

文章编号: 1008-2786-(2018)4-536-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000350

京津风沙源区干旱时空特征及对植被变化的影响

马志婷, 武志涛*, 卫 洁

(山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

摘 要: 本文基于京津风沙源区 27 个站点 1960—2014 年逐月气温和降水数据, 采用标准降水蒸散指数 (SPEI), 从干旱趋势、干旱面积和干旱频率等方面分析了研究区干旱的时空变化特征; 在此基础上, 利用 SPEI 和 NDVI 指数, 分析了干旱对区域植被变化的影响。结果表明: (1) 1960—2014 京津风沙源区 SPEI 呈显著下降的趋势, 多次严重干旱均出现工程实施的近 15 年。过去 55 年京津风沙源区大部分区域 SPEI 呈下降趋势, 显著下降的区域主要集中在内蒙古草原地区。(2) 1960—2014 年轻度干旱、中度干旱和严重干旱的面积均呈上升的趋势。2001 年和 2009 年严重干旱面积分别占整个研究区的 49.00% 和 41.10%。(3) 1960—2014 年干旱频率从西北向东南呈递减趋势。1996—2014 年干旱频率比 1978—1995 年和 1960—1977 年分别增长了 7.59% 和 9.09%。京津风沙源区最长干旱持续时间都接近或超过半年。(4) 1982—2014 年研究区 92.52% 的区域 SPEI 和 NDVI 呈正相关关系, 表明干旱会对区域植被产生重要影响。干旱趋势、干旱面积和干旱频率均表明, 京津风沙源区干旱情况加重, 尤其治理工程实施的近 15 年干旱程度更加严重。本文研究结果对京津风沙源区植被恢复重建具有重要的指导意义。

关键词: 干旱; 标准降水蒸散指数 (SPEI); 归一化植被指数 (NDVI); 时空变化; 京津风沙源区

中图分类号: P467

文献标志码: A

干旱由于其发生频率高、持续时间长, 影响范围广、后续影响大, 已经成为影响我国甚至全世界范围内农业生产和生态环境最严重的自然灾害之一^[1-2]。干旱不仅对农业生产产生严重影响, 还会导致生态环境进一步恶化^[3-4]。干旱通过多种途径影响植被, 如干旱通过抑制光合作用和改变呼吸作用影响植被的生长。严重干旱则会进一步导致植被的减少, 改变植被的死亡率, 进而导致区域生态环境的恶化^[5]。因此, 研究干旱的时空变化并探索干旱对植被变化的影响具有重要的科学意义。

基于不同干旱指数, 国内外学者主要通过干旱趋势, 干旱面积和干旱频率等指标来研究干旱的时空变化。目前, 监测干旱的指数有帕尔默干旱指数

(Palmer Drought Severity Index, PDSI), 标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、综合气象干旱指数、Z 指数、相对湿润指数等^[6]。近年来使用广泛的三个指数是 PDSI、SPI 和 SPEI。SPI 是在利用伽马分布概率表示出的降水量变化的基础上进行正态标准化处理, 最后再划分干旱等级。另外, SPI 具有不同时间尺度的特点。另外一种使用较为频繁的干旱指数 PDSI, 主要依据的是水分平衡原理, 考虑前期降水量和水分供需平衡来表征一段时间内某地区实际水分持续少于该地适宜水分的亏缺^[6]。但是 SPI 只考虑了降水的变化来反应干旱的变化, PDSI 虽然考虑

收稿日期 (Received date): 2017-06-28; **改回日期** (Accepted date): 2018-01-09

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金青年基金 (41401643); 山西省自然科学基金 (201701D221216) [National Natural Science of China (41401643); Natural Science of Shanxi Province (201701D221216)]

作者简介 (Biography): 马志婷 (1992-) 女, 山西太原, 硕士研究生, 主要研究方向: 干旱灾害风险 [MA Zhiting (1992-), female, born in Taiyuan, Shanxi, M. Sc. candidate, major in ecology] E-mail: 15035483272@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 武志涛 (1985-), 男, 山西吕梁, 副教授, 博士, 主要研究方向: 灾害遥感及应用、“3s”技术集成及应用 [WU Zhitao (1985-), male, born in Lvliang, Shanxi, associate professor, Ph. D., research on disaster remote sensing; “3S” technology integration and application] E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn

了蒸散发的变化,但不具有不同尺度的特点,对长期、中期和短期的干旱表征存在一定的不足。近年来,SPEI 具备 SPI 计算简单、多时空比较的优点^[7]。国内外学者利用 SPEI 开展了多项研究工作。如国外学者利用 SPEI 分析了 1961—2012 年捷克和 1982—2006 年地中海地区的干旱时空变化特征^[8-9]。国内学者利用 SPEI 分析了华北地区、西北地区 and 西南地区的干旱时空特征,研究发现华北地区近 50 年来干旱发生强度呈明显增强趋势,尤其是在 20 世纪 80、90 年代^[1];西北地区普遍存在干旱现象,云贵交界区干旱频率呈显著增加趋势^[10-11]。干旱对区域植被变化产生了重要的影响。如刘世梁等基于 SPEI 研究了澜沧江气候变化对 NDVI 的影响,得出 NDVI 对 SPEI 的响应比较敏感,干旱程度对流域植被状况有一定影响^[12]。此外,一些学者基于 SPEI 和 NDVI 指数对中国流域尺度的干旱和植被分布做了时空演变分析,研究发现气象干旱对植被生长的影响有明显的区域性^[13-14]。

为改善京津及其周边的生态环境,遏制区域土地沙化,我国政府于 2001 年启动实施了京津风沙源治理工程^[15]。该区地处京津以北,位于我国北方农牧交错带上,沙漠化急剧发展,生态环境恶化,自然灾害频繁^[16]。孙斌等人^[17]采用 M-K 检验的方法分析 1982—2010 年京津风沙源区的气候变化得出近 30 年该地区发生了多次严重的干旱事件,气温呈现显著上升趋势,降水和湿润指数总体均呈现下降趋势,但变化趋势并不显著,裴亮等人^[18]也得出:2000—2008 年京津风沙源区气温和降水都存在一定的增加趋势。但是,上述研究对京津风沙源干旱时空特征的刻画还存在一定的不足,研究的时空特征有待进一步的扩展。此外,随着生态工程建设的实施,重大干旱会对区域的植被变化产生何种影响尚不明确。因此,本研究基于 SPEI 指数,从干旱趋势、干旱面积和干旱频率等方面研究京津风沙源区干旱的时空变化特征。在此基础上,分析近干旱对该区植被变化的影响,以期工程的植被恢复重建提供重要的科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

