

DOI: 10.5846/stxb201803300699

王亚林, 丁忆, 胡艳, 陈静, 范文武. 中国灌木生态系统的干旱化趋势及其对植被生长的影响研究. 生态学报, 2019, 39(6): - .  
Wang Y L, Ding Y, Hu Y, Chen J, Fan W W. The study of shrubland drought dynamics in China and its impacts on vegetation growth. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

# 中国灌木生态系统的干旱化趋势及其对植被生长的影响研究

王亚林\*, 丁 忆, 胡 艳, 陈 静, 范文武

重庆市地理信息中心, 重庆 401147

**摘要:**大量研究表明, 21 世纪全球气温将持续升高, 干旱将不断加剧, 具有超强抗旱能力的灌木在未来的区域乃至全球生态系统过程中将会发挥越来越重要的作用。灌木在我国有着广泛的分布, 其总面积超过了我国陆地面积的 20%。本研究旨在通过计算中国灌木生态系统的标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 来分析其干旱变化趋势及其对灌木生态系统植被生长的影响。结果显示, 中国灌木生态系统的 SPEI 在 1961—2013 年间总体上呈显著地下降趋势, 但其趋势在 1992 年发生了显著变化, 这表明中国灌木生态系统正在持续地干旱化, 并且在最近二十几年干旱化加剧。我们还分析了不同灌木生态系统 EVI (Enhanced Vegetation Index, EVI) 对 SPEI 变化的响应, 结果显示不同的灌木生态系统类型对 SPEI 变化的响应不同。夏季, 高寒荒漠灌木半灌木、温带荒漠灌木半灌木和温带落叶灌木 EVI 与 SPEI 变化显著正相关, 而亚高山常绿灌木和亚热带常绿灌木 EVI 则与 SPEI 的变化显著负相关。温带落叶灌木 EVI 与春季 SPEI 变化显著正相关, 但却与秋季和冬季的 SPEI 显著负相关。此外, 亚热带常绿灌木 EVI 还与春季 SPEI 变化显著正相关。从空间上来看, 北方的灌木生态系统比南方的灌木生态系统对干旱的变化更加敏感, 同时, 南方湿润地区的灌木在生态系统尺度也体现了较强的抗旱能力。在全球持续干旱化的大背景下, 研究灌木生态系统 EVI 对于干旱变化的响应将有助于对区域生态系统过程变化的理解。

**关键词:**灌木生态系统; EVI; SPEI; 干旱

## The study of shrubland drought dynamics in China and its impacts on vegetation growth

WANG Yalin\*, DING Yi, HU Yan, CHEN Jing, FAN Wenwu

Chongqing Geomatics Center, Chongqing 401147, China

**Abstract:** Existing studies showed that a persistently increasing trend of aridity will dominate the global climate change in the future. Shrubs, which are widely distributed in China, with their excellent drought resistance and tolerance may play more important-roles in the global ecosystem function. In this study, we calculated a drought index (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) to analyze shrubland drought dynamics in China from 1961 to 2013. We found that the SPEI of shrublands in China decreased significantly and the trend was significantly changed in 1992, indicating that shrublands in China experienced a persistent drought period that intensified in recent years. We also analyzed the effects of SPEI variation on EVI (Enhanced Vegetation Index, EVI), and found that different shrubland types responded differently to SPEI variation. Summer SPEI affected high-cold desert, temperate desert, and temperate deciduous EVI positively, but affected subalpine evergreen and subtropical evergreen EVI negatively. Temperate deciduous EVI responded positively to spring SPEI, but negatively to autumn and winter SPEI. Furthermore, subtropical evergreen EVI was also positively affected by autumn SPEI. In terms of location, the shrublands in Northern China were more sensitive to

基金项目: 国家自然科学基金 (41171445)

收稿日期: 2018-03-30; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyl@dl023.net

drought dynamics than shrublands in the South. Additionally, shrublands in the humid area of Southern China showed strong drought resistance. Learning the response of shrublands EVI to drought dynamics will contribute to the understanding of ecosystem process variation in the background of the global persistently increasing trend of aridity in the future.

**Key Words:** shrub ecosystem; EVI; SPEI; drought

研究表明,未来中国乃至全球的气温将会持续升高,干旱化将越来越严重<sup>[1-3]</sup>。干旱化使得全球植被的 NPP(Net Primary Production, NPP)减少<sup>[4]</sup>,也使得中国的植被在经历了 1980—1990 年代的快速增长以后生长减缓甚至停滞<sup>[5-7]</sup>。灌木与乔木和草本相比具有更强的抗旱能力<sup>[8-10]</sup>,且在中国有着广泛的分布,从亚热带到温带再到高寒地区均有分布,其总面积超过了我国陆地面积的 20%。在全球变暖干旱加剧的大背景下,灌木生态系统将会在未来的区域乃至全球生态系统过程中发挥重要作用。那么,中国灌木生态系统的干旱状况在过去几十年具体有怎样的变化趋势,灌木生态系统 EVI(Enhanced Vegetation Index, EVI)对于干旱变化的响应如何,不同的灌木生态系统之间是否又具有不同的差异?由于目前对灌木抗旱性的研究大多集中在北方的干旱半干旱地区<sup>[9,11-12]</sup>,我国南方湿润地区的灌木对于干旱的响应是否也与干旱地区的灌木相一致呢?对这些问题的研究,将有助于我们对区域生态系统过程变化的理解。

