

基于地理探测器的黄河源区SPEI影响因子研究

许美娇¹, 权全^{1,2*}

¹西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安

²河海大学, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京

Email: 979266635@qq.com, *qq@xaut.edu.cn

收稿日期: 2021年5月31日; 录用日期: 2021年6月15日; 发布日期: 2021年6月29日

摘要

由于全球变暖加剧, 干旱在世界范围内盛行, 严重影响了水资源的管理和利用。为了研究黄河源区SPEI变化及其影响因子, 本文根据源区2000~2015年SPEI序列, 利用Mann-Kendall检验法和空间分布分析简单说明了黄河源区域2000~2015年的干旱分布情况。并利用地理探测器来研究黄河源区SPEI与各种因子的互馈关系。结果表明: 1) 在时间上, 黄河源区在2000~2015年期间, SPEI序列呈现不显著上升趋势。在空间上, 黄河源区中部地区和东南部地区的干旱情况较为严重, 而西部地区只有轻微的干旱情况。整个源区的干旱情况由东部到西部有所缓和。2) 单因子探测中, 对SPEI变化影响程度最大的因素为NDVI和土壤湿度, 最小的因素为土地利用类型。其中2004年、2005年、2006年以及2009年对SPEI影响程度最大及最小的因素发生了变化。3) 交互作用探测中, 双因子间的交互作用均为增强, 这说明两因子共同作用时比单因子作用的解释力要强。4) 生态探测中, 大多数因子之间是有显著差异的。这说明黄河源区对SPEI变化起主导作用的因子具有独特的作用机理。研究结果可为水资源管理提供有价值的参考和依据。

关键词

地理探测器, 黄河源区, SPEI, 影响因子, Mann-Kendall检验法

Research on the Impact Factors of SPEI in the Source Region of the Yellow River Based on Geo-Detector

Meijiao Xu¹, Quan Quan^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

²State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Email: 979266635@qq.com, *qq@xaut.edu.cn

Received: May 31st, 2021; accepted: Jun. 15th, 2021; published: Jun. 29th, 2021

作者简介: 许美娇(1998-), 女, 满族, 河北秦皇岛, 硕士研究生。

*通讯作者。

文章引用: 许美娇, 权全. 基于地理探测器的黄河源区 SPEI 影响因子研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(3): 288-298.

DOI: 10.12677/jwrr.2021.103031

Abstract

Due to the aggravation of global warming, drought prevails all over the world, which seriously affects the management and utilization of water resources. In order to study the changes of SPEI and its influencing factors in the source region of the Yellow River, the drought distribution in the source region of the Yellow River during 2000~2015 was simply explained by using the Mann-Kendall test method and spatial distribution analysis based on the SPEI series of the source region during 2000~2015. The mutual feed-back relationship between SPEI and various factors in the source region of the Yellow River was studied by using Geo-detector. The results show that: 1) In terms of time, the SPEI sequence of the source region of the Yellow River showed an insignificant upward trend during 2000~2015. Spatially, the drought in the central and southeastern parts of the source region of the Yellow River is severe, while the drought in the western region is slight. The drought situation in the whole source region eased from the east to the west. 2) In the single factor detection, NDVI and soil moisture were the most influential factors on SPEI change, while land use type was the least influential factor. In 2004, 2005, 2006, and 2009, the factors that affected SPEI most and least changed. 3) In the detection of interaction, the interaction between the two factors was enhanced, which indicated that the interaction between the two factors was stronger than that between the single factor. 4) In ecological exploration, there are significant differences among most factors. These results indicate that the factors leading to the change of SPEI in the source region of the Yellow River have a unique mechanism. The research results may provide a valuable reference and basis for water resources management.

Keywords

Geo-Detector, Source Region of the Yellow River, SPEI, Impact Factors, Mann-Kendall Test

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是一种发生次数频繁、持续的时间较长并且影响非常广泛的自然灾害[1]。如果干旱持续发生,会有许多方面受到影响,比如农业、生态以及环境等都会有所损失[2]。我国是属于旱灾发生比较频繁的国家,由于旱灾的发生,水资源匮乏的问题越来越严重,并且随着全球变暖问题日益明显,我国目前最需要解决的问题之一就是缺水[3]。因此,开展有关干旱的研究对我国防旱抗旱以及解决干旱带来的缺水问题尤为重要。

黄河源区是黄河的供水区,对我国生态环境保护、水资源保护以及气候变化都具有重要影响[4]。研究结果显示[5],随着气温的升高、降水量的减少,黄河源区的气候在近 50 年内呈现出一种干旱化的趋势,源头甚至多次出现断流。因此,为了能够避免干旱给人类生存产生的不利影响,深入研究黄河源区的干旱及其影响因子有着极为重要的意义[6]。目前干旱指数被大多数学者用来描述区域上的干旱程度,其中包括 PDSI 指数和 SPI 指数[7]。但是 SPI 指数在运用中并未考虑到潜在蒸散量的影响,而 PDSI 指数在干旱的等级划分上主观性较强[8]。而 Vicente-Serrano 等提出的 SPEI 指数综合了这两个问题,既能表现 SPI 指数多时间尺度的特征,又保留 PDSI 指数对潜在蒸散量相对来说比较敏感的优点[9]。本文选用 SPEI 指数来描述黄河源区的干旱程度,利用 MK 检验法分析 2000~2015 年 SPEI 的变化趋势,并运用地理探测器的方法分析 PET、NDVI、DEM、土地利用类型和土壤湿度等因子在单独作用以及交互作用时对 SPEI 的影响。本文进一步研究了各因子对 SPEI 干旱指数的影响程度大小,旨在为区域水资源规划和抗旱减灾制定实施指南。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