本文选取京津风沙源一期工程区为研究区(图 1),该区东起河北省的平泉县,西至内蒙古的达尔

罕茂名安联合旗,南起山西的代县,北至内蒙古自治区的东乌珠穆沁旗。地理坐标为东经 109°30′~119°20′,北纬 38°50′~46°40′。东西横跨近 700 km,南北横跨近 600 km,范围包括北京、天津、河北、山西及内蒙古等五省(自治区、直辖市)的 75 个县(旗、市、区),总面积为 45.8 万 km²^[19-20]。

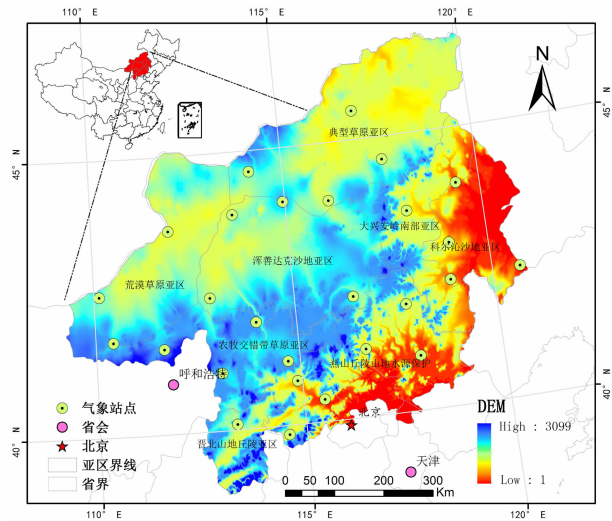


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of study area in China

1.2 数据处理

1.2.1 标准降水蒸散指数 SPEI

京津风沙源区 27 个气象站 1960—2014 年地面逐月气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,所使用的气象要素包括逐月平均降水和月平均气温等。SPEI 指数计算方法如下^[21]:

利用选取地面气象站的逐月气候资料,并采用 Thornthwaite 方法计算月潜在蒸发量(E),然后计算月降水量(P)与月潜在蒸发量的差值,即月累积水分盈亏量 D 。最后构建不同时间尺度的水分盈亏量累积序列,可根据 McKee 等人所提出的公式来计算

$$D_i^k = \sum_{i=k+1}^N (P_i - E_{Pi}) \quad (1)$$

其中, k 为序列时间尺度(单位:月), $k = 1, 2, \dots, 48$; n 为该序列的样本数, $i = 1, 2, \dots, n$ 。然后计算 α, β, γ 的函数值

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\tau(1 + \frac{1}{\beta})\tau(1 - \frac{1}{\beta})} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - \omega_2} \quad (3)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\tau(1 + \frac{1}{\beta})\tau(1 - \frac{1}{\beta}) \quad (4)$$

其中, $\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - \frac{i-0.35}{N})^s D_i$, s 分别取 0, 1, 2, 由此计算各个站点的 ω_0 、 ω_1 和 ω_2 , N 是参与计算的月份数, 即 D_i 的个数; D_i 的概率分布函数 $F(X)$ 由下式算出

$$F(X) = [1 + (\frac{\alpha}{x - \gamma})^\beta]^{-1} \quad (5)$$

最后计算 SPEI 指数 (SPEI)

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (6)$$

$C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。当 $P \leq 0.5$ 时, $P = 1 - F(x)$; 当 $P = 1 - P$ 时, SPEI 正负逆转^[22]。其中 SPEI 干旱等级分类标准如表 1 所示^[23]:

表 1 SPEI 干旱等级分类

Tab. 1 Drought classification based on SPEI

SPEI	干旱情况
≤ -2.0	极端干旱
$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	严重干旱
$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$	中度干旱
$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$	轻度干旱
$-0.5 < \text{SPEI} \leq 0.5$	正常

除此之外, 为了深入了解 SPEI 的性能, 采用滑动累计的方法统计了不同尺度 (包括 1 月、3 月、6 月、9 月、12 月、18 月和 24 月) SPEI 的年变化趋势。

1.2.2 归一化植被指数 NDVI

本文采用的 NDVI 数据是由美国国家航天航空局 (NASA) 全球监测与模型研究组 (GIMMS) 提供的新一代 NOAA/AVHR 遥感数据 (NDVI3g)。采用最大值合成法将 1982—2014 年的 15 天的 NDVI 数据合成月 NDVI 值, 每年 12 幅图像, 共计 396 幅图像, 空间分辨率为 8 km。NDVI 距平值作为研究植被变化的指标, 年 NDVI 距平为每年 NDVI 值与 33 年 NDVI 平均值的差值。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验法

本文采用 Mann-Kendall (MK) 非参数检验方法基于 SPEI 对京津风沙源区变干变湿的趋势变化进行研究^[24-25], 比起线性回归方法, MK 检验不需要方差正态性假设, 并且对异常值不敏感。在该方法

中原假设 H_0 为时间序列数据 (X_1, \dots, X_n) , 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本; 备择假设 H_1 是双边检验, 对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, X_k 和 X_j 的分布是不相同的, 检验的统计量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n-1} \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (7)$$

其中

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases}$$

S 为正态分布, 其均值为 0, 方差当 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 > 10$ 时, 标准的正态系统变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

这样, 在双边的趋势检验中, 在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 Z , 大于 0 时是上升趋势; 小于 0 时是下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.96 时, 表示通过了置信度 95% 的显著性检验。 $Z > 1.96$ 表示观测序列呈上升趋势, $Z < -1.96$ 与之相反^[26-27]。

1.3.2 干旱指标计算

为了分析干旱的面积及干旱对植被的影响, 本文利用京津风沙源区周边 53 个站点, 采用反距离权重插值法 (Inverse Distance Weighting, IDW) 将 1960—2014 年 SPEI 插值为 8×8 km 的栅格图。干旱面积百分比为 $\text{SPEI} \leq -1$ 的像元个数占总像元个数的百分比。干旱频率为 $\text{SPEI} \leq -1$ 的月个数占总月份数的比值。干旱持续时间为从月 $\text{SPEI} \leq -1$ 开始, 直到 $\text{SPEI} > -1$ 结束时的持续月的个数。最长干旱持续时间为所有干旱事件中持续月份数的最大值^[28-30]。SPEI 与 NDVI 的相关关系研究采用 Pearson 相关系数进行检验。