本文根据全国 1:100 万植被图提取了 6 类主要灌木生态系统类型<sup>[13]</sup>:高寒荒漠灌木半灌木(High-cold Desert shrubland, DSRTC)、温带荒漠灌木半灌木(Temperate Desert shrubland, DSRTTP)、温带落叶灌木(Temperate Deciduous shrubland, DCDSTP)、亚高山常绿灌木(Subalpine evergreen shrubland, EVGNMT)、亚高山落叶灌木(Subalpine deciduous shrubland, DCDSMT)和亚热带常绿灌木(Subtropical evergreen shrubland, EVNGST)。本文的主要研究目标为:(1)基于 SPEI 干旱指数分析中国灌木生态系统干旱状况的时空趋势;(2)分析中国灌木生态系统 EVI 对 SPEI 变化的响应;(3)研究不同区域灌木生态系统 EVI 对干旱的响应差异。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据

计算 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)所需要的气象数据来源于中国气象数据网,包括月平均气温、月降水量、经纬度等信息。SPEI 的原理是利用降水量与潜在蒸散之间的差值所偏离平均状态的程度来表征一个地区的干旱程度。要计算 SPEI 需要至少 30 年时间序列的气候数据,且数据序列越长计算的结果越可靠<sup>[14]</sup>,因此,本文利用尽可能长的气象数据来计算得到 SPEI 数据集。但由于较早时期中国的气象站点较少且数据缺失严重,经过筛选本文选择了 1961—2013 年间的气象数据来计算 SPEI。对于 SPEI 的具体计算方法可参考 Vicent-Serrano 等人<sup>[15]</sup>和周丹等人<sup>[16]</sup>的研究。

SPEI 具有多时间尺度的特征,通常选用 1、3、6、12、24、36 个月等尺度来计算 SPEI。1 个月时间尺度的 SPEI 可以比较清楚的反映出旱涝的细微变化,而 3 个月时间尺度的 SPEI 则可以清晰地反映出季节的干旱情况,同理,12 个月时间尺度的 SPEI 则可以反应出年际间的干旱情况。本文利用 SPEI-3(即 3 个月尺度的 SPEI)来计算季节 SPEI,因为 SPEI-3 序列中某一个月相对应的值表示当前月以及之前两个月的综合干旱程度(即 5 月的 SPEI 值可以反应春季的干旱程度),因此,本文选用每年中第 5 月、8 月、11 月以及来年 2 月的 SPEI 来表示每年的春、夏、秋、冬季的干旱程度<sup>[14]</sup>。相应的,用 SPEI-12(12 个月尺度的 SPEI)序列中每年的第 12 月的 SPEI 值来反应每年的干旱程度。

本研究所用 EVI 数据为 16-day, 1 km 分辨率的 MODIS-EVI(MOD13Q1)数据,时间序列为 2001 年至 2013 年。首先,对 EVI 时间序列进行了逐栅格的质量筛选和插值处理<sup>[17-19]</sup>;再利用最大值合成法将 16-day 影像生成月值影像时间序列;最后,利用全国 6 种灌木类型空间分布图进行裁剪得到不同灌木类型的 EVI 时间序列。另外,对在研究时间内年平均 EVI 值小于 0.05 的像元做剔除处理,从而减小裸地或者稀疏植被带来的影响<sup>[6,19]</sup>。

## 1.2 数据分析

本文用一元线性回归模型对不同类型灌木的 SPEI 和 EVI 进行回归分析以获取其变化速率,其公式可以表示为:

$$y = a + kx + \varepsilon$$

式中, $y$  表示 SPEI 或 EVI; $x$  代表年; $k$  为变化速率; $a$  为截距; $\varepsilon$  为残差。为了分析中国灌木生态系统 SPEI 变化趋势是否有显著的转折点,本文应用分段回归模型来对 SPEI 序列进行回归分析。分段回归模型已广泛应用于生态学研究<sup>[5-6,20]</sup>,其模型可以表示为:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon & (t \leq \alpha) \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \alpha) + \varepsilon & (t > \alpha) \end{cases}$$

式中  $y$  为 SPEI; $t$  为年; $\alpha$  为时间序列趋势的转折点,表示时间序列的趋势发生改变的时间; $\beta_0$  为截距; $\beta_1$  和  $\beta_1 + \beta_2$  分别为转折点前后时间序列的趋势; $\varepsilon$  为残差。

为了分析中国灌木生态系统 SPEI 趋势的空间特征,本文采用了 Theil-Sen slope 分析与 Mann-Kendall 检验相结合的方法来计算 SPEI 趋势的空间分布。Theil-Sen slope 分析为非参数的趋势分析,Mann-Kendall 检验为非参数检验,它们都不要求数据符合正态分布,且对时间序列中少数的异常值有很高的稳健性,并且已经广泛应用于植被变化以及气候变化研究中<sup>[19,21-22]</sup>。

