

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 2 - 142 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000206

黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征

张艳芳 吴春玲 张宏运 王 姝

(陕西师范大学 旅游与环境学院 西安 710119)

摘 要: 标准化降水蒸散指数(SPEI) 是评估气候变暖背景下区域干旱的重要指标。基于生态功能分区 ,利用 MODIS-NDVI 数据和 SPEI 指数 ,探讨 2000—2014 年黄河源区植被指数和干旱指数的年际变化、空间分布规律以及两者之间的相关关系。结果表明: (1) 2000—2014 年黄河源区 NDVI 和 SPEI 总体上均呈波动上升趋势 ,植被覆盖状况略有好转 ,干旱程度有所降低; (2) NDVI 与 SPEI 变化趋势的空间分布特征大致相同 ,东南部区域总体呈减少趋势 ,西北部区域总体呈增加趋势; (3) 黄河源区降水量是影响植被生长的主要因子 ,也是影响 SPEI 变化的主要条件。当 $0.3 < \text{NDVI} < 0.6$ 时 ,SPEI 对 NDVI 的影响较强 ,当 $\text{NDVI} > 0.6$ 时影响较小; (4) 黄河源区大部分地区 NDVI 与 SPEI 呈正相关 ,其中呈显著正相关的区域分布在青根河生态区以及黄河源头生态区植被覆盖度较低区域; 小部分地区由于受到人类活动的干扰 ,使 NDVI 与 SPEI 呈负相关或相关性较弱 ,其中呈显著负相关的区域在黄南草原生态区及周围草地退化、生物多样性敏感的区域。黄河源区干旱程度的下降对植被覆盖的增加有促进作用 ,为该区域的生态恢复提供了有利条件。

关键词: 黄河源区; SPEI; NDVI; 时空变化

中图分类号: Q948

文献标志码: A

黄河源区处于我国青藏高原和黄土高原的过渡地带 ,是黄河流域的水源供给区和生态屏障 ,也是我国生态环境的脆弱区和气候变化的敏感区之一。20 世纪 80 年代至本世纪初 ,黄河源区由于气温上升 ,降水减少 ,加之超载过牧等人类活动的影响 ,导致植被和沼泽地退化、草地沙化、湖泊萎缩等环境问题 ,整体生态环境呈现退化趋势^[1-5]。目前 ,国内学者已经展开黄河源区的降水、气温和水文变化趋势及植被对各气候因子的响应研究^[6-8] ,黄河源区土地利用/覆盖变化的生态环境和生态服务功能评价研究^[5,9] ,以及黄河流域地区生态退化和生态恢复区的识别研究^[10]。

植被生长情况是生态环境变化的重要指标 ,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index ,NDVI) 是评估植被生长状况的参数之一 ,可以

反映地表植被覆盖情况。近年来 ,国内外在植被生长状况与气候要素关系方面展开了大量的研究工作^[11-16] ,并从气温、降水等气候因子方面研究气候变化对植被的影响。标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evaporation Index ,SPEI) 是评估气候变暖背景下干旱特征的重要指标 ,可以表征气候因子对生态环境的影响程度。SPEI 是目前最常用的干旱指数之一 ,既集合帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index ,PDSI) 中考虑温度变化对蒸散量的影响 ,又继承标准化降水指数(Standardized Precipitation Index ,SPI) 计算简便、多时间尺度的特点 ,能够有效反映研究区的干旱化程度^[17-20]。本文首次采用 SPEI 干旱指数和植被指数相结合的方法来研究黄河源区气候变化与植被生长状态的相互关系 ,从而反映该区域生态退化及生态恢复状况 ,为区

收稿日期(Received date) : 2015 - 5 - 29; 改回日期(Accepted date) : 2016 - 11 - 18。

基金项目(Foundation item) : 国家自然科学基金项目(41371523)。 [National Nature Science Foundation of China(41371523)]

作者简介(Biography) : 张艳芳(1969 -) ,女 ,陕西省榆林市人 ,博士 ,副教授 ,主要从事水土资源评价、生态安全研究。 [Zhang Yanfang (1969 -) ,female ,born in Yulin ,Shaanxi Province ,Ph. D. ,associate professor ,mainly engaged in the study of water and soil resources evaluation and ecological security] E-mail: zhangyf@snnu.edu.cn

域生态恢复项目的合理规划和工程调整提供依据。

本文使用 2000—2014 年 MODIS 的植被指数产品获取黄河源区的植被覆盖情况,并根据同期气象数据,应用干旱指数 SPEI 来研究 2000—2014 年黄河源区的干旱状况;从时空上分析不同生态区植被指数和干旱指数的变化情况,探讨干旱对黄河源区生态系统植被变化的影响,为了解近年来黄河源区生态和气候变化状况提供理论参考。

1 研究区域概况

黄河源区位于青藏高原北部的江河源区东北部,为龙羊峡水库以上的黄河流域^[4-9],区域范围 32°09′~36°06′ N,95°54′~103°22′ E,主要包括甘肃的玛曲、四川的诺尔盖、阿坝、红原和青海的玛多、