黄河源区在青藏高原的东北地区，具体是指黄河唐乃亥水文站的断面以上地区[10]。它的流域面积 13.1 万 km²，是该流域的重要产流区，有“中华水塔”之称[11]。如图 1 所示，区域范围在 32°09'~36°06'N, 95°54'~103°22'E 之间，主要包括了甘肃的玛曲、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[12]。源区的自然环境有许多样类型，高寒植被的分布最为广泛，其中高寒草原和高寒草甸占比最大，大约占 70%以上[13]。

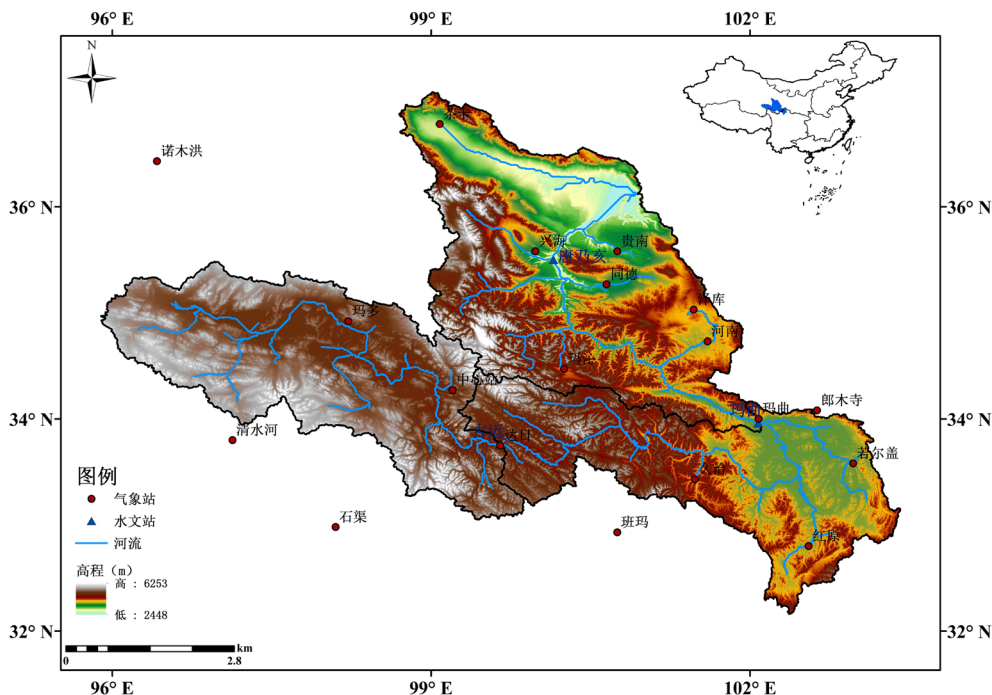


Figure 1. Location of study area
图 1. 研究区示意图

2.2. 数据来源

本研究收集了黄河源区 2000 年 1 月至 2015 年 12 月逐月的气象资料，包括降水和气温等数据。表 1 展示了研究区内及其附近各气象站的名称和位置。数据从国家气象科学数据共享服务平台以及网址下载：<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>。

Table 1. Names and locations of meteorological stations in the study area

表 1. 研究区气象站点名称与位置

名称	经度	纬度	名称	经度	纬度
清水河	97.13	33.80	久治	101.48	33.43
中心站	99.20	34.27	河南	101.60	34.73
达日	99.65	33.75	玛曲	102.08	34.00
玛沁	100.25	34.47	红原	102.55	32.80
班玛	100.75	32.93	郎木寺	102.63	34.08
泽库	101.47	35.03	若尔盖	102.97	33.58

3. 研究方法

3.1. SPEI 的计算

SPI 干旱指数在计算的过程中只考虑降水因素并且具有多时间尺度[14]。而 SPEI 指数是在 SPI 指数的基础上加上参考作物蒸散量而得出[7]。在降水以及蒸散量的基础上，计算两者的差值和平均状态之间离散距离，以此来反映干旱程度大小[12]。本文计算了年尺度的 SPEI 用于分析，具体的计算方法可以参考文献[15]。下面对该方法进行简要介绍：