本文采用多元线性回归模型将年 EVI 与不同季节 SPEI 进行多元回归分析,以分析 EVI 对不同季节 SPEI 变化的响应,其公式可以表示为:

$$y = a + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n + \varepsilon$$

式中, $y$  为年平均 EVI; $a$  为截距; $x$  为不同季节 SPEI; $k$  为拟合的系数; $\varepsilon$  为残差。模型采用广义最小二乘法来拟合。由于植被的生长主要发生在生长季,因此在本文的研究中仅关注生长季的 EVI 变化,生长季定义为 4—10 月<sup>[5-6]</sup>。由于 MODIS-EVI 数据最早仅能追溯到 2001 年,因此本文从 SPEI 时间序列中截取 2001—2013 年间的 SPEI 时间序列与其相对应的 EVI 进行分析。

## 2 结果

### 2.1 中国灌木生态系统 SPEI 在 1961—2013 年间的变化趋势

从全国尺度来说,中国灌木生态系统的 SPEI 从 1961—2013 年间呈显著的减小趋势,说明在这过去的 53 年间中国灌木生态系统在持续干旱化(表 1)。对于不同的灌木类型来说,6 种类型灌木生态系统的 SPEI 也均呈显著的减小趋势。

表 1 中国灌木生态系统 1961—2013 年间 SPEI 的变化趋势

Table 1 Temporal trends of China shrub ecosystems SPEI from 1961 to 2013

灌木生态系统类型 Shrub ecosystem type	变化速率 Change rate/ $10^{-2}$ SPEI $a^{-1}$	转折点 Turning point	转折点前变化速率 Change rate before turning point/ $10^{-2}$ SPEI $a^{-1}$	转折点后变化速率 Change rate after turning point/ $10^{-2}$ SPEI $a^{-1}$
DSRTHC	-1.85 ***	1989 *	0.65	-4.72 ***
DSRTTP	-1.72 ***	1988 **	1.02	-4.81 ***
DCDSTP	-1.38 ***	2009	-1.84 ***	6.53 ***
EVGNMT	-0.51 *	2000	0.44	-5.93 **
DCDSMT	-0.84 ***	1985	1.07 *	-2.15 ***
EVGNST	-0.92 ***	1998	-0.05	-4.22 ***
CONTRY	-1.40 ***	1992 ***	0.23	-4.33 ***

DSRTHC:高寒荒漠灌木半灌木,High-cold desert shrubland;DSRTTP,温带荒漠灌木半灌木,Temperate desert shrubland;DCDSTP,温带落叶灌木,Temperate deciduous shrubland;EVGNMT,亚高山常绿灌木,Subalpine evergreen shrubland;DCDSMT,亚高山落叶灌木,Subalpine deciduous shrubland;EVGNST,亚热带常绿灌木,Subtropical evergreen shrubland;CONTRY,全国灌木,Countrywide shrubland;‘\*’,‘\*\*’和‘\*\*\*’分别代表  $P < 0.1$ , 0.05 和 0.01

本文用分段回归函数对不同灌木生态系统的 SPEI 进行了回归分析,以检测在过去的 53 年间其 SPEI 的变化趋势是否出现显著的改变(表 1,图 1)。从全国尺度来说,中国灌木生态系统的 SPEI 的变化趋势在 1992 年出现了显著的改变。在 1992 年以前,中国灌木生态系统是变湿润的趋势,其 SPEI 以  $0.23 \times 10^{-2} a^{-1}$  的速度增加,在 1992 年以后中国灌木生态系统的 SPEI 以  $-4.33 \times 10^{-2} a^{-1}$  ( $P < 0.01$ ) 的速率减小。对于不同的灌木生态系统类型来说,两种荒漠类型灌木(DSRTHC 和 DSRTTP)的 SPEI 分别在 1989 年和 1988 年检测到了显著的变化趋势。在转折点之前两种荒漠灌木的 SPEI 均为不显著的增加趋势,而在转折点之后,两种类型灌木的 SPEI 均显著减小,而另外 4 种类型灌木生态系统 SPEI 的趋势并没有显著的改变。