兴海、玛沁、甘德、达日、同德、班玛、久治等区域,面积约 12.07 万平方公里。

地貌类型主要为高山、丘陵、盆地、河谷、冲洪积平原等,地势总体西南高、东北低,西南部平均海拔 5 000 m,东北部玛曲降至 3 000 m 左右。气候类型为高原大陆性气候,同时具有高寒气候和干旱气候的特点,其中西部降水少,为干旱区,东部多为半干旱或半湿润区,达日、玛沁、河南、玛曲、诺尔盖、久治等地在青藏高原内降水较为丰富。植被类型以高寒灌木丛、高寒草甸、高寒草原为主,兼有常绿针叶林、高寒沼泽、高山泥石流稀疏植被等类型。

根据中国生态功能区划方案的分类标准^[21],研究区属于青藏高寒生态大区中的黄河源高寒草甸草原生态亚区,共分为 9 个生态功能区,如图 1 所示。

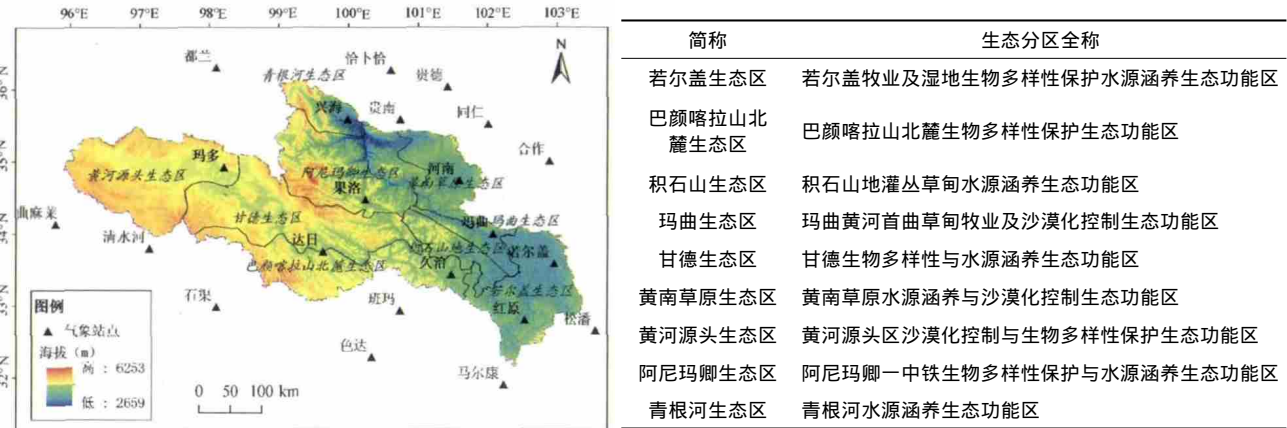


图 1 研究区生态分区及气象站分布图

Fig. 1 Ecological zoning and meteorological stations distribution in the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

(1) MODIS-NDVI 数据

选用 2000—2014 年研究区在全球正弦投影中编号为 h25v05 和 h26v05 的 MOD13A1 产品为基础数据(<http://e4ft101.cr.usgs.gov> 美国地质勘探局),经拼接、投影转换成空间分辨率 500 m 的影像数据,用各月 NDVI 数据通过最大合成法合成每年的 NDVI 数据。

(2) 气象数据

数据来源于中国气象科学数据共享服务网,包括黄河源区及其周边 36 个气象站点 2000—2014 年逐月平均气温、降水量等气象资料,主要用于计算不

同时间尺度的 SPEI 值,并通过 ArcGIS 的空间插值方法扩展成分辨率 500 m 的栅格数据。

(3) 生态功能区矢量数据

生态功能区的划分参考中国生态系统评估与生态安全数据库与国家环境保护总局发布的《生态功能区划(暂行)规程》^[21]。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱指数

SPEI 又称标准化降水蒸散指数,基于降水和蒸散量,通过计算两者差值与平均状态之间的离散距离来反映干旱程度的大小。具体计算步骤如下:

(1) 参考 Vicente-Serrano^[22]使用的 Thornthwaite^[23]方法,首先计算研究区的潜在蒸散量:

$$PET = 16 \times \frac{N}{12} \times \frac{M}{30} \left(\frac{10T}{H} \right)^a \quad (1)$$

式中: PET—潜在蒸散量; N—月均日照时数; M—某月天数; T—月均温; H—年热量指数;

(常数 a 的计算公式为: $a = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 + 1.792 \times 10^{-2} H + 0.49$)

(2) 计算逐月降水与潜在蒸散的差值,建立不同时间尺度的降水蒸散差值时间序列:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中: D_i —某月水分盈亏情况; P_i —某月降水量; PET_i —某月潜在蒸散量。

(3) 采用 Log-logistic 概率分布对 D 数据序列进行正态化,得到累计函数 $F(x)$:

$$F(\chi) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\chi - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: $F(x)$ —概率分布函数; 参数 α β γ 分别由线性矩法估算得到。

(4) 对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(\chi) \quad (4)$$

设 w 为原始数据序列 D 的概率加权矩,则当累计概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (5)$$

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (6)$$

当 $P > 0.5$ 时,则: $P = 1 - P$,

$$SPEI = - \left(W - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right) \quad (7)$$

式中: 常数 $c_0 = 2.515\ 517$; $c_1 = 0.802\ 853$; $c_2 = 0.010\ 328$; $d_1 = 1.432\ 788$; $d_2 = 0.189\ 269$; $d_3 = 0.001\ 308$ 。