计算逐月的降水和潜在蒸散发差值 D_i ：

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

对 D_i 进行正态化处理，得到其概率分布函数：

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

式中： α 、 β 和 γ 是参数，由线性距法来(L-moment)估计。

进行标准化正态分布处理，得：

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

$$W = \sqrt{-\ln(P)}, P \leq 0.5.$$

式中： $P = 1 - F(x)$ ，当 $P > 0.5$ 时， $P = 1 - P$ 。参数 $C_0 = 2.515517$ ， $C_1 = 0.802853$ ， $C_2 = 0.010328$ ， $d_1 = 1.432788$ ， $d_2 = 0.189269$ ， $d_3 = 0.001308$ 。

3.2. Mann-Kendall 检验法

原始的 Mann-Kendall (MK)趋势测试方法是一种非参数趋势测试方法[16]。但是，该方法基于序列独立性假设，当序列负相关时，将导致趋势显著性被低估，当序列正相关时，将导致趋势显著性被高估[17]。为了消除这种影响，对其进行修正，具体算法可以参考文献[17]。

3.3. 地理探测器

地理探测器是王劲峰等人提出来的一种可以探测空间分异性并且寻找其背后驱动因子的一种新方法[18]。地理探测器一共有 4 个探测器，其中分异及因子探测用来探测 Y 的空间分异性。交互作用探测用来识别不同因子之间的交互作用，评估各因子在独立作用的情况下和在共同作用的情况下对 Y 的解释力是否有强弱变化。生态探测是用来判断两因子在空间分布上对属性 Y 的影响是否存在显著差异。而风险区探测是用于两子区域之间，比较其属性均值的差别。由于本文并没有对黄河源区进行分区，所以在本文中只运用了前三种探测器，下面对该方法进行简要介绍，具体地理探测器的原理可以参考文献[19]。

分异及因子探测：用 q 值来度量因子 X 对 Y 的解释力， q 值的大小代表着 X 对 Y 的解释力强弱。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

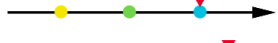
式中： h 代表变量 Y 或因子 X 的分层； N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数。

交互作用探测：分别计算两种因子单独作用时的 q 值 ($q(X1), q(X2)$)，再计算两种因子交互作用时的 q 值 ($q(X1 \cap X2)$)，并对其进行比较，结果可分为五类见表 2。

生态探测：若探测结果为“Y”，则说明两种因子作用机制有显著差异；若探测结果为“N”，则说明两因子对于因变量的影响机制无显著差异。

Table 2. Interaction result types

表 2. 交互作用结果类型

示意图	图形描述	交互关系	图例
	$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱	● : $\text{Min}(q(X1), q(X2))$ ● : $\text{Max}(q(X1), q(X2))$ ● : $q(X1) + q(X2)$ ▼ : $q(X1 \cap X2)$
	$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱	
	$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强	
	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立	
	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强	

4. 结果分析

4.1. SPEI 的时空变化

在时间上利用 Mann-Kendall 方法对整个黄河源区的 SPEI 序列进行趋势分析，结果如图 2 所示，整体来看在 2000~2015 年期间，源区的 SPEI 序列呈现上升趋势，SPEI 值在逐渐增加，Z 为 1.40，上升趋势不显著。其中 SPEI 最小为 -1.15 出现在 2002 年，整个源区处在一种中度干旱的状态。SPEI 最大值为 0.64 出现在 2012 年，源区的干旱状况得到明显的改善，呈现出轻微湿润的状态。

在空间上利用 Arcgis 对整个黄河源区的 SPEI 序列进行分析，图 2 显示了 2000~2015 年黄河源区的干旱空间分布情况。如图所示，整个黄河源区的干旱情况由东部到西部有所缓和。其中黄河源区中部地区和东南部地区的干旱情况较为严重，而黄河源区西部地区的干旱情况稍有好转。可以看出，黄河源区大部分区域的 SPEI 值为负，只有一小部分地区的 SPEI 值为正。