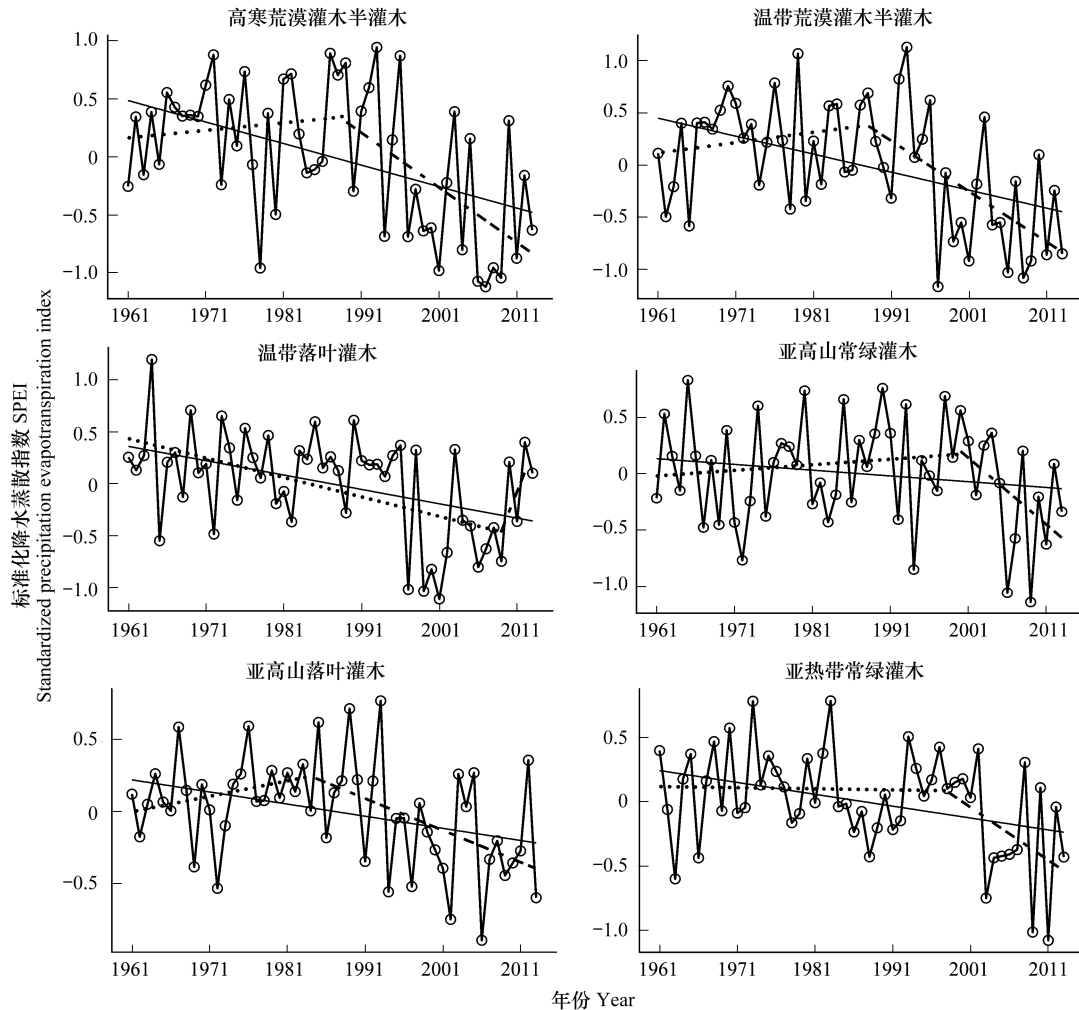


图 1 不同灌木生态系统 1961—2013 年间 SPEI 的变化趋势

Fig.1 Temporal trends of different shrub ecosystems SPEI from 1961 to 2013

SPEI: 标准化降水蒸散指数, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; 图中实线表示 SPEI 在整个研究时间段内的变化趋势, 点状虚线表示 SPEI 在转折点以前的变化趋势, 短线虚线表示 SPEI 在转折点以后的变化趋势

从变化趋势来看,两种荒漠灌木、两种亚高山灌木的 SPEI 均从增加转变为减小,说明这 4 种类型灌木生态系统所在区域均从之前变湿润趋势转变为显著干旱化的趋势。亚热带常绿灌木的 SPEI 在 1998 年之前几乎保持不变,但之后则呈显著下降趋势。而温带落叶灌木的 SPEI 的变化趋势与另外 5 种灌木相反,由转折点之前的显著下降趋势转变为显著增加趋势,其值由负变为正,说明温带落叶灌木所在区域由干旱化转变化湿润化。总的来说,中国灌木生态系统的干旱状况从 1990 年代初期以来呈显著的干旱化趋势,这与我国植被增长在 1990 年代中期因干旱停滞的趋势相一致<sup>[5-7]</sup>。



## 2.2 不同灌木生态系统 SPEI 和 EVI 在 2001—2013 年间的变化趋势

由于 MODIS-EVI 数据的最早日期仅能追溯到 2001 年,为了分析 EVI 对 SPEI 变化的响应,本文从不同时间尺度的 SPEI 序列中截取了 2001—2013 年的数据序列进行分析(表 2)。6 种灌木类型中,温带落叶灌木的 SPEI 以  $6.13 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$  ( $P < 0.05$ ) 的速度显著增加,表明温带落叶灌木生态系统在逐渐变湿润,而亚高山常绿灌木则与之相反,以  $-4.59 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$  的速度显著下降,表明其正在干旱化。此外,高寒荒漠、温带荒漠灌木半灌木以及亚热带常绿灌木的 SPEI 也均呈下降的趋势,而亚高山落叶灌木的 SPEI 则呈增加的趋势,但均不显著。从全国尺度来看,中国灌木生态系统 SPEI 在 2001—2013 年间以  $-1.88 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$  ( $P > 0.1$ ) 的速度下降,表明中国灌木生态系统正在逐渐变干旱。在 2001—2013 年间,全国灌木生态系统 EVI 以  $1.01 \times 10^{-3} \text{ a}^{-1}$  的 ( $P < 0.01$ ) 速率显著增加,其中高寒荒漠灌木半灌木、温带荒漠灌木半灌木、温带落叶灌木和亚热带常绿灌木的 EVI 均显著增加,而亚高山常绿灌木的 EVI 则显著减小,亚高山落叶灌木的 EVI 减小但不显著。