2.2.2 SPEI 干旱等级划分

参考李伟光等^[17]在中国干旱趋势的研究中划分的干旱等级,对 SPEI 指数进行干旱等级划分。

表 1 SPEI 干旱等级划分

Tab. 1 SPEI drought classification

干旱等级	极端干旱	中度干旱	轻度干旱	正常
SPEI	≤ -2.0	≤ -1.0	≤ -0.5	> -0.5

2.2.3 NDVI 与 SPEI 的趋势分析及相关性计算

采用一元线性回归趋势计算方法,模拟 2000—2014 年 NDVI 的变化趋势和干旱程度的变化倾向,并通过 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法对其变化趋势进行显著性检验。计算公式为:

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (8)$$

式中: S —线性倾向值, n —年跨度, i —年序号, x_i —第 i 年的 NDVI 值或 SPEI 值。

NDVI 与 SPEI 的相关关系是基于像元尺度,对 NDVI 与 SPEI 的栅格数据进行相关分析,其相关系数的计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中: R — x 、 y 两变量的相关系数; x_i —第 i 年的 NDVI 值; y_i —第 i 年的年平均 SPEI。

3 结果分析

3.1 黄河源区各生态区 NDVI 和 SPEI 指数

2000—2014 年,各个生态区的 NDVI 年变化较平稳,波动幅度在 0.027—0.036 间,但各生态区之间 NDVI 值差异较大。黄河源区平均 NDVI 为 0.648,各生态区的 NDVI 分布总体呈东南向西北递减趋势(表 2)。黄河源头生态区是研究区内沙漠化面积较广、程度较严重的区域^[2-3],平均 NDVI 最低,但近年有所增大。若尔盖生态区主要分布有寒草甸、高寒沼泽和部分常绿针叶林,是 NDVI 最高的区域。黄南草原生态区、积石山地生态区和玛曲生态区主要分布有中高覆盖度的高寒草甸植被,是植被覆盖相对较高的区域。黄南草原和黄河源头北部地区多有草原或沙漠化植被,在 2000 到 2014 年间,前期有严重植被退化,近几年恢复良好。巴颜喀拉山北麓生态区、阿尼玛卿生态区和甘德生态区植被覆盖相对偏低,主要原因是这三个区土地覆盖的东西差异较大;巴颜喀拉山北麓生态区和阿尼玛卿生态区东部分布有林地和高寒草甸,阿尼玛卿生态区西部存在有较大面积的裸地、沙地和未利用地;甘德生态区东部的植被覆盖尚好,但西部与玛多相接地区有较大幅度的沙漠化现象,还有部分地区因植被退化有“黑土滩”类型,近几年国家进行生态环境治理,使甘德、果洛等地的 NDVI 在 2011 年后均有所提高,但仍然没有恢复到 2000 年状态。青根河生态区 NDVI 也偏小,因为有大面积裸岩石砾地和部分居住工矿等建设用地,但近年有增加趋势。

各生态区 SPEI 变化情况相似, 低值与高值基本都出现在同一年份, 总体都呈现出较明显的波动变化和轻微的上升趋势, 各生态区的干旱程度减轻, 气候湿润程度有所增加(表 3)。其中, 黄南草原生态区、黄河源头生态区和阿尼玛卿生态区由 2000 年的中度干旱变为 2013 年的轻度干旱, 诺尔盖生态区、巴颜喀拉山北麓生态区、积石山地生态区和玛曲生

态区在 2003 年以前出现过中度干旱, 而 2010 年之后至 2014 年未出现干旱。青根河水源涵养生态区 2003 年之前出现了两次中度干旱, 2003 年之后只出现了一次。出现干旱的年份有 2000、2001、2002、2006、2013, 其中 2002 年属于中度干旱, 其他年份属于轻度干旱(表 1、表 3)。

表 2 研究区各生态区平均 NDVI
Tab. 2 Average NDVI of each ecoregion in the study area

生态区	诺尔盖生态区	巴颜喀拉山生态区	积石山地生态区	玛曲生态区	甘德生态区	黄南草原生态区	黄河源头生态区	阿尼玛卿生态区	青根河生态区
NDVI	0.806	0.699	0.788	0.802	0.614	0.774	0.436	0.653	0.510

表 3 2000—2014 研究区各生态区 SPEI 指数
Tab. 3 SPEI index of each ecoregion in the study area during 2000—2014