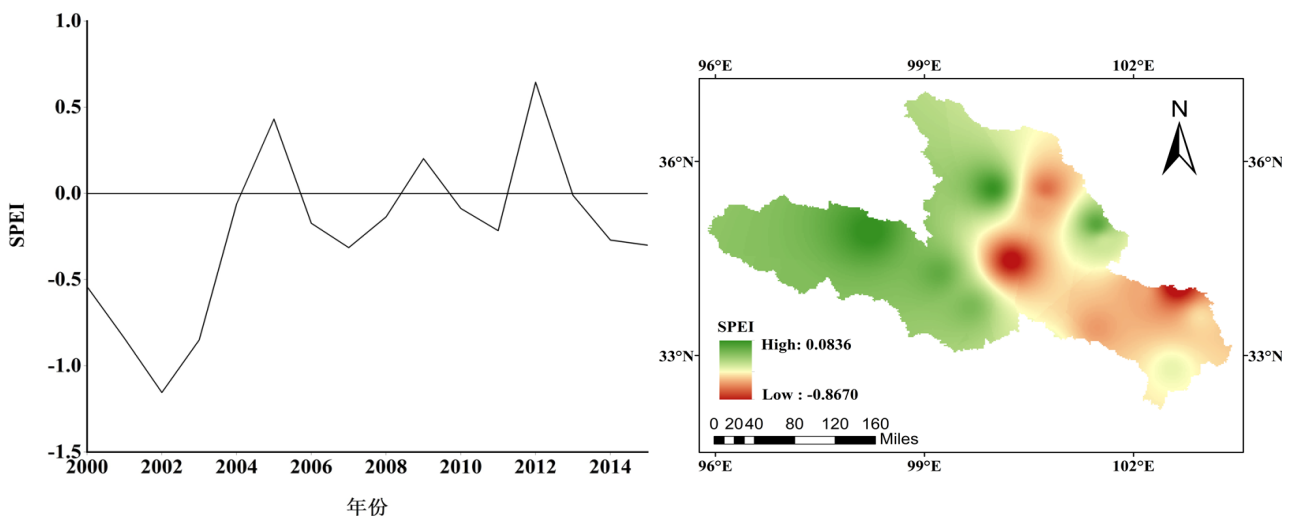


Figure 2. The SPEI sequence and its spatial distribution in the study area

图 2. 研究区 SPEI 序列及其空间分布

4.2. 探测因子单因素分析

为了探究黄河源区 SPEI 与各种因素的互馈关系, 本文利用地理探测器的分异及因子探测来分析使 SPEI 产生分异的驱动因子, 其中包括 PET、NDVI、DEM、土地利用类型和土壤湿度等因素, 结果如表 3 所示。总体来看对 SPEI 变化影响程度最大的因素为 NDVI 和土壤湿度, 最小的因素为土地利用类型。其中最大 q 值为 0.7924, 解释力达到 79%, 出现在 2005 年, 最小 q 值为 0.0062, 解释力只有 0.6%, 出现在 2002 年。从 2000 年到 2015 年对 SPEI 影响程度最大及最小的因素发生变化的年份为 2004 年、2005 年、2006 年以及 2009 年。2004 年各因子对 SPEI 影响程度排序为: PET > NDVI > 土壤湿度 > DEM > 土地利用类型。2005 年各因子对 SPEI 影响程度排序为: NDVI > DEM > PET > 土地利用类型 > 土壤湿度。2006 年各因子对 SPEI 影响程度排序为: PET > NDVI > DEM > 土壤湿度 > 土地利用类型。2009 年各因子对 SPEI 影响程度排序为: NDVI > PET > DEM > 土地利用类型 > 土壤湿度。

Table 3. Factors and q values affecting SPEI changes in the study area

表 3. 影响研究区 SPEI 变化的因素及 q 值

年份	PET	NDVI	DEM	土地利用类型	土壤湿度
2000	0.1252	0.0490	0.1917	0.0428	0.6674
2001	0.2794	0.1204	0.2285	0.0282	0.3048
2002	0.1303	0.2735	0.0294	0.0062	0.0173
2003	0.1147	0.2135	0.0630	0.0424	0.3036
2004	0.2533	0.2001	0.0659	0.0139	0.1060
2005	0.2956	0.7924	0.3609	0.0328	0.0305
2006	0.3638	0.2461	0.0829	0.0231	0.0771
2007	0.3252	0.4852	0.1425	0.0491	0.1229
2008	0.5462	0.6030	0.5874	0.0211	0.2831
2009	0.3443	0.7073	0.3277	0.0265	0.0135
2010	0.2843	0.7796	0.3100	0.0545	0.2043
2011	0.2458	0.3428	0.1893	0.0511	0.1492
2012	0.0684	0.0446	0.0726	0.0196	0.2628
2013	0.4811	0.0948	0.4401	0.0398	0.7176
2014	0.3890	0.2541	0.2443	0.0501	0.4681
2015	0.2813	0.3835	0.2274	0.0464	0.2302

4.3. 探测因子交互作用分析

在黄河源区 2000~2015 年 SPEI 变化研究中, 双因子间的交互作用均为增强, 其中包括双因子增强和非线性增强两种, 这说明两因子共同作用时比单因子作用时的解释力要强。结果如图 3 所示, 2000 年和 2013 年双因子之间的交互作用对 SPEI 变化的解释力排在前 3 组的为: 土壤湿度 \cap NDVI、土壤湿度 \cap DEM、土壤湿度 \cap PET。可以看到, 这两年的土壤湿度因子与其他因子交互作用后的解释力均大于 0.6674 和 0.7176, 这与单因素分析中土壤湿度对 SPEI 变化的解释力最强的结果一致。在 2001 年、2003 年、2004 年、2006 年、2007 年、2010 年、2014 年和 2015 年的双因子交互作用结果中, 对 SPEI 的解释力排在前 3 组的为: NDVI \cap PET、土壤湿度 \cap NDVI、土壤湿度 \cap PET。在单因子探测结果中, 2004 年和 2006 年对 SPEI 影响程度最大的因子为 PET, q 值分别为 0.2533 和 0.3638。但是在双因子交互作用后, 其结果发生了改变, 对 SPEI 的解释力最大的为土壤湿度 \cap NDVI, 且其 q 值均到达了 0.6 以上, 解释力明显提高。在 2002 年、2005 年、2008 年、2009 年和 2011 年的双因子交互作用结果中, 对 SPEI

