

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.06.005

三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应

肖祖香^{1,2}, 朱 双^{1,2}, 罗显刚^{1,2}, 娄连惠³, 李 江⁴, 罗顺根⁵, 操 丽⁵

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 国家地理信息系统工程技术研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
4. 湖北省自然资源厅信息中心, 湖北 武汉 430071; 5. 武汉中地云申科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 采用标准化降水指数 SPI 和遥感植被指数(NDVI、EVI)量化 1961—2018 年三江源区的生长季植被和水文干旱的演化特性, 基于 Mann-Kendall 趋势检验法分析了三江源区 1961—2018 年干旱与植被的时空演变趋势, 并基于斯皮尔曼等级相关系数进行了不同干旱变量与植被指数的相关性分析。结果表明: 三江源区季度干旱事件发生于 1963 年、1966 年、1984 年、1992 年、2000 年和 2017 年; 春季有显著湿润化现象(平均趋势特征值 $Z=2.28$), 秋季澜沧江源和长江源中部有不显著干旱威胁; 5 月黄河源以北地区有显著植被增加趋势, 9 月长江源中部与澜沧江源有不显著植被退化趋势, 2000—2018 年植被变化趋势是北部强于南部、西部强于东部; 21 世纪以来, 干旱事件与植被有一定的响应关系, SPI3 与植被指数显著正相关。

关键词: 水文干旱; SPI; 植被指数; Mann-Kendall 趋势检验; 三江源区

中图分类号: P461+.7, N34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)06-0515-06

Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region

XIAO Zuxiang^{1,2}, ZHU Shuang^{1,2}, LUO Xiangang^{1,2}, LOU Lianhui³,
LI Jiang⁴, LUO Shungen⁵, CAO Li⁵

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. National Geographic Information System Engineering Technology Research Center, Wuhan 430074, China;
3. Institute of Geological Environment Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China;
4. Information Center, Department Natural Resources of Hubei Province, Wuhan 430071, China;
5. Wuhan Zhongdi Yunshen Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: The standardized precipitation index SPI and remote sensing vegetation index (NDVI, EVI) were used to quantify the evolution characteristics of growing season vegetation and hydrological drought in the Three River Source Region (TRSR) from 1961 to 2018. The spatio-temporal evolution trends of drought and vegetation in the Three River Source Region from 1961 to 2018 were analyzed based on the Mann-Kendall trend test. In addition, the spatio-temporal evolution trend of vegetation, and the correlation between different drought variables and vegetation index was analyzed based on the Spearman's level correlation coefficient. The results show that the seasonal drought events in the study area occurred in 1963, 1966, 1984, 1992, 2000 and 2017, there was significant humidification in spring (mean trend characteristic value $Z=2.28$), and both the source of Lancang River and the middle of the source of Yangtze River in autumn faced a non-significant drought threat. In May, there was a significant increase of vegetation in northern of the Yellow River source, while there was an insignificant trend of vegetation degradation in the middle of Yangtze River source and Lancang River source in September. The variation trend of vegetation is that the north is stronger than the south and the west is stronger than the east from 2000 to 2018. Since the 21st century, drought events have a certain response relationship with vegetation, and SPI3 has a significant positive correlation with the vegetation index.

Key words: hydrological drought; SPI; vegetation index; Mann-Kendall trend test; Three-River-Source Region

基金项目: 国家自然科学基金(51809242)

作者简介: 肖祖香(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事气象地质灾害预警预测研究。E-mail: giserxzx@cug.edu.cn

通信作者: 娄连惠, 副研究员。E-mail: lyh726@126.com

引用本文: 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520.
XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520.

干旱事件是一种高频的自然灾害,具有最广泛的社会、经济和生态影响^[1-2]。研究地区干旱演变特性对了解区域气候变化,指导未来水资源规划和利用具有重要意义^[3-4]。McKee 等^[5]提出的标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)被广泛应用于评估不同时间尺度的气象干旱事件, Sobral 等^[6]认为 SPI 在干旱时空特征研究中有非常好的作用。Wang 等^[7]采用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)来研究植被与干旱的关系。增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)是对 NDVI 的改进指数,减弱了大气和土壤噪音对植被的影响,反应植被情况更具稳定性。自 20 世纪 90 年代以来,三江源区气候呈暖湿现象,长江流域湿地面积呈整体上升趋势,黄河流域和澜沧江流域呈下降趋势^[8]。三江源区的植被变化、气候变化和生态保护是重点研究方向, Wang 等^[9]研究发现草地退化比较明显的地区为黄河源区。目前大部分研究是针对 2010 年前后的地区干旱与植被演变,对三江源区的多尺度干旱演变与植被变化研究还很少^[10]。