2 结果与分析

2.1 京津风沙源区干旱趋势变化特征

1960—2014 年京津风沙源区 SPEI 总体呈现显著下降趋势 ($R^2 = 0.138$, $P < 0.01$), 平均每 10a 下

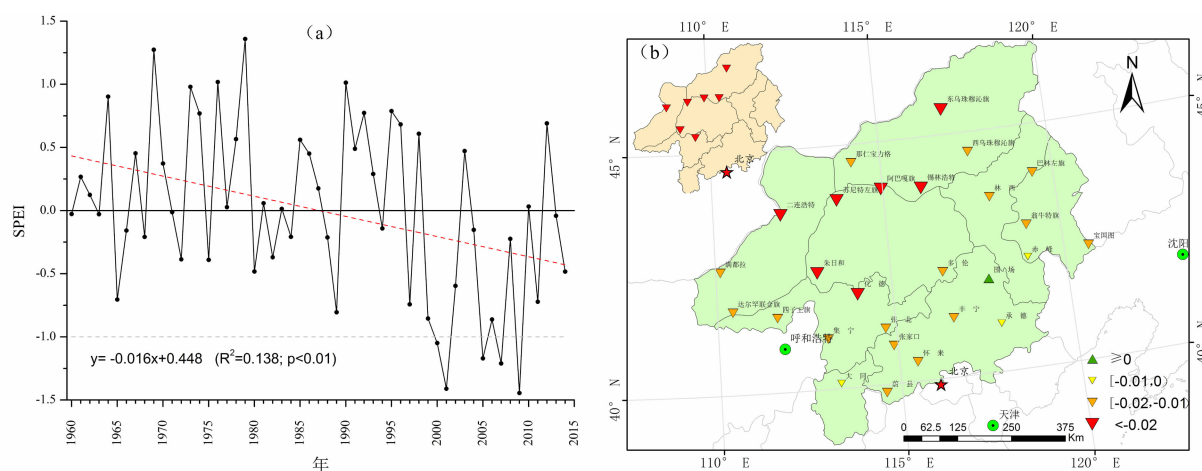


图2 研究区1960—2014SPEI时间(a)和空间(b)变化趋势

Fig. 2 Temporal (a) and spatial (b) trends of SPEI in BTSSR during 1960–2014

降0.16,表明近55年京津风沙源区在呈现逐渐变干的趋势(图2a)。尤其在京津风沙源治理工程实施的15年(2000—2014年), $SPEI \leq -1$ 的年份明显增多,甚至在2001年和2009年SPEI值接近-1.5,整个研究区达到严重干旱的程度。图2b为1960—2014年京津风沙源区SPEI指数变化趋势空间分布图,除围场外,其余站点SPEI均呈下降趋势。其中内蒙古草原区的二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、朱日和等多个站点SPEI呈显著下降的趋势,显著变干趋势的站点占区域的25.93%(图2b中的左上方小图)。SPEI空间变化表明在近55年京津风沙源区整体呈现变干的趋势,其中草原覆盖区尤为严重。

为了进一步分析京津风沙源区干旱的时间变化情况,图3绘制了1月、3月、6月、9月、12月、18月和24月不同尺度SPEI随时间的变化情况。通过各个时间尺度SPEI年际变化的比较可以发现,不同时间尺度的SPEI均呈现出一致的线性趋势,SPEI呈显著下降的趋势,尤其是工程实施的近15年严重干旱($SPEI \leq -1.5$)出现的次数显著增加。这个结果是与与北方同时间段干旱情况是一致的^[31]。

2.2 京津风沙源区干旱面积变化特征

图4为京津风沙源区不同程度干旱面积的时间变化。总体趋势上,研究区不同等级干旱面积百分比均在工程实施后的近15年呈现大幅增加的 trend。(1)近55年京津风沙源区不同程度干旱面积百分比呈现周期性波动,峰值间隔也比较大,但近15年峰值增大,峰值的间隔也比较集中;(2)轻度干旱($SPEI \leq -0.5$)在1965、1989、1997、2000、2001、2007和2009等年份出现50%的峰值,其中在2000、

2007、2001、2009年干旱面积百分比分别达到92.4%、94.00%、96.44%和99.00%,均远大于常年;(3)中度干旱($SPEI \leq -1$)面积百分比>25%的峰值出现在1965、1989、1997、2001、2005、2007、2009和2011年,近15年峰值数量和大小均有增加,其中2007、2009和2001年面积百分比均超过70%;(4)严重干旱($SPEI \leq -1.5$)的面积百分比明显小于中度和轻度干旱,但在1965、2001、2005、2007和2009年仍出现明显的峰值,在近15年,严重干旱峰值达到了2001年的49.00%以及2009年的41.10%。因此,在近55年年内京津风沙源区的不同程度的干旱所占面积是很大的,尤其是工程实施的近15年,严重干旱和中度干旱增加明显。这与前人在整个中国尺度研究的结果比较类似。如Yu等人研究发现,1997年整个中国北方干旱的程度在加重。因此,认为京津风沙源区的干旱加重主要是自然气候变化的作用^[32]。

2.3 京津风沙源区干旱频率变化特征

本文将1960—2014年总时间段平均分成了三个亚时间段,分别是1960—1977、1978—1995和1996—2014。图5是研究区在三个亚时间段SPEI累计频率的变化情况。从图中可以看出,研究区在1960—1977和1978—1995年这两个时间段累计频率的变化情况是一致的,而与1996—2014年存在明显差异。在1996—2014年干旱严重程度明显增强。以严重干旱为例,1996—2014年的累计频率变化趋势为先快后慢, $SPEI \leq -1$ 时的累计频率为22.22%,与1978—1995年和1960—1977年分别同比增长了7.59%和9.09%。因此,研究区55年间

