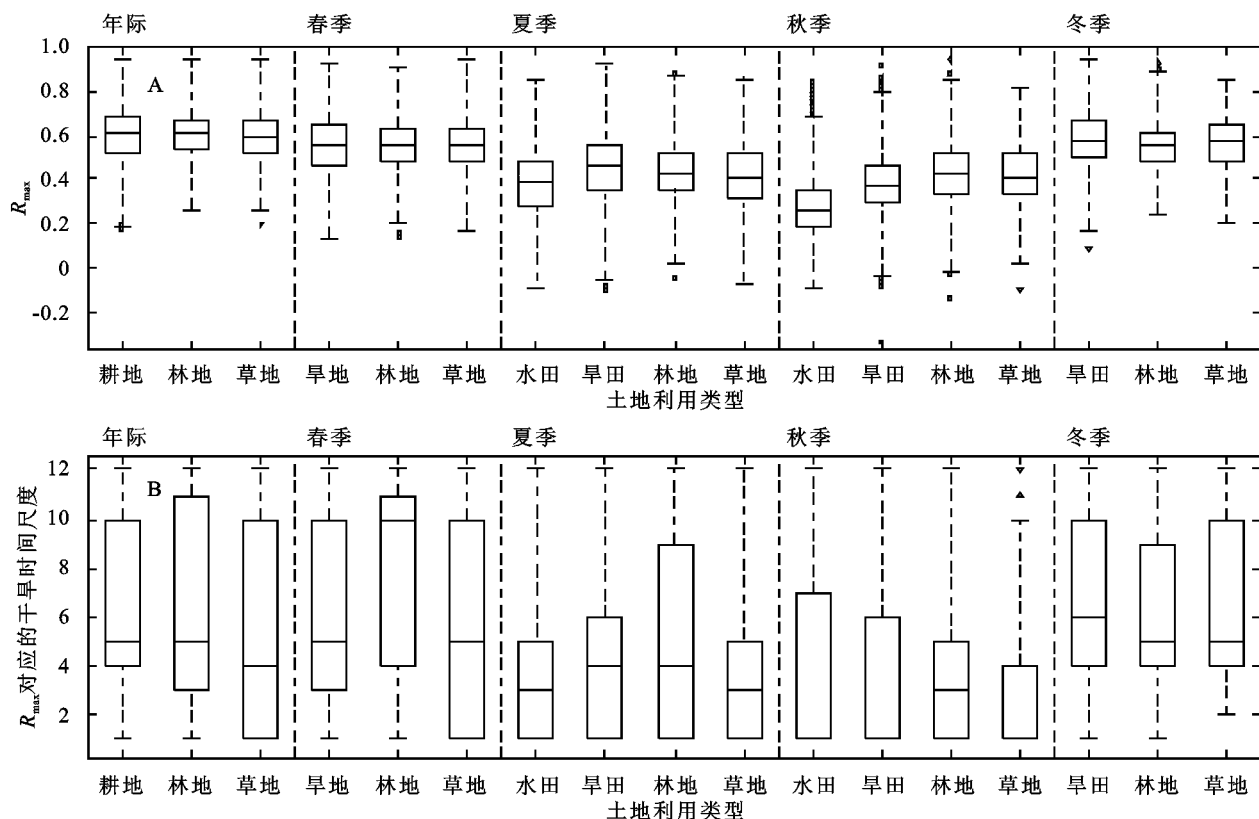


图 5 不同植被年、季节 R_{max} 及对应干旱时间尺度分布

3.4 讨论

淮河上游地区 1961—2010 年来降雨变化趋势不显著,而气温呈上升趋势^[18],气温上升可能是流域干旱化的主要原因。流域内降水主要集中在夏季,而图 2 中夏季 98.2% 的区域 SPEI 呈下降趋势,夏季 SPEI 的减少主导了流域年际上的干旱化趋势。年际 VCI 指数以 0.04/a 的速率上升,表明流域植被状况逐渐好转,可能是由于气温上升对植被生长有一定促进作用,同时人类活动也会对植被生长造成影响^[19],合理的生态、农业管理政策也对植被生长起到了积极作用,而 VCI 显著下降的区域多分布在各城镇区附近,与城市扩张有较大关联。冬季 VCI 显著下降的区域面积较大,并与 SPEI 的变化趋势在空间分布上具有一致性。

VCI 与 SPEI 之间的相关程度受区域气候特征、土地利用、灌溉量、植被种类和土壤质地多种因素影响,其中区域气候特征是影响二者关系的最重要影响因素^[16]。相关研究表明由降雨和潜在蒸发决定的流域水分亏缺是植被对干旱响应程度的关键因子^[17],本研究区从东南至西北部水分亏缺量(0~400 mm)逐渐递增,与 YR_{max} 的空间分布高度一致(图 4),区域气候特征主导了气象干旱对植被的影响程度,而植被种类不是影响 YR_{max} 的主要因素(图 5A)。流域西北

和西部林地根系发达,发生气象干旱时,短期内能汲取深层土壤水分进行补给,因此主要受长尺度干旱的影响(图 5B)。耕地作物对 1~4 个月尺度气象干旱敏感,主要受短期土壤水分影响,而 3 个月尺度的 SPEI 被证明能较好地表征短期土壤湿度变化特征^[20],部分农作物对 9~10 个月尺度干旱敏感,可能与农业灌溉有关,草地仅能汲取浅层土壤水分,易受到短期气象干旱的影响。