本文采用 SPI 和遥感植被指数(NDVI、EVI)量化 1961—2018 年三江源区的生长季植被和水文干旱的演化特性,基于 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法分析 1961—2018 年三江源区多尺度干旱的时空特征和变化趋势以及 2000—2018 年植被时空演变趋势,并探讨了三江源区的植被状态与干旱事件的联系,可为后期探究三江源区的植被-干旱的响应关系提供参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

三江源区位于中国青海省南部,地理位置在 31°39′~36°12′N、89°45′~102°23′E 之间,是长江、黄河和澜沧江的发源地,也是青藏高原的腹地(图 1),面积约 30 万 km²,占青海省总面积的 43%,地势高耸、气候寒冷,年平均气温在-5.4~4.2℃之间,年降水量由东南部的 770 mm 向西北逐渐递减至 260 mm,气候条件具有明显的区域分异特征。三江源区中黄河、长江和澜沧江年平均径流量分别为 201 亿 m³、124 亿 m³和 150 亿 m³^[11],年蒸发量为 730~1 700 mm,超过 80% 的降水量发生在 5—10 月^[12]。由图 1(b)可知 2015 年该地区的土地利用类型主要为林地和草地。

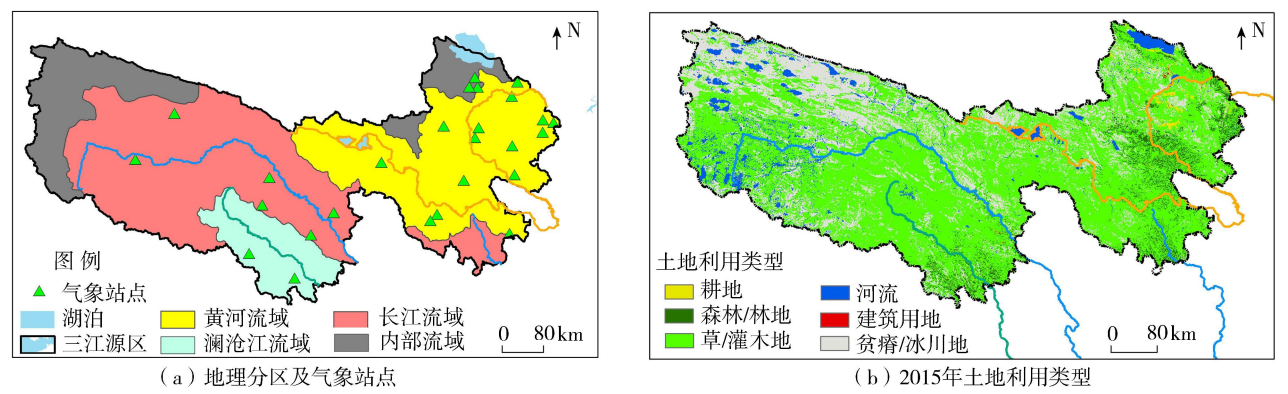


图 1 三江源区的气象站点以及土地利用类型

Fig.1 Geographic location, meteorological stations and land-use type of the TRSR region

1.2 数据来源与处理

三江源区数字高程模型(DEM)来自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>),在 ArcGIS 中以三江源区边界来裁剪和镶嵌得到研究区的 DEM。青藏高原土地利用覆盖数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),通过裁剪和重分类得到三江源区的土地利用类型。

遥感卫星数据 MOD13Q1 来自美国国家航空航天局(NASA)EOS / MODIS 数据产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),空间分辨率为 250 m × 250 m,时间分辨率为 16 d。MOD13Q1 植被指数产品(NDVI 和 EVI)用水、云、重气溶胶等处理,以确保数据质量,这两种产品有效地表征了全球植被状态和过程。为了消除异常值的影响,采用最大合成法(MVC)合成月度 NDVI 数据,将月度 NDVI 数据合成为最大年 NDVI 影像^[13]。

1961—2018 年月降水量数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),其中 1961—2016 年数据来自中国 0.5° × 0.5° 网格数据集(V2.0)产品,三江源区共有 150 个格点数据集。数据