表 2 中国灌木生态系统 2001—2013 年间 SPEI 和 EVI 的变化趋势

Table 2 Temporal trends of China shrub ecosystems SPEI and EVI from 2001 to 2013

灌木生态系统类型 Shrub ecosystem type	年际变化速率 Annual change rate		SPEI 季节变化速率 Seasonal SPEI change rate/ $10^{-2}/\text{a}$			
	EVI/ $10^{-3}/\text{a}$	SPEI/ $10^{-2}/\text{a}$	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
DSRTHC	0.36 **	-1.21	-2.72	1.17	1.09	-3.12
DSRTP	0.55 **	-2.48	-6.20	2.50	-1.06	0.05
DCDSTP	1.89 ***	6.13 **	4.87 *	5.30 *	5.02	-1.66
EVGNMT	-0.64 *	-4.59 *	-2.28	-4.85	0.23	-3.43
DCDSMT	-0.04	0.30	-2.48	1.00	0.79	-0.08
EVGNST	1.88 ***	-2.67	-2.03	-4.81 **	4.99 **	-5.68 *
CONTRY	1.01 ***	-1.88	-3.71	0.02	0.91	-1.77

注: EVI: 增强型植被指数, Enhanced Vegetation Index; SPEI: 标准化降水蒸散指数, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; “\*”, “\*\*” 和 “\*\*\*” 分别表示  $P < 0.1$ ,  $0.05$  和  $0.01$

在春季,仅温带落叶灌木的 SPEI 显著增加,而其他 5 种类型灌木的 SPEI 则均呈减小的趋势。在夏季,温带落叶灌木 SPEI 显著升高 ( $P < 0.1$ ), 而亚热带常绿灌木 SPEI 则显著下降 ( $P < 0.05$ )。此外,两种荒漠灌木也有增加趋势,而亚高山常绿灌木则为下降的趋势。亚热带常绿灌木 SPEI 在秋季显著增加但在冬季显著下降,而其他几种类型灌木的 SPEI 在这两个季节都没有显著的变化趋势。从全国来看, SPEI 在春、冬两季有减小的趋势,夏、秋两季有增加的趋势,但均未达到  $\alpha = 0.1$  的显著性水平。

## 2.3 中国灌木生态系统 SPEI 在 2001—2013 年间变化趋势的空间特征

全国灌木生态系统 1.04% 的区域的 SPEI 显著增加,其主要分布于温带落叶灌木区域(表 3, 图 2)。而 SPEI 显著减小的面积比例为 1.88%, 主分布在云南省以及四川的西南部,主要为亚高山常绿灌木以及亚热带常绿灌木。SPEI 增加但不显著的区域占 31.92%, 其主要分布于东北、华北、以及沿海地区,而减小但不显著的地区占 65.16%, 其主要分布于华中、西南以及西北地区。SPEI 趋势的空间分布特征与不同灌木类型的变化趋势能够很好地吻合。

表 3 中国灌木生态系统 2001—2013 年间 SPEI 空间变化趋势统计结果

Table 3 Statistical results of China shrub ecosystem SPEI variation from 2001 to 2013

Theil-Sen 趋势分析 Theil-Sen slope analysis	Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall test	SPEI 变化趋势 SPEI trend	面积占比/% Area percentage
>0	>1.96	显著增加	1.04
>0	-1.96—1.96	不显著增加	31.92
<0	-1.96—1.96	不显著减小	65.16
<0	<-1.96	显著减小	1.88

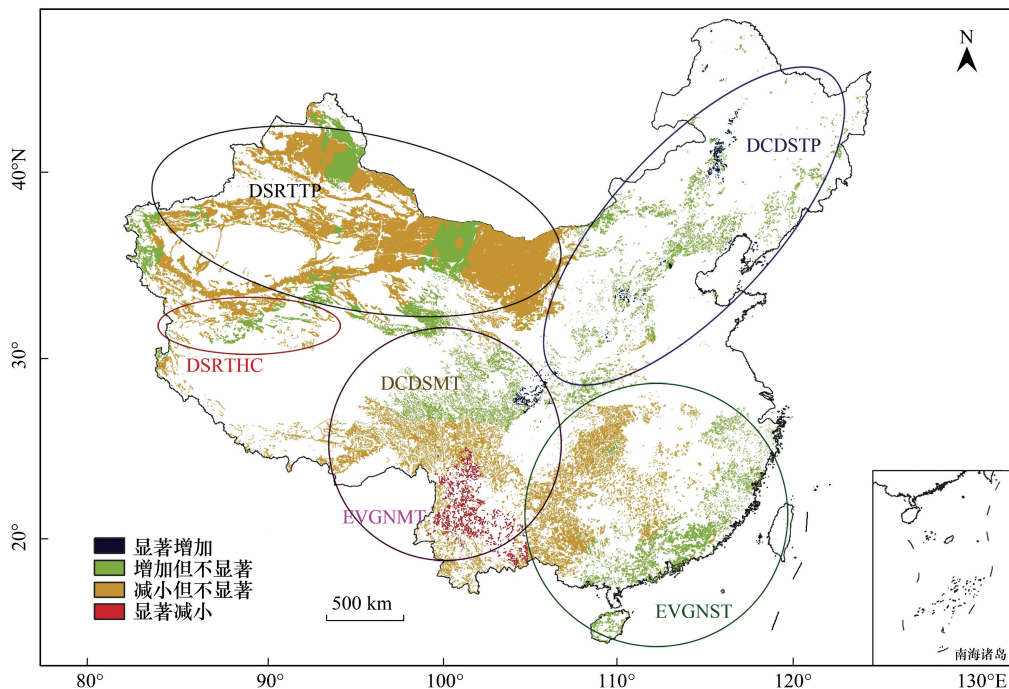


图 2 中国灌木生态系统 2001—2013 年间 SPEI 变化趋势的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of China shrub ecosystem SPEI variation from 2001 to 2013