的解释力排在前三组的为：NDVI∩PET、NDVI∩土壤湿度、NDVI∩DEM。在 2005 年和 2009 年，单因子探测时对 SPEI 影响最小的因子为土壤湿度，但是当土壤湿度与其他因子交互作用后，解释力有很大的增强，其中土壤湿度∩NDVI 对 SPEI 的解释力变为最强，尤其是 2009 年，q 值高达 0.9466。在 2012 年的双因子交互作用结果中，对 SPEI 的解释力排在前三组的为：土壤湿度∩PET、NDVI∩PET、土壤湿度∩DEM。其结果均为非线性增强。由上一小节的单因子探测结果可以看到，2012 年各因子的 q 值均很小，最大土壤湿度因子的 q 值为 0.2628，而最小土地利用类型的 q 值仅为 0.0196。但是当土壤湿度因子与其他因子交互作用后，q 值提高到 0.4229，解释力有明显提高。由图 3 可知，NDVI 与土壤湿度在与其他因子交互作用后对 SPEI 的解释力均明显提高，当 NDVI 或土壤湿度具有明显的空间分异时就会显著增强 SPEI 的空间异质性。说明 NDVI 与土壤湿度对 SPEI 变化具有极为重要的影响，这是因为源区植被分布广泛，仅高寒草原和高寒草甸两种植被类型就占源区总面积的 70%以上。

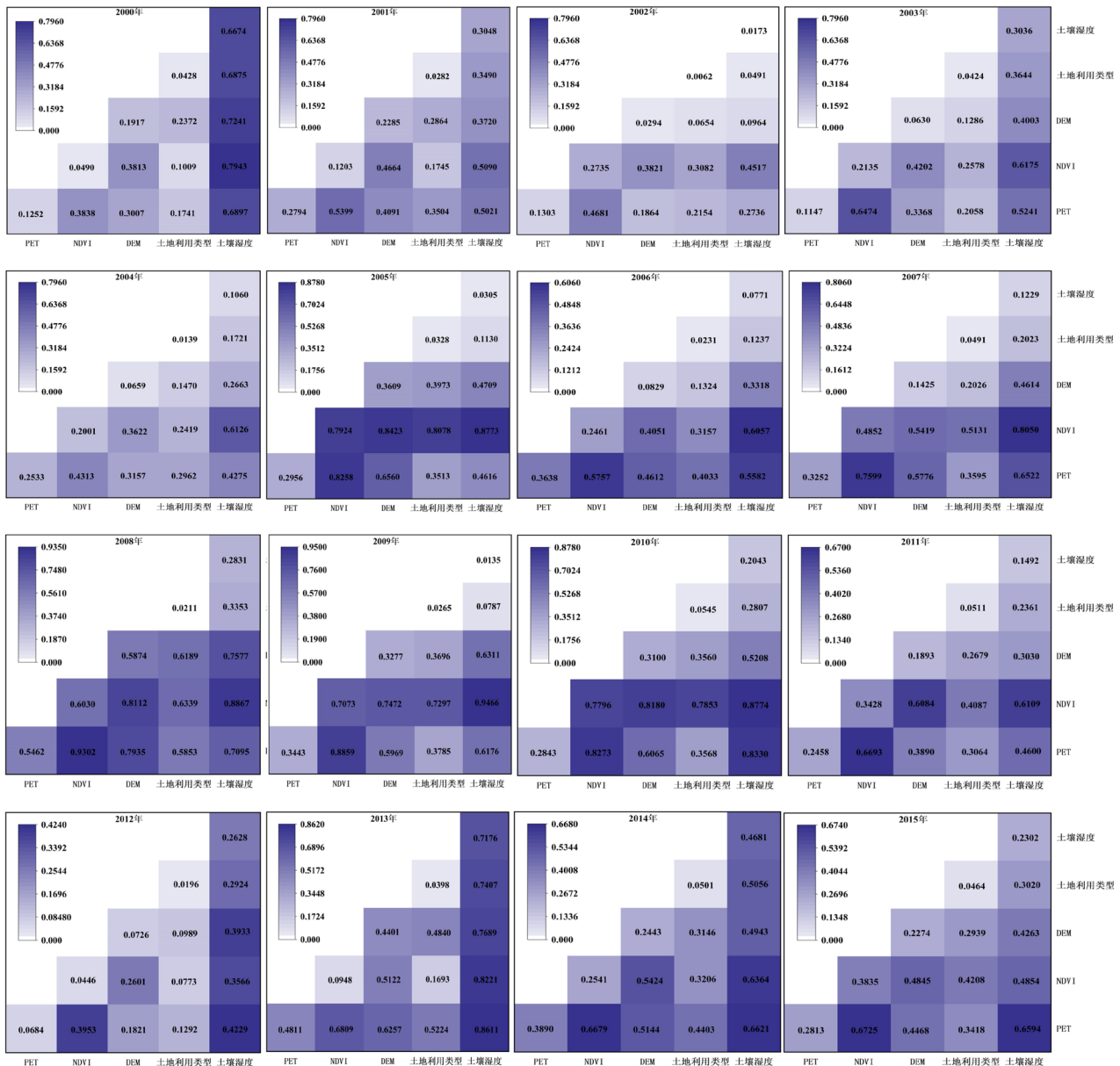


Figure 3. Detection results of two-factor interaction affecting SPEI changes in the study area
图 3. 影响研究区 SPEI 变化的双因子交互作用探测结果