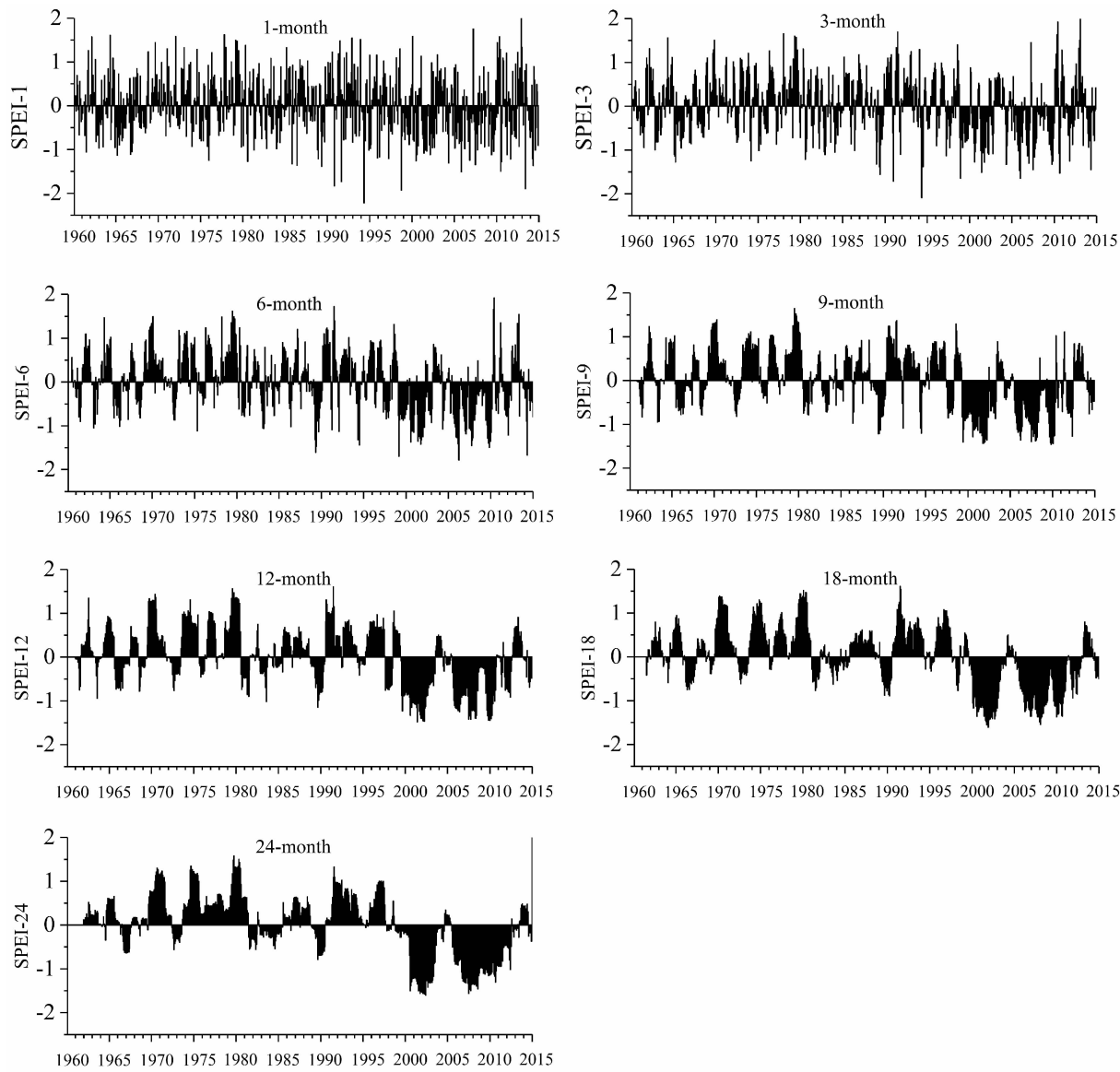


图3 京津风沙源区多尺度 SPEI 动态特征

Fig.3 Long-term dynamic characteristics of multi-time scale SPEI in BTSSR

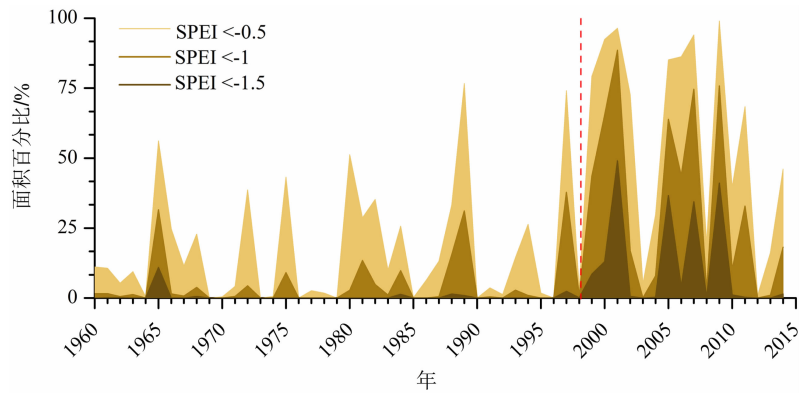


图4 1960—2014 年京津风沙源区不同干旱程度面积变化

Fig.4 Different levels of the change of drought area from 1960 -2014 in the Beijing - Tianjin sand source region

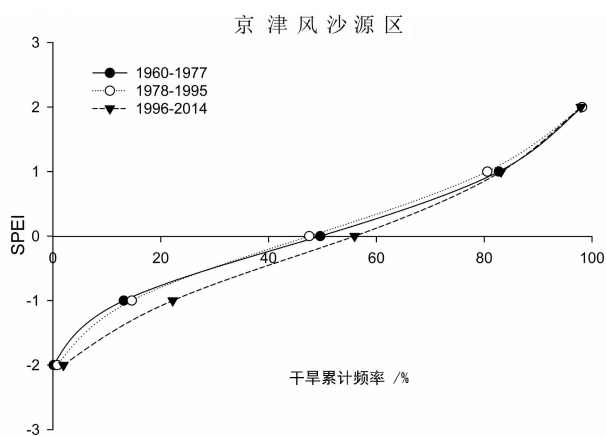


图5 不同时段研究区 SPEI 的累计频率变化

Fig. 5 The cumulative frequency of SPEI in different periods in BTSSR

干旱发生的频率在增加,尤其 1996—2014 期间干旱频率增加显著。

京津风沙源区 1960—1977 年、1978—1995 年和 1996—2014 年的干旱频率空间分布差异较大(图 6a)。1960—1977 和 1978—1995 年研究区内河北省的怀来,蔚县,承德,围场等站点、山西省大同站点和内蒙古集宁,赤峰,翁牛特旗等站点干旱频率明显高于其他站点。而 1996—2014 年干旱频率明显集中在研究区的西北地区,多个站点近 20 年干旱频率占总时间段的 50% 以上。且 1996—2014 年期间,各个站点的干旱频率均高于前两个时间段。

图 6b 为京津风沙源区各个站点干旱的最长持续时间的空间分布。整体来说,各个站点的干旱最长持续时间都接近或超过半年,干旱强度比较严重。

近 55 年内干旱持续时间最长的是河北省蔚县站点,干旱持续 1 年以上。其次山西省的大同县,出现了 12 个月的持续干旱事件。内蒙古草原地区多个站点干旱持续最长也达到 10 个月以上,如阿巴嘎旗和锡林浩特两个站点干旱持续时间达到 11 个月。对比三个亚时间段可知,持续时间最长的年份大都集中在 1996—2014 年中。表明近 20 年京津风沙源区的干旱情况比较严重。