不同的圈代表不同灌木类型的分布区域; DSRTHC: 高寒荒漠灌木半灌木, High-cold desert shrubland; DSRTTP, 温带荒漠灌木半灌木, Temperate desert shrubland; DCDSSTP, 温带落叶灌木, Temperate deciduous shrubland; EVGNMT, 亚高山常绿灌木, Subalpine evergreen shrubland; DCDSMT, 亚高山落叶灌木, Subalpine deciduous shrubland; EVGNST, 亚热带常绿灌木, Subtropical evergreen shrubland

### 3 讨论

#### 3.1 中国灌木生态系统 EVI 对 SPEI 变化的响应

本文利用多元线性回归模型对 2001—2013 年间年平均 EVI 与各季节 SPEI 进行了拟合, 并获得回归系数以分析季节 SPEI 变化对 EVI 的影响(表 4)。高寒荒漠灌木半灌木和温带荒漠灌木半灌木年平均 EVI 与夏季的 SPEI 均呈正相关, 而其夏季 SPEI 均呈增加趋势, 表明其所在区域呈湿润的趋势, 这将有利于植被的生长。温带落叶灌木的年 EVI 与其春季和夏季的 SPEI 显著正相关, 而与其秋季和冬季的 SPEI 显著负相关。亚高山常绿灌木 EVI 与季节 SPEI 的回归结果不能很好的解释 EVI 的变化, 即导致亚高山常绿灌木 EVI 的变化的原因很多, 全年的干旱化趋势可能仅是其部分原因, 也可能还存在着其他因素对 EVI 的变化产生了影响, 例如人类活动等。亚热带常绿灌木 EVI 与其夏季 SPEI 负相关而与秋季的 SPEI 正相关。亚热带常绿灌木夏季 SPEI 的下降主要是由于夏季气温升高和降水向秋季转移综合作用所导致的<sup>[19]</sup>, 由于该区域年降水量充足, 水分并不是植被生长的限制因子, 此外, 降水量减小意味着云量会减少, 从而可以增加太阳辐射<sup>[23]</sup>, 加上气温升高对植被生长的共同促进作用最终导致了 EVI 的增加。此外, 亚热带常绿灌木春季 SPEI 的下降趋势并没有对其 EVI 产生影响, 反而使其春季的 EVI 呈显著的增加趋势, 这是由于春季气温升高, 使植被生长加强所造成的。亚高山落叶灌木 EVI 与 SPEI 均未检测到显著的变化趋势, 也无显著的相关性。

本文还基于像元尺度计算了 EVI 与 SPEI 时间序列的相关性系数, 并进行了统计(表 5, 图 3)。EVI 与 SPEI 呈显著负相关和不相关的面积比例非常小, 仅分别为 1.33% 和 0.18%, 而呈不显著正相关的比例最大, 达到 55.00%, 其大多分布于北方, 南方地区也有少量分布。显著正相关的比例为 14.17%, 其主要分布在我国北方(两种荒漠灌木以及温带落叶灌木)。不显著负相关的比例为 29.32%, 其主要分布于我国的南方(两种亚高山灌木和亚热带常绿灌木)。此结果在一定程度上说明了北方的灌木生态系统比南方的灌木生态系统

对于干旱变化更加敏感。北方灌木分布区域年降水量较小,通常受到水分胁迫,因此其植被的生长对水分很敏感,而南方的灌木区的降水量却很充足,水分通常不是其限制因子,适当的升温反而有利于植被的生长。

表 4 年平均 EVI 与季节 SPEI 多元回归参数

Table 4 Regression coefficients of annual EVI on seasonal SPEI

灌木生态系统类型 Shrub ecosystem type	截距 Intercept	SPEI 系数 SPEI coefficients/ $10^{-2}$ EVI · a <sup>-1</sup> · SPEI <sup>-1</sup>			
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
DSRTHC	0.0711 ***		0.18 *		
DSRTP	0.0915 ***		0.54 **		
DCDSTP	0.3299 ***	0.44 *	3.15 ***	-0.83 **	-0.63 **
EVGNMT	0.2743 ***		-0.89 **		
DCDSMT					
EVGNST	0.4143 ***		-1.00 **	0.79 *	

‘\*’, ‘\*\*’和‘\*\*\*’分别表示  $P < 0.1$ , 0.05 和 0.01

表 5 EVI 与 SPEI 时间序列 Pearson 相关性系数统计结果

Table 5 Pearson correlation coefficients of EVI and SPEI

Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficients	相关性 Correlation	面积百分比/% Area percentage
$\leq -0.55$	显著负相关	1.33
$-0.55 < r < 0$	不显著负相关	29.32
$= 0$	不相关	0.18
$0 < r < 0.55$	不显著正相关	55.00
$\geq 0.55$	显著正相关	14.17