年份 \ 生态区	诺尔盖生态区	巴颜喀拉山生态区	积石山地生态区	玛曲生态区	甘德生态区	黄南草原生态区	黄河源头生态区	阿尼玛卿生态区	青根河生态区
2000	-0.19	-0.37	-0.95*	-0.90*	-0.80*	-1.45**	-1.01**	-1.48**	-1.56**
2001	0.91	0.85	0.36	0.16	0.44	-0.49	0.34	-0.17	0.02
2002	-1.35**	-1.60**	-1.34**	-1.34**	-0.95*	-1.45**	-0.55*	-0.39	0.36
2003	0.78	0.15	0.62	0.94	-0.16	0.31	-0.67*	-0.39	-1.04**
2004	0.25	0.32	0.40	0.37	0.30	0.55	0.25	0.44	0.41
2005	0.80	1.02	0.99	0.93	1.04	1.07	0.89	1.13	1.10
2006	-0.31	-0.64*	-0.50*	-0.41	-0.64*	-0.40	-0.98*	-0.44	-0.55*
2007	-0.85*	0.28	0.12	0.14	0.82	1.19	0.69	0.79	0.53
2008	-0.73*	0.08	-0.22	-0.29	0.26	0.30	0.34	0.43	0.39
2009	-0.04	0.40	0.54	0.35	0.93	0.67	1.19	1.19	1.30
2010	0.02	-0.74*	-0.51*	-0.41	-0.60*	-0.55*	-0.20	-0.48	-0.19
2011	0.34	0.32	0.91	0.75	0.28	1.13	0.58	0.29	0.00
2012	1.07	1.07	0.98	1.02	1.06	0.89	1.19	0.89	0.90
2013	-0.21	-0.40	-0.48	-0.47	-0.61*	-0.83*	-0.64*	-0.89*	-1.22**
2014	0.91	0.85	0.36	0.16	0.44	-0.49	0.34	-0.17	0.02

(注: * 轻度干旱、** 中度干旱)

3.2 2000—2014 年黄河源区 NDVI 和 SPEI 时空变化特征

3.2.1 NDVI 和 SPEI 时间变化趋势

2000—2014 年黄河源区植被覆盖有增加的趋势(图 2), 通过图中趋势线拟合可知 NDVI 上升速率为 0.014/10a, SPEI 以 0.717/10a 的速率呈波动上升的趋势。NDVI 低值出现在 2003、2008 和 2011

年, 高值出现于 2005、2010 和 2012 年, SPEI 低值出现在 2002、2006、2010 和 2013 年, 高值在 2005、2009 和 2012 年, NDVI 和 SPEI 高低值出现年份相近。其中在 2003 到 2005 年间, NDVI 和 SPEI 的变化趋势均上升, 而在 2005 年到 2012 年大致均呈下降—上升—下降—上升的波动趋势, 2008—2012 年间波动幅度较大。

3.2.2 NDVI 和 SPEI 空间变化趋势

黄河源区的 NDVI 在东南部区域总体上均呈减少趋势,西北部区域总体上均呈增加趋势(图 3(a))。表现为增加和减少变化趋势的区域面积分别占 65% 和 35%,通过 M-K 趋势检验,NDVI 增加趋势的区域中有 27% 通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验,减少趋势的区域中有 10% 通过了 95% 的显著性检验。其中,NDVI 呈显著增长趋势的区域主要在黄河源头生态区东北部区域、甘德生态区西北部、青根水源涵养生态区、阿尼玛卿生态区和黄南草原生态区的相交区域。NDVI 有所下降的区域主要在黄河源区中部及若尔盖生态区。

根据 SPEI 变化趋势的空间分布情况(图 3(b)),黄河源区大部分的区域 SPEI 呈增加趋势,增加趋势值总体上从东南向西北地区增大,通过 M-K 趋势检验,SPEI 增加趋势的区域中有 31% 通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验,下降趋势不显著。黄河源头生态区、甘德生态区西部、巴颜喀拉山北麓生态区西部和东部、青根河生态区、阿尼玛卿北麓生态区和黄南草原生态区相交区域的 SPEI 增加趋势最为明显,

干旱程度降低,湿润度增加,只在黄河源区中部及诺尔盖生态区干旱程度有微弱加重,表明黄河源区的气象干旱程度总体上呈现缓解趋势。

3.3 黄河源区 SPEI 与 NDVI 相关关系分析

3.3.1 降水、气温对 NDVI 与 SPEI 的影响

为了具体分析哪种气象因子对 NDVI 与 SPEI 的影响较大,以及两者的相互关系是由哪个因子影响的,以黄河源区内气象站点为原点,建立 2 km 半径的缓冲区来提取 NDVI 数据与站点降水量、气温和 SPEI 数据一一对应,进行线性拟合,并对气温、降水量与 SPEI 和 NDVI 的相关关系进行探讨(图 4、表 4)。

从单因子对 NDVI 与 SPEI 的影响来看,降水、气温与 NDVI 都呈显著正相关($P < 0.05$),且降水-NDVI 的相关系数比气温-NDVI 的相关系数大;降水与 SPEI 呈显著正相关,气温与 SPEI 的相关性不显著。通过偏相关分析可知,气温恒定时,降水对 NDVI 和 SPEI 均有显著的影响,但当降水一定时,气温对 NDVI 的影响不显著,但与 SPEI 呈显著负相关。说明黄河源区降水量是影响植被生长的主要因子,也是影响 SPEI 变化的主要条件。