经过交叉验证,错误分析,质量状况良好;2017—2018 年数据来自中国地面气候资料月值数据集。由研究区 20 个气象站点的地面月降水量数据,采取最优 Kriging 插值方法重采样 2017—2018 年 150 个格点的月降水量数据,得到 1961—2018 年的三江源区月降水数据。本文依据气象站点位置以及区域分布特点选取了 40 个格点数据进行研究。

2 研究方法

2.1 SPI

SPI 是常用的多时间尺度气象干旱指数^[5],它可以计算多个时间尺度^[14]。根据 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》的定义,SPI 是表征某时段降水量出现概率的指标,适用于月尺度以上的干旱监测与评估。该指数假设降水量服从 I 分布,考虑了降水服从偏态分布的实际,然后进行正态标准化处理,使得同一个干旱指数可以反映不同时间尺度和不同类型的水资源状况。一般当 SPI 值小于 0 且连续观察到该值小于等于 -1 时,定义为发生干旱事件^[15]。SPI1 通常用来反映短期地表水分异常变化,SPI3 可反映干旱的季节变化。表 1 为中国的干旱分类标准^[16]。SPI 的详细介绍和计算机程序可在国家干旱减灾中心网站(<https://drought.unl.edu/>)上获得。

2.2 植被指数

NDVI 是目前应用最广泛的植被指数,可以反映植被的覆盖度、植被的基本生长状态等。EVI 是增强型植被指数,相对于 NDVI 在大气噪声、土壤背景、饱和度等问题上有所改进^[17]。本文根据三江源区植被生长的实际情况,确定干旱对植被生长状况的影响主要表现在植被生长季(5—9 月),提取每年 5—9 月的 NDVI 和 EVI 数据进行植被时空演变分析。

2.3 M-K 趋势检验法

M-K 非参数检验法常用于评估降水、径流、气温等数据时间序列的趋势变化,它的优点在于样本不需要遵循某一特定的分布,而且很少受到异常值的干扰,且计算简便^[18]。该方法以标准正态分布变量 Z 表示长时间序列 SPI 和植被指数的变化趋势, $Z>0$ 表示序列有上升趋势, $Z<0$ 表示序列有下降趋势。考虑到正态分布的对称性, Z 的绝对值在大于 1.28、1.64、2.32 时,分别表示通过了显著性水平 α 为 0.1、0.05 和 0.01 的显著性检验。本文利用 MATLAB 软件,编写 M-K 趋势分析的循环计算程序,得到所有格点的 Z 值。

2.4 斯皮尔曼等级相关系数

斯皮尔曼等级相关(Spearman rank correlation)在统计学中用于评估两个变量之间的相关性^[19],变量间的相关性可以使用单调函数来描述^[20]。当变量 x 增大时,变量 y 也趋向于增大,则相关系数 $\rho>0$;当 x 增大时, y 趋向于减小,则 $\rho<0$;当 x 增大时 y 没有任何趋向性,则 $\rho=0$ 。斯皮尔曼方法估计的相关系数更合理且误差更小,较之其他如 Kendall 方法更具优势^[21]。

3 结果与分析

3.1 干旱时空特征

利用三江源区的植被生长季(5—9 月)的 SPI1 来表示生长季月度干旱,春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)的 SPI3 极小值来表示四季干旱。

3.1.1 SPI 时间演变

图 2 为 1961—2018 年三江源区的长时间序列的干旱特

表 1 基于 SPI 指数的干旱等级划分

Table 1 Classification of drought levels based on SPI

等级	干旱类型	SPI
I	无旱	> -0.50
II	轻度干旱	$(-1.0, -0.5]$
III	中度干旱	$(-1.5, -1.0]$
IV	严重干旱	$(-2.0, -1.5]$
V	极端干旱	≤ -2.00

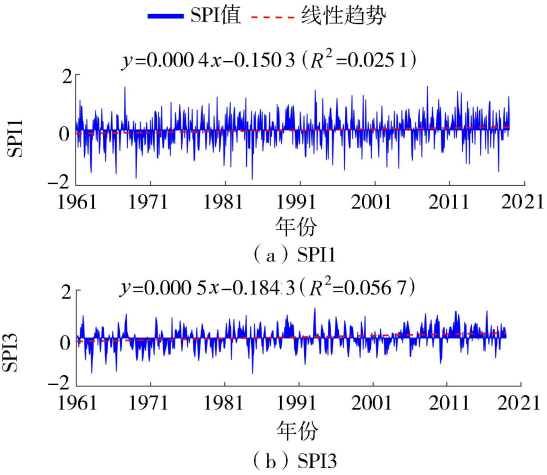


图 2 1961—2018 年 SPI1 和 SPI3 时间序列
Fig. 2 Time series of SPI1 and SPI3 from 1961 to 2018