2.4 干旱与植被变化相关性分析

京津风沙源区 1982—2014 年 SPEI 与 NDVI 距平的年际变化如图 7a 所示。从图中可以看出,NDVI 年际变化与 SPEI 的年际变化存在较好的正相关。2007 年和 2009 年的干旱 ($SPEI \leq -1$) 均导致了研究区 NDVI 的显著下降,表明干旱一定程度上导致了京津风沙源区 NDVI 的下降。将研究区 1982—2014 年年度 SPEI 与相应年度的 NDVI 进行相关性分析,得到其相关性空间分布图(图 7b)。统计发现,研究区 92.52% 区域的 SPEI 和 NDVI 呈正相关关系,47.88% 的区域呈显著正相关关系,主要集中在内蒙古草原地区。在晋北山地丘陵亚区,大兴安岭南部亚区等少数地区表现为显著负相关关系。因此,京津风沙源实施以来,干旱对区域的植被变化产生了重要的影响。但是不同区域植被对干旱的响应不尽相同。产生这个的原因主要有以下几个方面:(1)不同植被类型对干旱的响应程度不同。如草原比森林对干旱的响应更为敏感^[33]。(2)不同植被类型对干旱的响应的存在一定的滞后性,草原对干旱的滞后时间一般为 1~3 个月^[34]。(3)随着生态工程建设的实施,不同生态工程措施实施(如

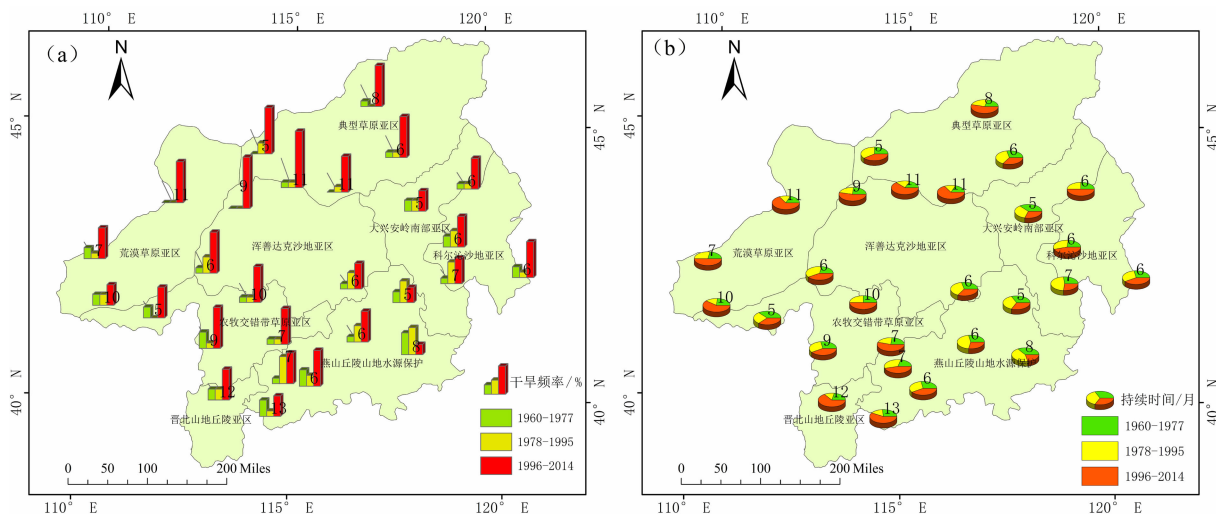


图6 研究区不同时段干旱频率(a)和干旱持续时间(b)的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought frequency (a) and drought duration (b) in different periods in BTSSR

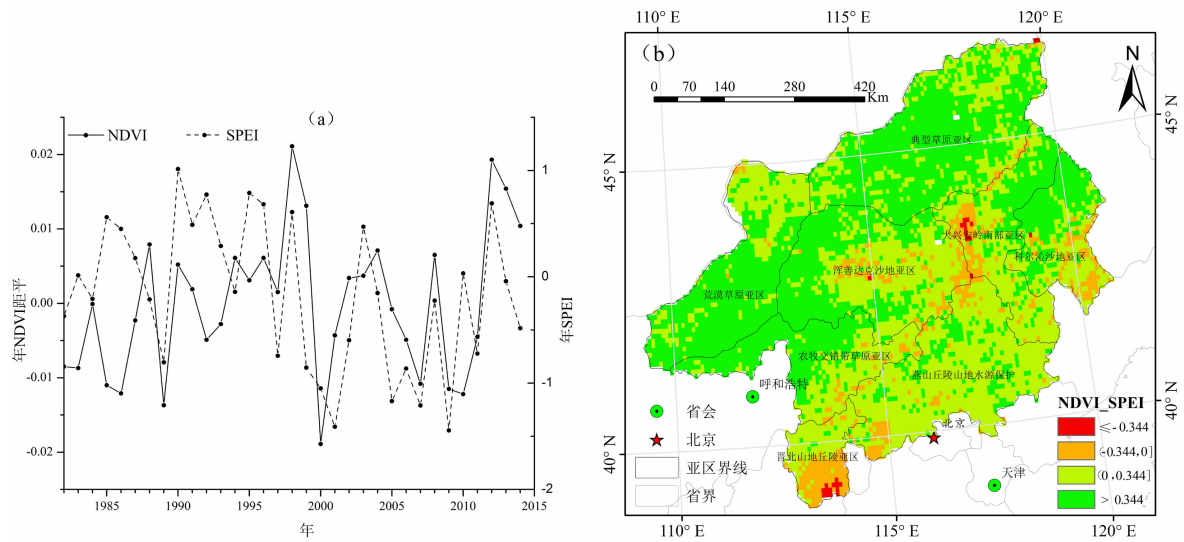
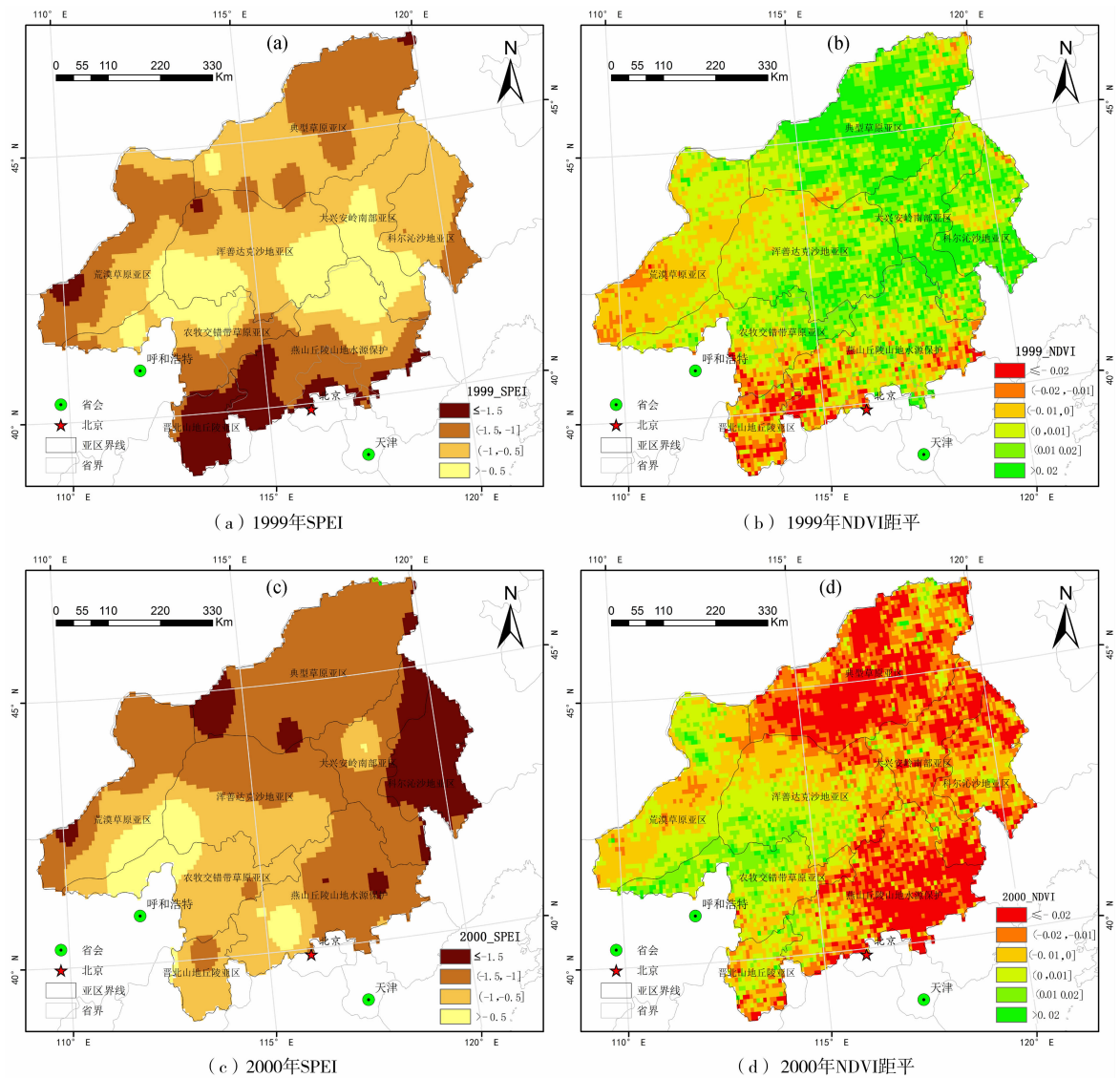