$r = \pm 0.55$  对应 5% 的显著性水平

在中国的西南部地区其 SPEI 整体呈减小趋势,其中四川与云南交界处以及云南的大部分地区检测到了 SPEI 显著减小的趋势(图 2),这说明在 2001—2013 年间该地区呈显著的变干旱趋势,这与其他人的研究结果相吻合<sup>[24-25]</sup>。西南地区整个 SPEI 的减小,甚至云南省内大面积的 SPEI 显著减小并没有伴随着相应的 EVI 的显著下降(图 3),且有研究表明干旱使中国西南地区的植被的 NPP 减小<sup>[24]</sup>,这说明南方湿润地区的灌木生态系统对于干旱同样具有很强的抵抗作用。

### 3.2 中国灌木生态系统的 SPEI 趋势

SPEI 是通过计算水分平衡状态(降水-潜在蒸散)偏离多年平均值的程度来表征干旱的。SPEI < 0 表示该地区水分平衡小于平均值,该地区较平均状况偏干旱;SPEI > 0 表示该地区水分平衡大于平均值,该地区较平均状况偏湿润。中国灌木生态系统 SPEI 的趋势自 1961 年以来在 1992 年出现了显著的改变(表 1),从 1992 年之前的不显著上升趋势转变为显著下降趋势,说明中国的灌木生态系统正在呈干旱化趋势,这与我国的总体趋势相一致<sup>[26]</sup>。在 6 种不同的灌木类型中,仅有温带落叶灌木的 SPEI 在 2001—2013 年间呈显著的增加的趋势(表 2),其值从小于 -1 逐渐上升到大于 0,表明其由干旱状态回归到偏湿润状态。温带落叶灌木干旱胁迫的缓解将有利于植被的生长,加之其生长季的延长<sup>[19]</sup>,将更加有利于其与夏季活跃型的温带草原之间的竞争,使之更加有能力在未来的草灌竞争中占据上风。

干旱可以显著影响生态系统的碳循环,可以通过影响植被的光合作用速率以及生态系统的呼吸来影响生态系统的 NEE(Net Ecosystem Exchange, NEE),并最终影响生态系统的碳循环<sup>[24]</sup>。此外,干旱还能引发火灾<sup>[27]</sup>、造成树木死亡<sup>[28]</sup>以及引发虫害<sup>[29]</sup>,从而间接的影响生态系统的碳循环。全球植被的 NPP 在 2001—2010 年间因干旱呈显著下降的趋势<sup>[4]</sup>,中国的植被在干旱的影响下其 NPP 也显著下降,甚至使全国的陆地生态系统从碳汇变成碳源<sup>[30]</sup>。灌木生态系统所表现出对干旱的抵抗性将在未来全球变暖、干旱加剧的背景下在区域乃至全球生态系统中将发挥重要的作用。

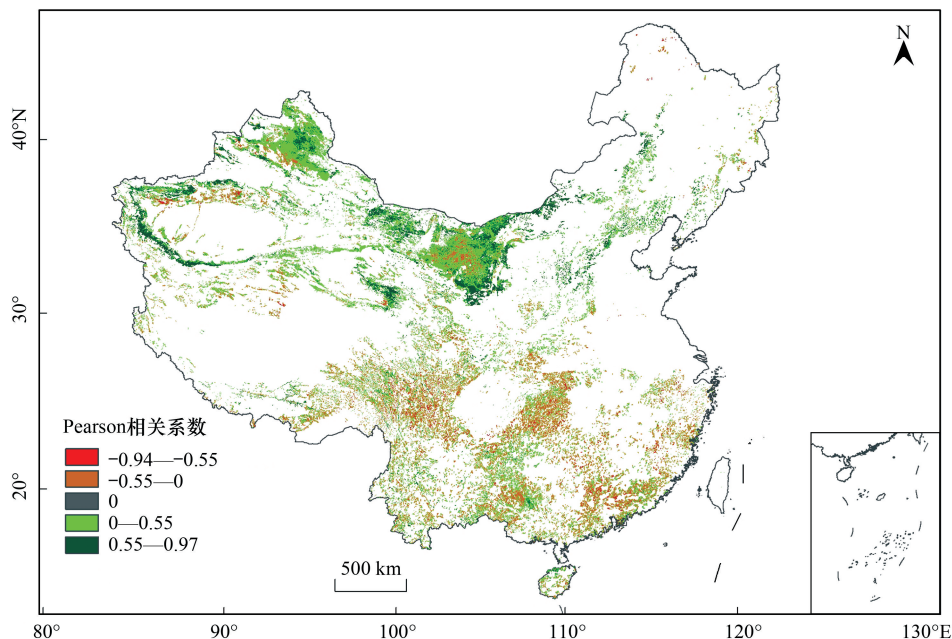


图3 EVI与SPEI时间序列 Pearson 相关系数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of Pearson correlation coefficients between EVI and SPEI