征 SPI 值(5—9 月),SPI1 和 SPI3 线性拟合斜率分别为 0.004 和 0.005,说明在此期间三江源区逐渐变得湿润。月度严重干旱事件(SPI1)发生在 1963 年、1966 年、1969 年、1984 年、1997 年和 2017 年,季节性中度干旱事件(SPI3)发生在 1963 年、1966 年、1984 年、1992 年、2000 年和 2017 年。

3.1.2 SPI 趋势空间分布

图 3 为 1961—2018 年 SPI 在月度与季度的 M-K 趋势检验值 Z 的空间分布。5 月、9 月、春、夏、秋和冬季平均趋势特征值 Z 分别为 1.64、0.63、2.28、1.58、0.65 和 1.03,其中 SPI 上升趋势占比分别为 92.68%、70.00%、97.50%、90.00%、57.50% 和 82.50%。可知三江源区呈月度湿润化趋势,5 月在长江西北部有显著湿润化趋势,但 9 月在长江与黄河南部出现不显著的干旱化趋势($Z<0$)。三江源区的季节性 SPI 有上升趋势,不同流域差异大。春季平均 $Z=2.28$ 且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,表示 1961—2018 年三江源区春季有显著的湿润化趋势。

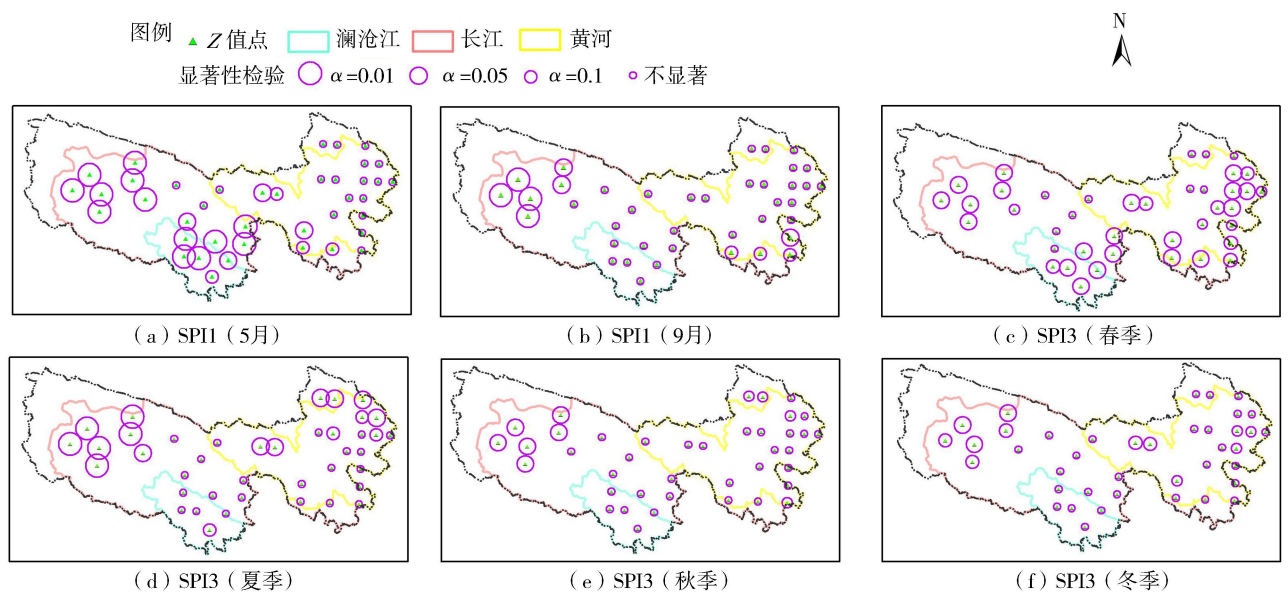


图 3 1961—2018 年 SPI 的 M-K 趋势检验的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of M-K trend test value Z of SPI from 1961 to 2018

3.2 植被时空特征

图 4 是每年植被生长季的 NDVI 和 EVI 像元最大合成值(年最大值(5—9 月)、5 月和 9 月的值(共计 19 年)),得到三江源区的植被时间变化特征。由图 4 可知 NDVI 值大于 EVI 值。植被指数在 5 月的突变点发生在 2001 年和 2017 年,年际的突变点发生在 2011 年,9 月的突变点发生在 2002 年和 2013 年。2010 年以来,年际植被指数表现出植被先增后减再增现象。通过相关性分析得到两个指数呈高度正相关性(相关系数大于 0.9,通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验)。