图7 研究区1982—2014年NDVI距平与SPEI的变化(a)和SPEI与NDVI相关性空间分布(b)

Fig.7 Interannual variations (a) and correlation between annual NDVI and SPEI in the BTSSR during 1982 – 2014



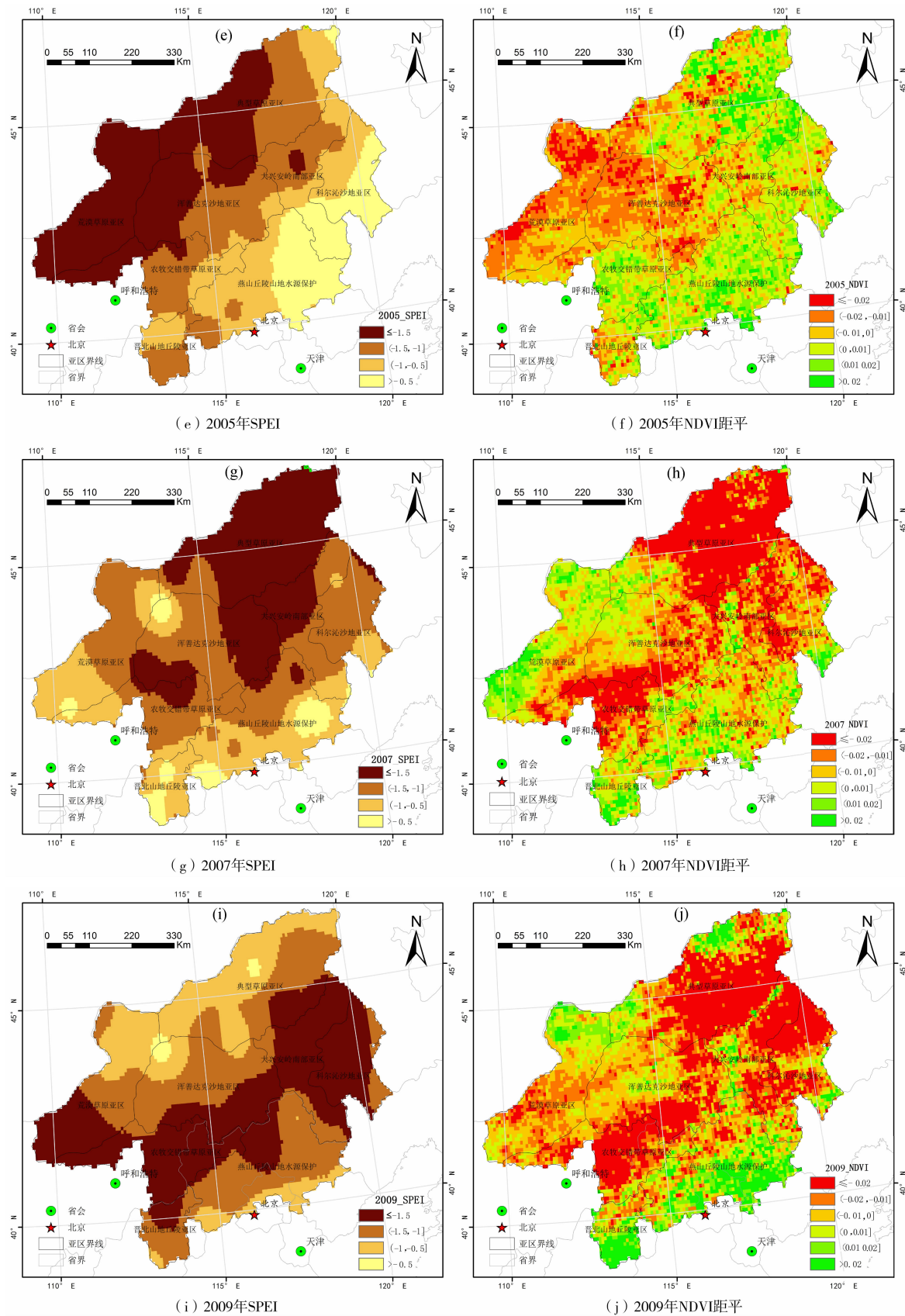


图8 典型干旱年不同等级干旱及植被距平的空间分布(1999、2000、2005、2007和2009)

Fig. 8 Spatial patterns of drought based on the 12-month SPEI and spatial patterns of NDVI anomalies in the 5 drought years (1999, 2000, 2005, 2007 and 2009)