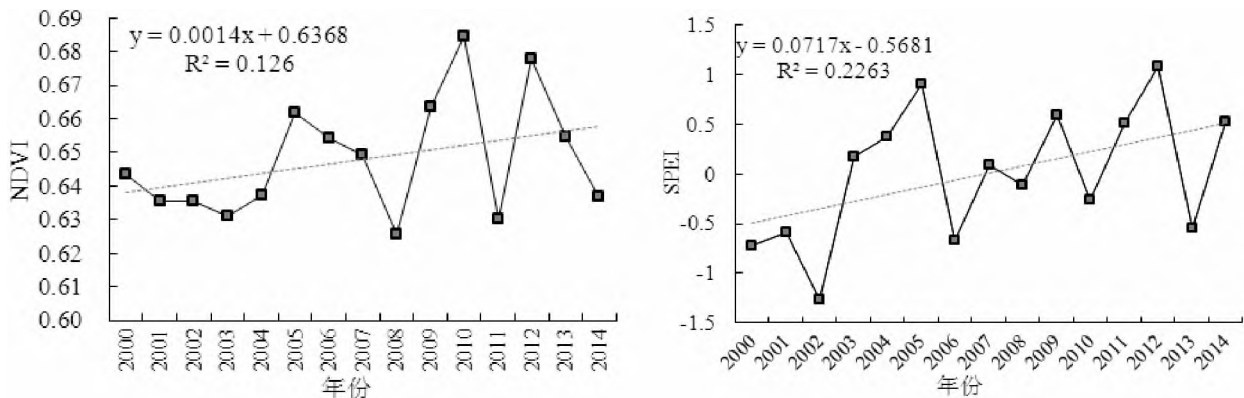


图 2 2000—2014 年研究区平均 NDVI 和 SPEI 多年变化趋势

Fig. 2 Annual change of average NDVI and SPEI during 2000—2014

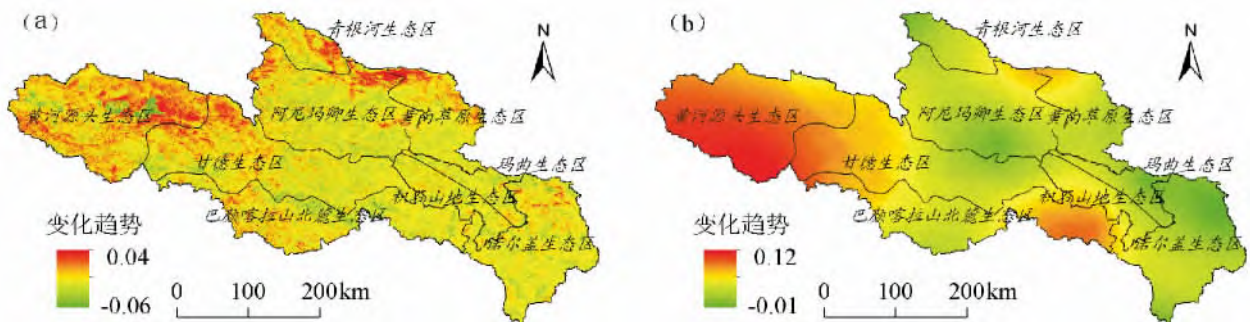


图 3 2000—2014 年研究区 NDVI(a) 和 SPEI(b) 的变化趋势分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual NDVI(a) and annual SPEI(b) change trend during 2000—2014