$r = \pm 0.55$  对应 5% 的显著性水平

#### 4 总结

本文利用基于降水和蒸散水分平衡的干旱指数(SPEI)来模拟了中国灌木生态系统 1961—2013 年间的干旱状况。在 1961—2013 年间,中国灌木生态系统在全国尺度呈显著的干旱趋势,并且从不同灌木生态系统类型来看也全部呈显著的干旱化趋势,这与目前全球气温升高,干旱化越来越严重的趋势一致。本文还利用分段线性回归模型对 SPEI 时间序列进行了分析,以判断其趋势是否有显著地改变。全国灌木生态系统以及两种荒漠类型灌木生态系统的 SPEI 均在 1990 年附近检测到了显著的转折点,均从不显著的增加趋势转变为显著的下降趋势,这与我国植被增长趋势在 1990 年代因干旱停滞相一致。在 2001—2013 年间,中国灌木生态系统 SPEI 在全国尺度上呈下降趋势,而对于不同灌木生态系统来说,除温带落叶灌木的 SPEI 显著增加外其余 5 种灌木生态系统的 SPEI 均呈下降趋势(但是仅亚高山常绿灌木显著)。

本文还研究了不同灌木生态系统 EVI 对 SPEI 变化的响应,结果显示,南北灌木生态系统 EVI 对 SPEI 的变化影响不同,北方灌木生态系统 EVI 对 SPEI 的变化更加敏感。其原因可能是南北降水量的显著差异所致,在北方的干旱半干旱区域植物主要受到水分胁迫,因而对水分变化敏感。西南地区 SPEI 在 2001—2013 年间显著下降,但其 EVI 却并没有相应地减小,表明南方湿润地区的灌木生态系统同样具有较强的抗干旱能力。在全球变暖,干旱化越来越严重的将来,灌木生态系统对区域乃至全球陆地生态系统的结构和功能必将起到越来越重要的作用。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dai A G. Drought under global warming: a review. *Climate Change*, 2011, 2(1): 45-65.
- [ 2 ] Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, Xu Y, Luo Y, Li Q P, Zhang J. Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 954-971.
- [ 3 ] Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(4): RG4004.
- [ 4 ] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.



- [ 5 ] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [ 6 ] Peng S S, Chen A P, Xu L, Cao C X, Fang J Y, Myneni, R B, Pinzon J E, Tucker C J, Piao S L. Recent change of vegetation growth trend in China. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 044027.
- [ 7 ] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Guo Q H, Henderson M, Ji W, Li Y, Tao S. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 4401.
- [ 8 ] Gao Q, Zhao P, Zeng X, Cai X, Shen W. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(11): 1373-1381.
- [ 9 ] Gao Q, Yu M, Zhang X S, Xu H M, Huang Y M. Modelling seasonal and diurnal dynamics of stomatal conductance of plants in a semiarid environment. *Functional Plant Biology*, 2005, 32(7): 583-598.
- [ 10 ] Gao Q, Yu M, Zhou C. Detecting the differences in responses of stomatal conductance to moisture stresses between deciduous shrubs and *Artemisia* subshrubs. *PLoS One*, 2013, 8(12): e84200.
- [ 11 ] 谭永芹, 柏新富, 朱建军, 王仲礼, 刘林德. 干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能. *生态学报*, 2011, 31(22): 6815-6823.
- [ 12 ] Smith S E, Fendenheim D M, Halbrook K. Epidermal conductance as a component of dehydration avoidance in *Digitaria californica* and *Eragrostis lehmanniana*, two perennial desert grasses. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(2): 238-250.
- [ 13 ] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图 1:1 000 000. 北京: 地质出版社, 2007.
- [ 14 ] World Meteorological Organization. Standardized Precipitation Index User Guide. WMO-NO-1090. Geneva: WMO, 2012.
- [ 15 ] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [ 16 ] 周丹, 张勃, 任培贵, 张春玲, 杨尚武, 季定民. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
- [ 17 ] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [ 18 ] Samanta A, Ganguly S, Hashimoto H, Devadiga S, Vermote E, Knyazikhin Y, Nemani R R, Myneni R B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): L05401.
- [ 19 ] Wang Y L, Gao Q, Liu T, Tian Y Q, Yu M. The greenness of major shrublands in China increased from 2001 to 2013. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 121.
- [ 20 ] Liang W, Yang Y T, Fan D M, Guan H D, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.
- [ 21 ] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [ 22 ] 王亚林, 龚容, 吴凤敏, 范文武. 2001—2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 925-937.
- [ 23 ] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P, Zhu B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [ 24 ] Zhang L, Xiao J F, Li J, Wang K, Lei L P, Guo H D. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 045706.
- [ 25 ] 王东, 张勃, 安美玲, 张调风, 季定民, 任培贵. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 1003-1016.
- [ 26 ] 栗健, 岳耀杰, 潘红梅, 叶信岳. 中国 1961—2010 年气象干旱的时空规律——基于 SPEI 和 Intensity analysis 方法的研究. *灾害学*, 2014, 29(4): 176-182.
- [ 27 ] Xiao J F, Zhuang Q L. Drought effects on large fire activity in Canadian and Alaskan forests. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4): 044003.
- [ 28 ] Allen C D, Macalady A K, Chenchoumi H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J L, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [ 29 ] Kurz W A, Dymond C C, Stinson G, Rampley G J, Neilson E T, Carroll A L, Ebata T, Safranyik L. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 2008, 452(7190): 987-990.
- [ 30 ] Xiao J F, Zhuang Q L, Liang E Y, Shao X M, McGuire A D, Moody A, Kicklighter D W, Melillo J M. Twentieth-century droughts and their impacts on terrestrial carbon cycling in China. *Earth Interactions*, 2009, 13(10): 1-31.