退耕还林和禁牧等措施)也会对上述结果产生一定的差异^[35]。

为了进一步分析干旱与植被变化的相关性,本文进一步定量分析了典型干旱年不同等级干旱对植被影响。本文选取年 $SPEI \leq -1$, 中度干旱面积超过 50%, 严重干旱面积超过 25% 的年份作为典型干旱年, 因此, 选出来的典型干旱年为 1999 年、2000 年、2005 年、2007 年以及 2009 年。图 8 为典型干旱年不同等级干旱和 NDVI 距平百分率的空间分布。从图中可以看出: 5 年典型干旱年不同等级的干旱空间分布与 NDVI 距平百分率的空间分布基本一致。干旱发生的区域 NDVI 也有显著的下降, 进一步表明干旱是影响区域植被变化的主要因素。

为减轻京津及周边风沙危害, 改善和优化其生态环境状况, 政府实施了京津风沙源治理工程, 是一项具有战略意义的生态建设工程。本文采用 SPEI 干旱指数分析了各个干旱指标在风沙源区的干旱时空变化特点, 研究结果表明, 在风沙源治理工程实施以来的 15 年间, 干旱情况有明显的增加, 干旱事件的发生也在此期间有所增加。京津风沙源区干旱的产生与降水、气温、风速以及土壤等因素有关, 风沙源治理的效果还需做进一步的研究进行讨论。本文仅简单地对干旱和植被变化之间的相关性做了研究, 初步得出两者是有一定相关关系的, 研究表明, 干旱面积与植被覆盖有明显的正相关关系, 表明干旱是影响植被变化的主要因素之一。

3 结论

本文首先利用 SPEI (标准化降水蒸散指数) 以及京津风沙源区 27 个站点 1960—2014 年逐月降水和气温资料对京津风沙源区年尺度干旱趋势, 干旱面积和干旱频率进行时空分析。其次将 SPEI 与基于 NDVI (归一化植被指数) 的植被变化做相关性分析, 研究了干旱对区域植被的变化影响。主要结论如下:

(1) 京津风沙源区近 55 年来 SPEI 呈显著下降趋势, 尤其是工程实施的近 15 年, SPEI 下降更为显著, 个别年份达到严重干旱程度。从空间变化来看, 研究区大部分站点在过去 55 年 SPEI 呈下降趋势, 显著下降的站点集中在内蒙古草原地区。

(2) 不同程度干旱的面积年际变化趋势呈现波动上升的趋势, 工程实施的近 15 年干旱面积百分比

明显上升。2001 年和 2009 年严重干旱面积分别占整个研究区的 49.00% 和 41.10%。

(3) 1996—2014 年干旱的频率比 1978—1995 年和 1960—1977 年分别增长了 7.59% 和 9.09%。干旱频率具有明显的区域性, 研究区西北部内蒙古草原地区干旱频率较高。各个站点的干旱最长持续时间都接近或超过半年, 且近 20 年干旱持续时间在增加。

(4) 1982—2014 年 SPEI 与 NDVI 距平呈现很好的正相关。干旱空间分布与相应的 NDVI 距平空间分布基本吻合, 随着干旱等级的加重, NDVI 的下降率也在增加。

参考文献 (References)

- [1] 周丹, 张勃, 罗静, 等. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192 - 202 [ZHOU Dan, ZHANG Bo, LUO Jing, et al. Characteristics and genesis of drought intensity in North China based on SPEI in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 192 - 202]
- [2] 杜华明, 延军平. 西秦岭地区气候变化特征与干旱灾害趋势[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 58 - 65 [DU Huaming, YAN Junping. Characteristics of climate change and trend of drought disaster in West Qinling area [J]. Mountain research, 2014, 32(1): 58 - 65]
- [3] 王谦. 中国干旱、半干旱地区的分布及其主要气候特征[J]. 干旱地区农业研究, 1983, 5(2): 18 - 31. [WANG Qian. China's arid and semi-arid areas of the distribution and its main climate characteristics [J]. Northwest Agricultural College, 1983, 5(2): 18 - 31]
- [4] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643 - 649 [LI Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Study on drought trends in China based on standardized precipitation evapotranspiration [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 644 - 645]
- [5] 张俊, 陈桂亚, 杨文发. 国内外干旱研究进展综述[J]. 人民长江, 2011, 42(5): 65 - 69 [ZHANG Jun, CHEN Guiya, YANG Wenfa. Summary of research progress on drought at home and abroad [J]. Yangtze River, 2011, 42(5): 65 - 69]
- [6] 段莹, 王文, 蔡晓军. PDSI、SPEI 及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1126 - 1139 [DUAN Ying, WANG Wen, CAI Xiaojun. Application of PDSI, SPEI and CI index in drought process of JAC in winter and spring in 2010/2011 [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1126 - 1139]
- [7] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省 1961—2012 年干旱时空变化特征[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 12 - 27 [HE Jiaonan, LI Yungang, LI Xue, et al. Spaturation and spatial characteristics of drought in Yunnan Province from 1961 to 2012 [J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 12 - 27]