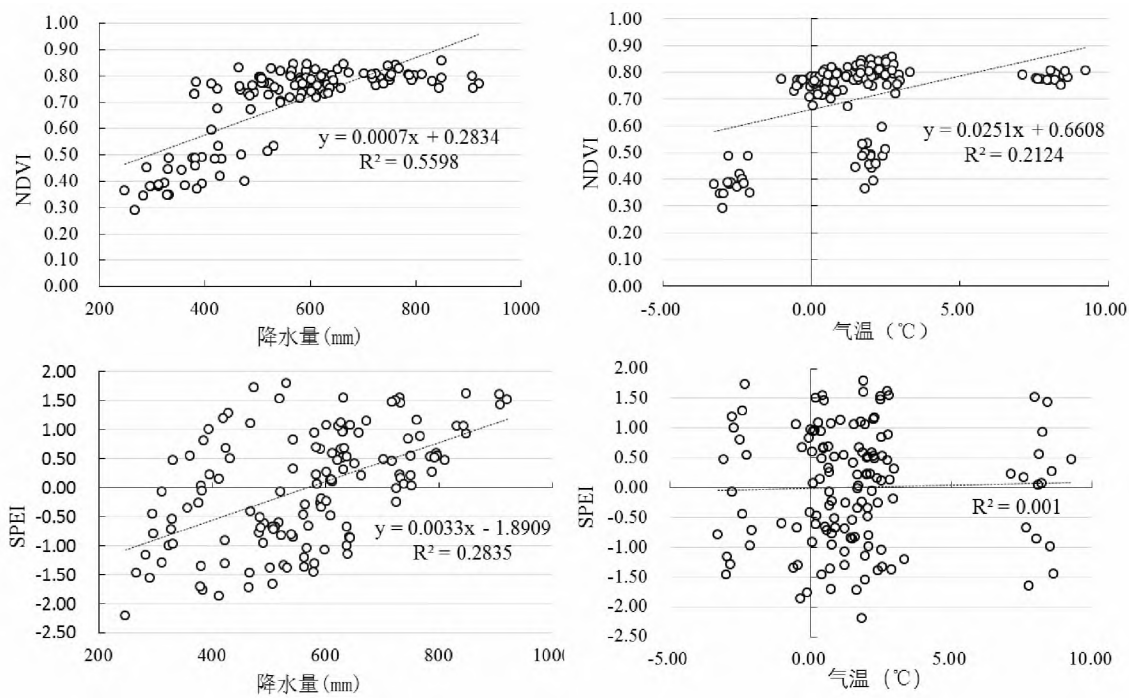


图 4 降水、气温与 NDVI 和 SPEI 相关性拟合

Fig. 4 Correlation between precipitation ,air temperature ,NDVI and SPEI

表 4 降水(P)、气温(T)与 NDVI 和 SPEI 的偏相关系数

	NDVI-P/T	NDVI-T/P	SPEI-P/T	SPEI-T/P
偏相关系数	0.662*	0.053	0.631*	-0.401*

* 表示在 0.05 的置信度水平上显著

3.3.2 NDVI 与 SPEI 相关系数空间分布特征

图 5(a)显示 ,当 NDVI 处于 0.3 - 0.6 时 ,NDVI 与 SPEI 有显著的相关性 ,当 NDVI 大于 0.6 时 ,NDVI 与 SPEI 的相关性不显著。说明植被生长茂盛的区域生态调节作用强 ,不容易受干旱指数波动的影响 ,而植被覆盖度较低的区域自身调节作用差 ,易受干旱指数变化的影响。因此可初步判断黄河源头生态区和青根河生态区 NDVI 与 SPEI 相关性较明显。

根据公式(9)对 2000—2014 年 NDVI 数据和年平均 SPEI 指数进行基于像元的相关分析 ,结果如图 5(b)所示: 黄河源区 NDVI 与 SPEI 呈负相关的地方主要在中部 ,西部和北部主要呈正相关。研究区 NDVI 与 SPEI 的平均正相关系数为 0.281 ,平均负相关系数为 - 0.201。呈正相关的区域面积占 66% ,成负相关的区域占 34%。在正相关区域中 ,有 20% 的区域通过了 $P < 0.1$ 检验 ,12% 通过了 $P < 0.05$ 检验; 在负相关区域中 ,分别有 8% 和 3% 的区

域通过了 $P < 0.1$ 和 $P < 0.05$ 检验。说明黄河源区植被覆盖状况与干旱程度存在正相关性的区域大于负相关性的区域 ,并且各生态区的相关系数特征有很大差异 ,需要进行分区讨论。

各生态区中平均相关系数最大的区域是青根河生态区 ,为 0.423 ,并且 88% 的地区呈正相关 ,其中 50% 的区域通过 $P < 0.1$ 的检验 ,36% 的地区通过了 $P < 0.05$ 的检验。黄河源头生态区整体区域的平均正相关系数为 0.346 ,正相关的区域占 85% ,32% 的区域通过了 $P < 0.1$ 的检验 ,19% 的区域通过 $P < 0.05$ 的检验。说明该区域内植被生长与干旱程度的联系比较紧密 ,与之前的判断一致。

甘德生态区、阿尼玛卿生态区和巴颜喀拉山北麓生态区这四个区域内 NDVI 与 SPEI 相关系数差异比较大 ,正相关与负相关分布较明显 ,各区域内呈正相关的比例分别为 64%、60% 和 57% ,主要分布在偏西地区 ,其中呈显著相关的区域分别占 16%、

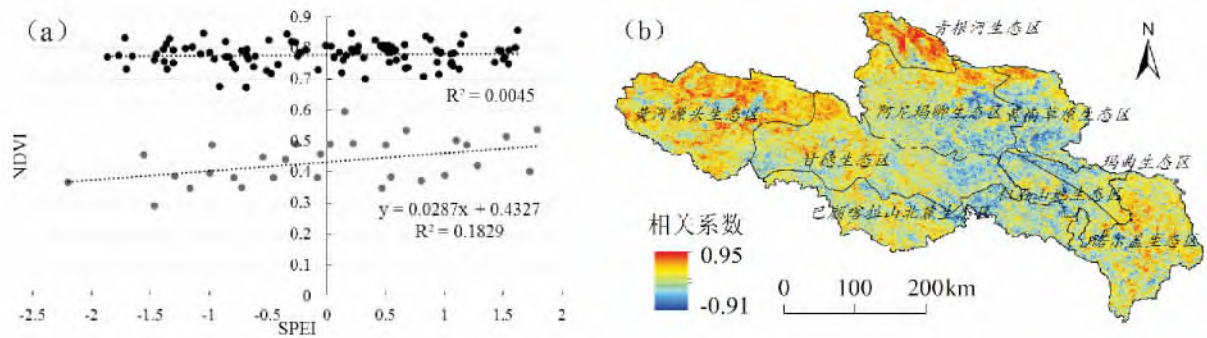


图5 研究区 NDVI 与 SPEI 的相关关系 (a) 及空间分布 (b)