图 5 为 2000—2018 年期间植被指数在 5 月、9 月和年际的 M-K 趋势检验值 Z 的空间分布。5 月、9 月、年际的 NDVI 平均 Z 值分别为 1.54、0.82 和 1.36,NDVI 显著上升趋势的占比分别为 50%、72.5% 和 55%;EVI 的平均 Z 值分别为 1.44、0.48 和 1.01,显著上升趋势的占比分别为 52.5%、70% 和 65%。5 月和年际的植被指数显示,黄河以北地区有显著的植被增加趋势;9 月植被指数和年际植被指数显示,长江中部与澜沧江植被有不显著的下降趋势。2000—2018 年三江源区植被变化趋势为北部强于南部、西部强于东部,该地区大部分区域植被状况有好转。

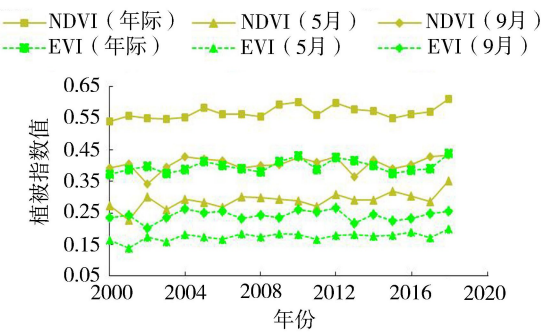


图 4 植被指数的时间变化

Fig.4 Time evolution of vegetation index (NDVI/EVI)

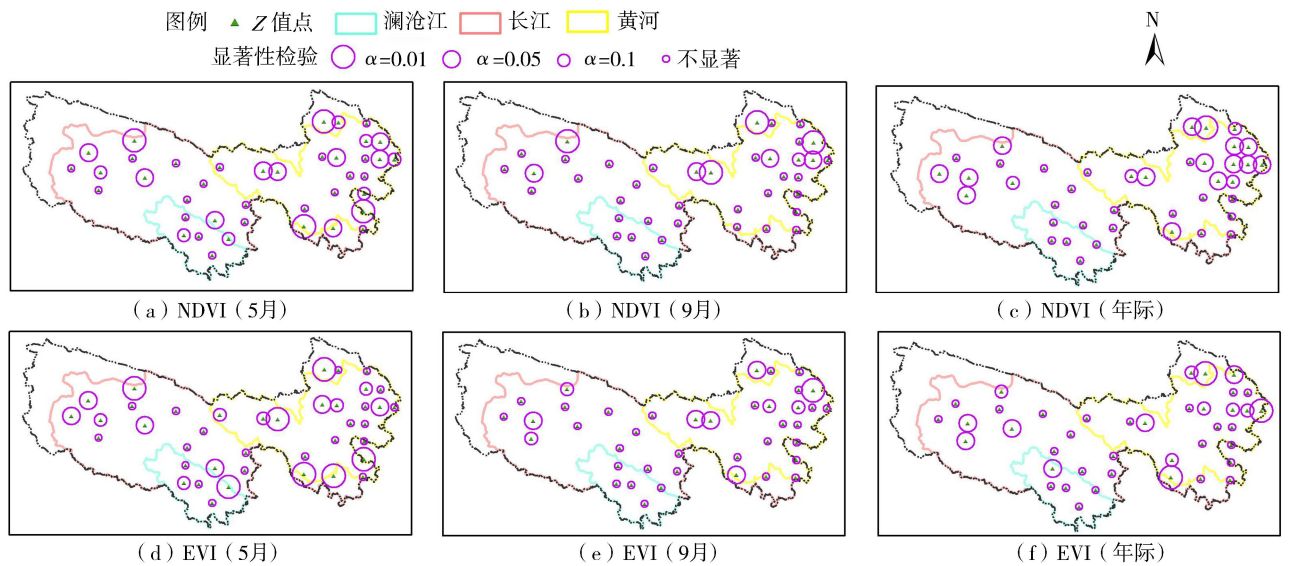


图 5 2000—2018 年植被指数 M-K 趋势检验值 Z 的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of trend test value Z of vegetation index from 2000 to 2018