- [8] POTOPOVÁ V, PETRŠTĚPÁNEK P, MOZNÝ M, et al. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **202**(202): 26–38
- [9] GOUVEIA C, TRIGO R M, BEGUERÍA S, et al. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **151**(6): 15–27
- [10] 任培贵, 张勃, 张调风, 等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(1): 182–187 [REN Peigui, ZHANG Bo, ZHANG Tiaofeng, et al. Study on trend of meteorological drought in northwest China based on SPEI [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(1): 182–187]
- [11] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2013, **9**(3): 192–198 [XIONG Guangjie, ZHANG Bokai, LI Chongyin, et al. Study on the characteristics of arid changes Southwest China from 1961 to 2012 based on SPEI [J]. *Advances in Research on Climate Change*, 2013, **9**(3): 192–198]
- [12] 刘世梁, 田韞钰, 安南南, 等. 基于逐月标准化降水蒸散指数的多尺度方法分析气候变化对澜沧江流域归一化植被指数的影响[J]. *气候与环境研究*, 2015, **20**(6): 705–714 [LIU Shiliang, TIAN Yunyu, AN Nannan, et al. Effects of climate change on normalized vegetation index in Lancangjiang River Basin by multi-scale method based on monthly standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Chinese Journal of Climate and Environment*, 2015, **20**(6): 705–714]
- [13] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(14): 177–186 [WANG Zhaoli, HUANG Zeqin, LI Jun, et al. Spatial and temporal evolution of meteorological drought and vegetation distribution in China watershed based on SPEI and NDVI [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(14): 177–186]
- [14] 李运刚, 何大明. 红河流域 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系[J]. *山地学报*, 2009, **27**(3): 333–340 [LI Yungang, HE Daming. Spatial and temporal variation of NDVI in the Red River Basin and its relationship with climatic factors [J]. *Mountain Research*, 2009, **27**(3): 333–340]
- [15] 滑永春, 彭道黎, 陈鹏飞. 基于 MODIS NDVI 的京津风沙源工程治理区荒漠化动态监测[J]. *西北林学院学报*, 2010, **25**(6): 210–215 [HUA Yongchun, PENG Daoli, CHEN Pengfei. The dynamic monitoring of desertification in Beijing-Tianjin Sand Source Region area of MODIS NDVI [J]. *Journal of Northwest Forestry*, 2010, **25**(6): 210–215]
- [16] 刘洛, 徐新良, 段建南, 等. 京津风沙源区生态环境时空变化的遥感监测分析[J]. *地球信息科学学报*, 2011, **13**(6): 819–824 [LIU Luo, XU Xinliang, DUAN Jiannan, et al. Remote sensing monitoring of spatial and temporal changes of eco-environment in Beijing-Tianjin Sand Source Region [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2011, **13**(6): 819–824]
- [17] 孙斌, 高志海, 王红岩, 等. 近 30 年京津风沙源区气候干湿变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, **28**(11): 164–170 [SUN Bin, GAO Zhihai, WANG Hongyan, et al. Characteristics of wet and dry climate change in Beijing-Tianjin Sand Source Region in recent 30 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(11): 164–170]
- [18] 裴亮, 黄森旺, 陈丽萍. 京津风沙源区植被的时空变化及其对气候因子的响应[J]. *中国沙漠*, 2013, **33**(5): 1593–1597 [PEI Liang, HUANG Senwang, CHEN Liping. Spatial and temporal variation of vegetation and its response to climatic factors in the sandstorm area of Beijing-Tianjin Sand Source Region [J]. *China Desert*, 2013, **33**(5): 1593–1597]
- [19] 赵林, 武建军, 吕爱峰, 等. 京津风沙源区植被变化对降水的响应规律研究[J]. *北京师范大学学报*, 2010, **46**(5): 610–618 [ZHAO Lin, WU Jianjun, LV Aifeng, et al. Study on the response of vegetation to precipitation in Beijing-Tianjin Sand Source Region [J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2010, **46**(5): 610–618]
- [20] 王全会. 京津风沙源治理工程阶段性评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2005 [WANG Quanhui. Beijing-Tianjin Sand Source Region control project stage evaluation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005]
- [21] VICENTESERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZMORENO J I, et al. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, **23**(7): 1696–1718
- [22] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. *气候与环境研究*, 2013, **18**(5): 617–625 [ZHUANG Shaowei, ZUO Hongchao, REN Pengcheng, et al. Application of standardized precipitation evaporation index in China [J]. *Climate and Environment Research*, 2013, **18**(5): 617–625]
- [23] 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 [LIU Shiliang, TIAN Yunyu, YIN Yijie, et al. Characteristics of vegetation NDVI time variation and response to drought in Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4699–4707]
- [24] MANN H B. Non-parametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245–259
- [25] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. *International Statistical Review*, 1975, **41**(3): 399–400
- [26] LI Xing, HE Binbin, QUAN Xingwen, et al. Use of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982–2012 [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(8): 10917–10937
- [27] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global & Planetary Change*, 2013, **100**(1): 172–182
- [28] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**(3/4): 350–363
- [29] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时

- 空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(6): 1003 – 1016 [WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of drought near 53a in southwest China based on SPEI [J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(6): 1003 – 1016]
- [30] 孙滨峰, 赵红, 王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 22 – 28 [SUN Binfeng, ZHAO Hong, WANG Xiaoke. Temporal and spatial characteristics of arid in northeast China based on standardized precipitation evaporation index (SPEI) [J]. Journal of Eco-Environmental Sciences, 2015, **24**(1): 22 – 28]
- [31] 刘小龙, 虞美秀. 中国近60年干旱演变特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(12): 177 – 183 [LIU Xiaolong, YU Meixiu. Analysis of drought evolution characteristics in China in recent 60 years [J]. Resources and Environment in Arid Regions, 2015, **29**(12): 177 – 183]
- [32] YU M X, LI Q F, HAYES M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951 – 2010? [J]. International Journal of Climatology, 2014, **34**(3): 545 – 558
- [33] ZHANG X Y, GOLDBERG M, TARPLEY D, et al. Drought-induced vegetation stress in southwestern North American [J]. Environmental Research Letters, 2010, **5**(2): 024008
- [34] MA W H, LIU Z L, WANG Z H, et al. Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland [J]. Journal of Plant Research, 2010, **123**(4): 509 – 517
- [35] 武志涛. 京津风沙源区植被变化及固碳效益研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2013 [WU Zhitao. Beijing-Tianjin Sand Source Region of vegetation changes and carbon sequestration benefits [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013]

Spatial and Temporal Variations of Droughts over the Beijing-Tianjin Sand Source Region and Their Effects on Vegetation Change

MA Zhiting, WU Zhitao*, WEI Jie

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this study, the monthly precipitation and temperature data from 27 station of Beijing-Tianjin sand source region (BTSSR) were utilized to compute standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and analyzed the spatiotemporal drought patterns in the BTSSR for the period during 1960 – 2014. The impact of drought on vegetation change was also analyzed by SPEI and the normalized vegetation index (NDVI). The following were the results: (1) The SPEI showed a significant decrease over the past five decades at a rate of 0.16/10a ($P < 0.01$), demonstrating a drying trend in BTSSR over the study period. Spatially, the SPEI of most stations were declining over the past 55 years. Moreover, the significant decreasing trend was found in the Inner Mongolia grassland. (2) The drought affected area of mild drought, moderate drought and severe droughts increased significantly from 1960 to 2014. The severe drought affect area in 2001 and 2009 accounted for 49.00% and 41.10%, respectively. (3) From 1960 to 2014, the drought frequency was decreasing from northwest to southeast. The drought frequency for the period 1996 – 2014 for the drought frequency increased to 22.22%, a difference of 7.59% and 9.09% from the previous sub-period 1978 – 1995 and 1960 – 1977. The drought durations of most stations in BTSSR were close to or more than six months. (4) A positive correlation between SPEI and NDVI was found from 1982 to 2014, indicating that drought has an important impact on vegetation. Using parameters, such as the long-term trend of drought, drought affected area, drought frequency and duration, it was demonstrated that the drought events increased during the study period, especially in the past 15 years. All of these findings will provide a scientific basis for the management of ecological restoration programs in the BTSSR.

Key words: drought; Standard Precipitation Evapotranspiration index (SPEI); Normalized Vegetation Index (NDVI); spatial-temporal variation; Beijing-Tianjin sand source region