Fig. 5 Correlation and spatial distribution between NDVI and SPEI

16% 和 10%; 呈显著负相关的比例分别为 6%、11% 和 9%, 主要集中于偏东部地区; 相关性不强的地方主要分布在裸石砾地、耕地和城镇等用地类型区, 表明气候干旱程度对这些地区的植被生长有所影响, 但联系并不紧密。诺尔盖生态区呈正相关的比例为 71%, 17% 显著, 显著负相关占 5%, 若尔盖生态区因其较平坦的地势和充足的水源使 NDVI 总体上变化平稳, 受干旱影响不大。以上区域主要呈正相关, 并且近年来该区域干旱程度的降低趋势对植被的恢复生长有利。积石山地生态区、黄南草原生态区和玛曲生态区的平均正相关系数较低, 呈显著正相关的区域与呈显著负相关的区域所占比例接近, 呈显著正相关的分别占 5%、6% 和 4%; 呈显著负相关的分别占 4%、6% 和 5%。研究期内, 这些区域 NDVI 没有明显变化, 干旱变化趋势也不明显, 这使其呈现负相关或不相关的特征, 呈现负相关性可能与不合理的土地利用方式和植被退化有关。黄南草原生态区几乎每年均有超过两个月轻度干旱等级及以上的干旱期, 该区呈负相关的区域表明在干旱程度一定的情况下, 即使干旱指数有所上升, 植被生长仍然受到限制。

4 结论与讨论

黄河源区生态环境的退化受到人类活动和气候环境两方面的影响, 而气候要素是影响研究区植被变化的决定性因素。对黄河源区 2000—2014 年 NDVI 和 SPEI 的年际变化、空间分布规律以及两者相关关系的研究结果表明:

(1) 2000—2014 年河源区 NDVI 和 SPEI 均呈波动上升趋势, 植被状况略有好转, 各生态区的干旱程度有所减轻。由于近十年内的降水量有增加趋

势, 干旱程度减弱, 有暖湿化趋势, 为该区域的生态恢复提供了有利条件。2005 年黄河源区建立了生态保护区后, 退牧还草、草地退化治理等工程的实施改善了植被状况, 植被指数呈先下降后上升的波动增长, 说明生态恢复工程实施对植被覆盖的影响具有一定的滞后性, 气候条件是该区植被覆盖变化的主要限制因素。

(2) 黄河源区干旱指数与植被指数具有较一致的变化趋势, 存在一定的相关关系, 黄河源区 NDVI 与 SPEI 在西部和北部主要呈正相关, 中部区域呈负相关。正相关的区域多为植被覆盖度较低的区域; 呈负相关的区域多为草地退化、生物多样性敏感的区域, 人类活动的干扰较为显著, 使 NDVI 与 SPEI 呈负相关或相关性较弱; 当 $0.3 < \text{NDVI} < 0.6$ 时相关性显著, 当 $\text{NDVI} > 0.6$ 时相关性不显著;

(3) 不同生态区的 NDVI 与 SPEI 相关性存在明显的区域差异, 各生态区的生态环境背景不同是产生差异的原因, 水土流失、土地沙化较严重的区域对干旱最为敏感, 而东南部降水量与土壤含水量较高, NDVI 受干旱指数的影响较低。研究中获取 NDVI 时难以对人类活动的影响进行定量化分析, 在后续研究中需要加强人类活动对 NDVI 影响的定量化研究, 比较人类活动和气候条件对研究区植被生长的影响效果。

参考文献 (References)

- [1] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化时空变化遥感分析[J]. 地理学报 2007 62(5): 529–536. [ZENG Yongnian, FENG Zhaodong. Spatial and temporal changes of desertification in the headwater area of the Yellow River using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica 2007 62(5): 529–536.]
- [2] 胡光印, 董治宝, 逮军峰等. 黄河源区 1975–2005 年沙漠化时