4.4. 生态探测结果分析

为了进一步研究交互作用结果中两种因子的作用机制是否有显著差异，本文运用地理探测器中的生态探测器对黄河源区 SPEI 的影响因子进行作用机制的差异分析，结果如图 4 所示。可以看到，在交互作用解释力最强的三组因子中，大多数因子之间是有显著差异的。在单因子探测时与其他年份有不同结果的 2005 年、2006 年和 2009 年，可以发现 NDVI 与其他的因子均呈显著差异，2012 年的土壤湿度与其他因子也均呈现显著的差异，这说明黄河源区对 SPEI 变化起主导作用的因子具有独特的作用机理，因此对 SPEI 变化有更强的解释力。这也进一步验证了双因子交互作用的结果不同于单因子探测的结果这一现象。

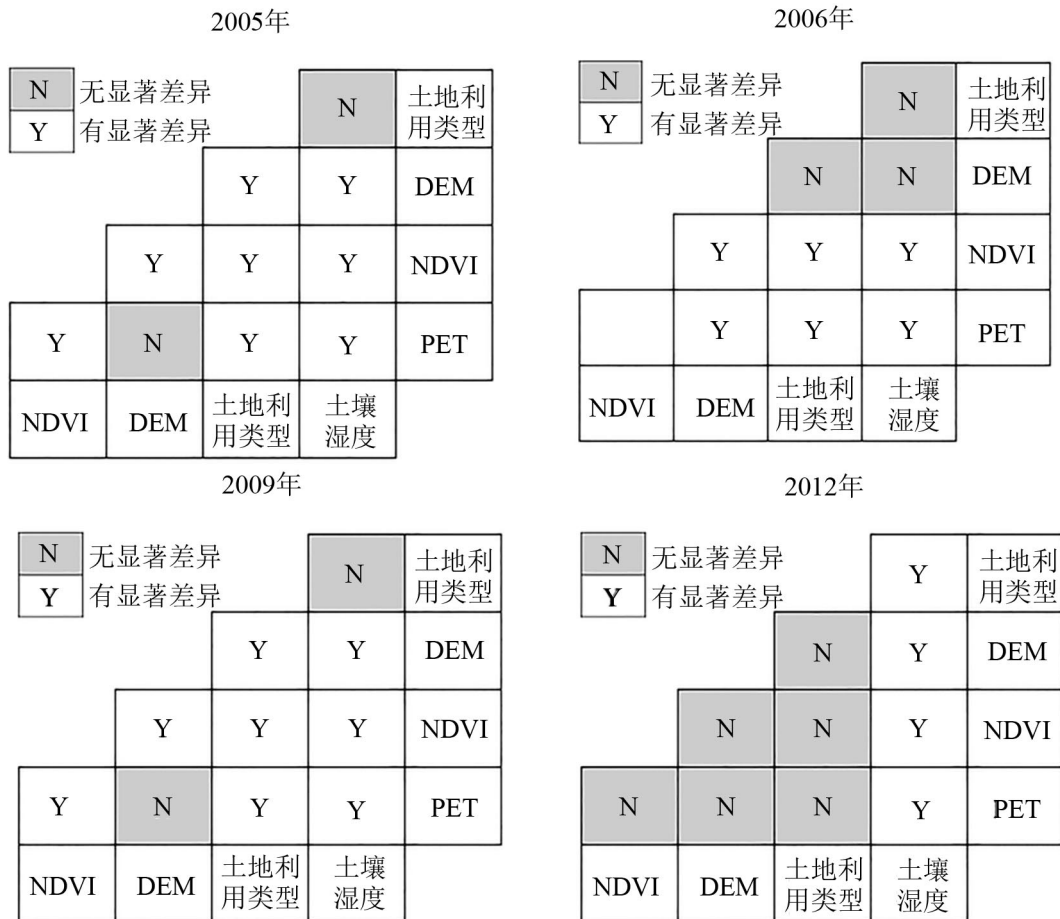


Figure 4. Ecological detection results in the study area
图 4. 研究区生态探测结果

4.5. 讨论

1) NDVI 和土壤湿度对研究区 SPEI 变化的影响。在本项研究中 SPEI 高值出现在 2005、2009 和 2012 年。低值出现在 2002、2007 和 2011 年。NDVI 高值出现在 2006、2010 和 2013 年，低值出现在 2004、2007 和 2012 年。土壤湿度高值出现在 2005、2009 和 2012 年，低值出现在 2002、2008 和 2010 年。可以看到 SPEI、NDVI 和土壤湿度的高值和低值出现年份相近。在张艳芳等[12]的文章中通过研究源区气候变化与植被生长状态的相互关系，证明了黄河源区 SPEI 干旱指数与 NDVI 植被指数具有较一致的变化趋势，并且指出它们之间存在着一定的相关关系。在王春敏[20]的文章中，对土壤湿度与 NDVI 的趋势进行了对比，结果发现两者的变化情况一致，