图 4 中植被在春季和冬季受干旱显著影响的面积较大,而夏季和秋季影响面积相对较小,这与降水的年内分配有关,研究区降水集中在夏季,而冬旱、春旱时有发生,易对冬小麦、林地、草地等植被生长造成影响,虽然夏季降水充裕,但降雨的空间分布不均会导致局部地区植被生长受到影响,尤其是对于不耐旱作物影响更为显著。图 5 中,不同植被在春季、冬季的 SR_{max} 相差无几,表明气象干旱对不同植被的影响差异不大,各类植被对 5 个月及以上的气象干旱敏感,尤其是春季林地整体对 10 个月尺度的干旱敏感,抗旱能力最强。由于夏、秋季多雨的气候特征和农业灌溉的影响,SPEI 与 VCI 之间没有显著的相关性,各类植被均对低于 4 个月尺度的干旱敏感。

本文采用 VCI 表征植被受旱程度,但虫害、施肥等其他因素同样会影响 VCI 的波动,今后应进一步

结合地表温度信息以期更精确地表征植被受旱状态。研究结果对变化环境下的生态环境保护工作具有一定指导意义,本研究区以农业区为主,植被生长受人为影响较大,后续的研究中需进一步考虑人为因素的影响。

4 结论

本文分析了淮河上游地区气象干旱和植被的变化情况以及二者之间的相关性,得出以下结论:

(1) 2000—2014年来淮河上游地区整体上呈不显著干旱化趋势,干旱化区域占研究区面积的99.3%,淮河以北的干旱化趋势最为明显;流域内VCI以0.053/a速率显著上升,占流域面积的96.5%,植被状态整体有所好转。

(2) 淮河上游地区SPEI和VCI在年内具有显著相关性的区域占流域面积的78.4%,分布于流域西南、南部、北部和东部。林地对9~12个月的长时间尺度气象干旱敏感,农作物主要对1~4个月的短尺度气象干旱响应迅速,部分作物受9~10个月尺度的气象干旱影响最大。

(3) 春季和冬季分别有68.9%和64.8%的植被对气象干旱响应比较明显,且不同类型植被所受影响程度差异不大,春季冬小麦和草地对气象干旱更加敏感,冬季3种植被对气象干旱的敏感性差异不大;夏季和秋季植被受气象干旱显著影响面积相对较小,分别占流域面积的31.3%和15.0%,夏季仅流域中部玉米受气象干旱影响较大,秋季分布比较零散,各类植被均对4个月以下尺度的气象干旱比较敏感,但整体并未受到显著影响。

参考文献:

- [1] Potter C, Klooster S, Hiatt C, et al. Changes in the carbon cycle of Amazon ecosystems during the 2010 drought[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(3):329-346.
- [2] Liang L, Zhao S H, Qin Z H, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in china from 2001 to 2010[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7):1501-1508.
- [3] Smith A M S, Kolden C A, Tinkham W T, et al. Remote sensing the vulnerability of vegetation in natural terrestrial ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154:322-337.
- [4] 郭佳香,王景才,周建康,等.基于SPI和HI的淮河上中游流域气象干旱特征分析[J].*人民珠江*, 2017, 38(10): 36-41.
- [5] 曹永强,邵文婷,曲本亮,等.基于修正Z指数的淮河流域干旱时空特性分析[J].*中国水利水电科学研究院学报*, 2014, 12(4):344-348.
- [6] 王文,徐红.Palmer干旱指数在淮河流域的修正及应用[J].*地球科学进展*, 2012, 27(1):60-67.
- [7] Vicente-Serrano S M, Begueria 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.
- [8] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等.基于SPEI的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J].*水土保持研究*, 2019, 26(2): 227-233.
- [9] 宋敏敏,张青峰,吴发启,等.基于NDVI的延河流域时空演变分析[J].*水土保持研究*, 2017, 24(4):6-11.
- [10] 沙莎,郭锐,李耀辉,等.植被状态指数VCI与几种气象干旱指数的对比:以河南省为例[J].*冰川冻土*, 2013, 35(4):990-998.
- [11] 胡君德,李百岁,萨楚拉,等.2000—2012年鄂尔多斯高原植被动态及干旱响应[J].*测绘科学*, 2018, 43(4):49-58.
- [12] 赵舒怡.2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].*地理学报*, 2015, 70(5):717-729.
- [13] 刘世梁,田韞钰,尹艺洁,等.云南省植被NDVI时间变化特征及其对干旱的响应[J].*生态学报*, 2016, 36(15): 4699-4707.
- [14] 严登明,翁白莎,于志磊,等.淮河流域土地利用时空格局动态及其植被覆盖变化分析[J].*中国农村水利水电*, 2016(11):52-57.
- [15] 姚筠,许莹,马晓群,等.淮河流域降水变化对主要农作物气候生产潜力的限制[J].*资源科学*, 2017, 39(3): 490-500.
- [16] Quiring S M, Ganesh S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index(VCI)for monitoring meteorological drought in Texas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3):330-339.
- [17] Zhang Q, Kong D, Singh V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 152:1-11.
- [18] 叶金印,黄勇,张春莉,等.近50年淮河流域气候变化时空特征分析[J].*生态环境学报*, 2016, 25(1):84-91.
- [19] 谷金芝,宫兆宁.2001—2015年华北平原植被覆盖度时空变化特征及影响因素分析[J].*测绘与空间地理信息*, 2018, 47(8):47-51.
- [20] Xu K, Yang D, Yang H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961—2012: A climatic perspective[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526:253-264.