- 空演变及其成因分析[J]. 中国沙漠 2011 **31**(5): 1079–1086. [HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Spatial and temporal changes of desertification land and its influence factors in Source Region of the Yellow River from 1975 to 2005 [J]. Journal of Desert Research 2011 **31**(5): 1079–1086.]
- [3] QIAN S, FU Y, PAN F F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in Three-River Source Region. Science China: Earth Sciences, 2010, **53**(10): 1506–1512.
- [4] LIU L S, ZHANG Y L, BAI W Q, et al. Characteristics of grassland degradation and driving forces in the Source Region of the Yellow River from 1985 to 2000. Journal of Geographical Sciences 2006 **16**(2): 131–142.
- [5] 宋翔, 颜长珍, 朱艳玲等. 黄河源区土地利用/覆被变化及其生态环境效应[J]. 中国沙漠 2009 **29**(6): 1049–1055. [SONG Xiang, YAN Changzhen, ZHU Yanling, et al. Land use/cover change and associated effects on eco-environment in source region of Yellow River [J]. Journal of Desert Research 2009 **29**(6): 1049–1055.]
- [6] 李开明, 李绚, 王翠云等. 黄河源区气候变化的环境效应研究[J]. 冰川冻土 2013 **35**(5): 1183–1192. [LI Kaiming, LI Xu-an, WANG Cuiyun, et al. Research on the environmental effect caused by climate change in Source Region of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2013 **35**(5): 1183–1192.]
- [7] 赵志平, 吴晓蕾, 李果等. 黄河源区高寒草地 NDVI 格局与梯度变化[J]. 草业科学 2013 **30**(12): 1917–1925. [ZHAO Zhiping, WU Xiaopu, LI Guo, et al. Spatial pattern and change gradient of alpine grassland in the Source Region of Yellow River [J]. Pratacultural Science 2013 **30**(12): 1917–1925.]
- [8] 徐浩杰, 杨太保. 黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. 资源科学 2013 **30**(10): 2024–2031. [XU Haojie, YANG Taibao. Spatial-temporal variation characteristics of vegetation annual NPP and responses to climatic factors in the Source Region of the Yellow River [J]. Resources Science, 2013 **30**(10): 2024–2031.]
- [9] 孙璐, 张友静, 张滔. 黄河源区土地利用/覆盖生态服务功能价值评价及时空预测[J]. 地理与地理信息科学 2014 **30**(5): 99–104. [SUN Lu, ZHANG Youjing, ZHANG Tao. Valuation of ecosystem services based on land use and land cover in Source Region of the Yellow River [J]. Geography and Geo-Information Science, 2014 **30**(5): 99–104.]
- [10] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究[J]. 生态学报 2012 **30**(11): 3404–34. [DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo. Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica 2012 **30**(11): 3404–34.]
- [11] RINGROSE S, MATHESON W, WOLSKI P, et al. Vegetation cover trends along the Botswana Kalahari transect [J]. Journal of Arid Environments 2003 **54**(2): 297–317
- [12] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报 2013 **31**(2): 234–242 [LIU Junhui, GAO Jixi, WANG Wenjie. Variations of vegetation coverage and its relations to global climate changes on the Tibetan Plateau during 1981–2005 [J]. Mountain Research 2013 **31**(2): 234–242.]
- [13] 潘学鹏, 吴喜芳, 沈彦俊等. 三江并流河源区植被覆盖度对气候要素的响应[J]. 山地学报 2015 **33**(2): 218–226. [PAN Xuepeng, WU Xifang, SHEN Yanjun, et al. Responses of vegetation coverage changes to climate factors in the Source Regions of Three Parallel Rivers [J]. Mountain Research, 2015 **33**(2): 218–226.]
- [14] 刘宪锋, 任志远, 林志慧等. 2000–2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报 2013 **68**(7): 897–908. [LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, LIN Zhihui, et al. The Spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in Recent 12 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2013 **68**(7): 897–908.]
- [15] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 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. [ZHAO Shuyi, GONG Zhaoning, LIU Xuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001–2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015 **70**(5): 717–729.]
- [16] YANG J, HUANG C, ZHANG Z, et al. The temporal trend of urban green coverage in major Chinese cities between 1990 and 2010. Urban Forestry & Urban Greening 2014 **13**(1): 19–27.
- [17] 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. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture 2012 **20**(5): 643–649.]
- [18] 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. Temporal and spatial distributions of drought in southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration Index [J]. Journal of Natural Resources 2014 **29**(6): 1003–1016.]
- [19] PEI F, XIA L, LIU X, et al. Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China [J]. Journal of Environmental Management 2013 **114**(2): 362–371.
- [20] MAOSHENG Z, RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. [J]. Science 2010 **329**(5994): 940–943.
- [21] 中国科学院生态环境研究中心. 中国生态系统评估与生态安全数据库. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>. [Research center for eco-environmental sciences, Chinese academy of sciences. China ecosystem assessment and ecological security database. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>.]
- [22] VICENTE Serrano S M, BEGUERIA S, LOPEZ 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.
- [23] THORNTON W A, C. W. 1948: An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review **38**: 55–94.

[24] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报,2011,31(19):5495-5504. [LI Huixia,LIU Guohua,FU Bojie. Response

of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19):5495-5504.]

Dependency Relationship between NDVI and SPEI for Spatial-Temporal Variations in the Source Areas of the Yellow River

ZHANG Yanfang, WU Chunling, ZHANG Hongyun, WANG Shu

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract: Under the circumstances of global warming, standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) has become an important index in evaluating drought level. Based on eco-functional zoning, MODIS-NDVI and SPEI data collected in the source region of the Yellow River during 2000—2014, this study discussed the spatial-temporal change characteristics of NDVI and SPEI and their dependency relationship. Results showed: (1) the values of NDVI and SPEI demonstrated a rising trend in general in the period of 2000—2014, and the vegetation coverage turned better and the drought level decreased. (2) Both NDVI and SPEI had approximately similar pattern for spatial distribution, with a decrease in the southeast and an increase in the northwest. (3) Precipitation was acting as the main factor regulating vegetation growth and SPEI change. The effect of SPEI on NDVI was stronger in the case of $0.3 < \text{NDVI} < 0.6$, whereas it was weaker if $\text{NDVI} > 0.6$. (4) NDVI presented a positive relationship with SPEI in most parts of the source region of the Yellow River, especially in the Qinggen river ecological zone and the source region of the Yellow River ecological region where were featured by relatively lower vegetation coverage. However, NDVI showed negatively relationships with SPEI in the Huangnan grassland ecological zone and its surroundings, especially at grassland degradation areas and biodiversity sensitive areas. The decrease in drought level would enable vegetation coverage to increase in the study area and provide favorable conditions for ecological restoration in the region.

Key words: Source region of the Yellow River; SPEI; NDVI; Spatial-temporal change

封面照片：广西大化七百弄国家地质公园 弄坪龙卷地

弄(long)坪龙卷地为七百弄人生产实践的“杰作”。当地农民依据地形层层向上,修建成圆形的阶梯地。每当青苗成长时,阶梯地犹如静水中激起的层层“浪花”,具有极高的美学观赏价值。