均影响着植被发育。这也进一步验证了本文的结果。本文仅基于地理探测器结果分析 NDVI、土壤湿度等因子对 SPEI 变化的影响程度,在以后的研究中要对 SPEI 变化机理进一步展开研究。

2) 黄河源区是我国重要的生态屏障,但同时又极易受到外界各种因素的干扰和破坏,生态环境很脆弱[21]。近年来我国实施的各种生态保护与建设工程取得了成效,尤其是 2000 年以来,黄土高原植树造林工程、退耕还林还草工程取得了巨大的成就。在 2000~2008 年期间,黄土高原的植被覆盖度增加了 11.5% [22]。植被正在逐渐的好转, SPEI 序列也呈现出缓慢上升的趋势。但与此同时,大规模的植被恢复导致部分地区出现土地资源不足的现象。所以未来的发展过程中,执行植树造林政策的同时,也要科学的实施其他工程以解决土地资源不足的问题。在未来的研究中,也应该加大对黄河源区植被变化的研究,更好的理解 NDVI 及土壤湿度对 SPEI 变化的影响,为源区生态环境保护以及气候变化状况提供理论依据。

5. 结论

为了研究黄河源区 SPEI 变化及其影响因子,本文根据黄河源区 2000~2015 年 SPEI 序列,利用 Mann-Kendall 检验法和空间分布分析简单说明了黄河源区域 2000~2015 年的干旱分布情况。并利用地理探测器来研究黄河源区 SPEI 与各种因子的互馈关系。结论如下:

1) 整体上,黄河源区在 2000~2015 年期间, SPEI 序列呈现上升趋势,虽然上升趋势不显著,但源区的干旱状况在逐步改善,呈现出轻微湿润的状态。

2) 在空间上来看,整个黄河源区的干旱情况由东部到西部有所缓和。其中黄河源区中部地区和东南部地区的干旱情况较为严重,而黄河源区西部地区的干旱情况稍有好转。

3) 在分异及因子探测结果中,对 SPEI 变化影响程度最大的因素为 NDVI 和土壤湿度,最小的因素为土地利用类型。

4) 在交互作用探测结果中,双因子间的交互作用均为增强,这说明两因子共同作用时比单因子作用的解释力要强。

5) 在生态探测结果中,解释力最强的三组因子中,大多数因子之间是有显著差异的。这说明黄河源区对 SPEI 变化起主导作用的因子具有独特的作用机理,因此对 SPEI 变化有更强的解释力。这也进一步验证了双因子交互作用的结果不同于单因子探测的结果这一现象。

基金项目

“一带一路”水与可持续发展(2019491411)。

参考文献

- [1] 夏敏. 淮河流域气象干旱时空演变特征及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽师范大学, 2020.
XIA Min. Spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and cause in Huai River basin. Master's Thesis, Wuhu: Anhui Normal University, 2020. (in Chinese)
- [2] 沈雯. 伊利诺伊河流域未来水文干旱预测与演变分析[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2020.
SHEN Wen. Analysis of predicting and evaluating for future hydrologic drought in the Illinois river basin. Master's Thesis, Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 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(10): 65-69.
ZHANG Jun, CHEN Guiya and YANG Wenfa. Summary of advancement of drought study at home and abroad. Yangtze River, 2011, 42(10): 65-69. (in Chinese)
- [4] 王作亮, 文军, 李振朝, 韩博, 刘蓉, 王欣. 典型干旱指数在黄河源区的适宜性评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 186-195.
WANG Zuoliang, WEN Jun, LI Zhenchao, HAN Bo, LIU Rong and WANG Xin. Evaluation of suitability using typical drought index in source region of the Yellow River. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,

- 35(21): 186-195. (in Chinese)
- [5] 任怡, 王义民, 畅建霞, 郭爱军. 基于模糊综合干旱指数的黄河源区作物生长季干旱时空分布分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(5): 668-677.
REN Yi, WANG Yimin, CHANG Jianxia and GUO Aijun. Drought temporospatial distributions of crop growth season in source region of Yellow River based on fuzzy comprehensive drought index. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(5): 668-677. (in Chinese)
- [6] 马蒙蒙. 近 60 年山东省干旱时空分布特征分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2020.
MA Mengmeng. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in Shandong Province in the past 60 years. Master's Thesis, Jinan: University of Jinan, 2020. (in Chinese)
- [7] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于 SPEI 指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 331-340.
ZHANG Leyuan, WANG Yi and CHEN Yaning. Spatial and temporal distribution characteristics of drought in central Asia based on SPEI index. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 331-340. (in Chinese)
- [8] 刘宇, 李雯晴, 刘招, 余玉聪, 尤烽骅, 杨舟. 基于 SPEI 渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 109-117.
LIU Yu, LI Wenqing, LIU Zhao, YU Yucong, YOU Fenghua and YANG Zhou. Spatial and temporal evolution characteristics of the drought in Weibei Loess Tableland area based on SPEI. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 109-117. (in Chinese)
- [9] 郭梦, 张奇莹, 钱会, 徐盼盼, 陈垚. 基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 127-132+138.
GUO Meng, ZHANG Qiying, QIAN Hui, XU Panpan and CHEN Yao. Analysis on the drought temporal-spatial distribution characteristics of Shaanxi Province based on SPEI. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 127-132+138. (in Chinese)
- [10] 马莲, 卢素锦, 司剑华, 谷鑫鑫, 黄丽娜, 祁玥, 马生丽, 李树森, 赵梓祺, 桂子菊, 李红梅. 黄河源区 1961~2017 降水序列趋势及突变识别[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(6): 842-851.
MA Lian, LU Sujin, SI Jianhua, GU Xinxin, HUANG Lina, QI Yue, MA Shengli, LI Shusen, ZHAO Ziqi, GUI Ziju and LI Hongmei. Trend and mutation Identification of precipitation sequence in the source region of the Yellow River. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(6): 842-851. (in Chinese)
- [11] 张献志, 汪向兰, 王春青, 刘吉峰. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 22-26.
ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing and LIU Jifeng. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River. Yellow River, 2020, 42(11): 22-26. (in Chinese)
- [12] 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 王姝. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 142-150.
ZHANG Yanfang, WU Chunling, ZHANG Hongyun and WANG Shu. Dependency relationship between NDVI and SPEI for spatial-temporal variations in the source areas of the Yellow River. Mountain Research, 2017, 35(2): 142-150. (in Chinese)
- [13] 杨玲莉. 黄河源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(11): 1-6.
YANG Lingli. Spatio-temporal change characteristics of vegetation NDVI and its response to climate change in the source region of the Yellow River. Rural Economy and Science, 2020, 31(11): 1-6. (in Chinese)
- [14] 张璐, 朱仲元, 王慧敏, 王飞. 锡林河流域水文干旱演变特征及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 178-184+192.
ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, WANG Huimin and WANG Fei. Analysis of hydrological drought evolution characteristics and influencing factors in Xilin River basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 178-184+192. (in Chinese)
- [15] 张璐, 朱仲元, 席小康, 王慧敏, 王飞. 基于 SPEI 的锡林河流域干旱演化特征分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 819-829.
ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, XI Xiaokang, WANG Huimin and WANG Fei. Analysis of drought evolution in the Xilin River basin based on standardized precipitation evapotranspiration index. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 819-829. (in Chinese)
- [16] 管晓祥, 金君良, 黄爱明, 詹慧婕, 王国庆, 刘翠善. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. 水利水电工程学报, 2019(5): 36-43.
GUAN Xiaoxiang, JIN Junliang, HUANG Aiming, ZHAN Huijie, WANG Guoqing and LIU Cuishan. Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 36-43. (in Chinese)
- [17] 王亚迪. 变化环境下黄河源区水文气象要素特征分析及径流变化驱动研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2020.
WANG Yadi. Analysis of hydro-meteorological elements and driving factors of runoff in the source region of Yellow River under the changing environment. Master's Thesis, Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 陈瑜, 刘锐, 潮洛濛. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响[J/OL]. 生态学报, 2021(12): 1-13.

- CHEN Kuan, YANG Chenchen, BAI Liga, CHEN Yu, LIU Rui and CHAO Luomeng. Effects of natural and human factor on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2021(12): 1-13. (in Chinese)
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [20] 王春敏. 基于 NDVI 的三江源植被变化及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
WANG Chunmin. Analysis of vegetation changes and its influential factors in the Three-River head water region based on NDVI. Master's Thesis, Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [21] 覃巧婷, 陈建军, 杨艳萍, 赵晓宇, 周国清, 尤号田, 韩小文. 黄河源区植被时空变化及其对地形和气候的响应[J/OL]. *中国环境科学*, 1-11. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210324.005>, 2021-05-10.
QIN Qiaoting, CHEN Jianjun, YANG Yanping, ZHAO Xiaoyu, ZHOU Guoqing, YOU Haotian and HAN Xiaowen. Spatial and temporal variations of vegetation and its response to topography and climate in the source region of the Yellow River. *China Environmental Science*, 1-11. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210324.005>, 2021-05-10. (in Chinese)
- [22] 李相儒, 金钊, 张信宝, 周卫健. 黄土高原近 60 年生态治理分析及未来发展建议[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(4): 248-254.
LI Xiangru, JIN Zhao, ZHANG Xinbao and ZHOU Weijian. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(4): 248-254. (in Chinese)