3.3 相关性分析

表 2 为研究区不同 SPI 与不同植被指数的斯皮尔曼等级相关系数 ρ 及其显著性水 α (表中 NDVI5、EVI5、NDVI9 和 EVI9 分别为 5 月和 9 月的植被指数,NDVI_{max} 和 EVI_{max} 为 5—9 月植被指数的最大值。

由表 2 可知 5—9 月 SPI3 的平均值与 NDVI5、EVI5 和 NDVI_{max} 均有显著正相关性, NDVI_{max} 的相关系数最大($\rho=0.584$),其次是 EVI5 和 NDVI5;整体来看 5—9 月 SPI3 的平均值与植被指数呈正相关关系,且 NDVI 的相关系数明显大于 EVI。由表 2 可知 5—9 月 SPI3 的极小值与 NDVI5、EVI5 显著正相关, NDVI5 的相关系数最大($\rho=0.525$),其次是 EVI5;整体来看 5—9 月 SPI3 的极小值与植被指数呈正相关关系,且 NDVI 的相关系数略大于 EVI。综上可知,三江源区的 SPI3 与植被指数有显著的正相关性且与 NDVI 的相关性更高。

表 2 不同 SPI 与不同植被指数的斯皮尔曼相关系数

Table 2 Spearman correlation coefficients of different SPI and vegetation indexes

植被指数	5—9 月 SPI3 的平均值		5—9 月 SPI3 的极小值	
	ρ	α	ρ	α
NDVI5	0.535	0.018	0.525	0.021
NDVI9	0.209	0.391	0.263	0.276
EVI5	0.577	0.01	0.511	0.026
EVI9	0.168	0.491	0.346	0.147
NDVI _{max}	0.584	0.009	0.398	0.091
EVI _{max}	0.447	0.055	0.344	0.149

4 讨 论

对于长时间的植被^[1]检测,通常可以使用卫星遥感数据源。NDVI 与植被变化之间有很好的关系,EVI 则有空间相对较高、大面积的近实时数据、分辨率高的优点,已经在植被状况监测方面得到广泛地使用^[22]。Ji 等^[23]研究表明 SPI3 与 NDVI 的相关性最高,Haro-Monteagudo 等^[24]提到 3 个月时间尺度的干旱指标与植被变化的相关性最高,这些结论与本文结果一致,表明植被变化与干旱事件之间有一定的联系和互相影响^[25]。本文发现三江源区西北部和东北部大部分地区的植被呈显著增加趋势,这与该地区的干旱变化趋势一致。植被增加区域主要分布在长江源西北部,其中澜沧江源北部和黄河源西部某些区域有植被退化迹象,这与钱拴等^[26]的研究结论一致。本文研究发现 21 世纪以来,三江源区整体呈湿润化趋势,但同时监测到 2017 年存在月度和季度干旱事件,以及黄河源西南部地区也在一定的植被度减少趋势。这也推动着我们今后探究不同时间尺度干旱特征变量以及其他气象因素对植被的影响,探讨更有效的方法来量化和解释该地区植被—干旱的响应关系。

5 结 论

a. 1961—2018 年不同时间尺度的 SPI 均体现三江源区在逐渐变得湿润,时间尺度越大,干湿交替周期

越长。21 世纪以来,三江源区干旱事件出现在 2002 年、2006 年、2012 年、2015 年和 2017 年,秋冬季节发生干旱的频率更高,其次是春季。

b. 长江源西北地区有显著湿润化趋势,长江源与黄河源南部在秋冬季节有不显著的干旱化威胁,春季有显著的湿润化趋势,整体呈湿润化趋势。

c. 三江源区的植被在 21 世纪以来有所增加,在 2002 年和 2013 年增加量出现减少现象;NDVI 与 EVI 在三江源区有明显增加的趋势,空间上变化趋势是北部强于南部、西部强于东部。

d. 三江源区的 SPI3 与植被指数均呈正相关关系:5—9 月 SPI3 的平均值与 $NDVI_{max}$ 有最显著的正相关性,5—9 月 SPI3 的极小值与 $NDVI5$ 、 $EVI5$ 有显著正相关性。

参考文献:

[1] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 8-13. (in Chinese))

[2] 马明卫,韩宇平,严登华,等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese))

[3] 崔晨韵,朱永华,吕海深,等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Evaluation of water-related ecological environment carrying capacity in Changxing County[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 406-412. (in Chinese))

[4] 徐冉,铁强,代超,等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):288-293. (XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, et al. Hydrological processes in the basin above the Yarlung Zangbo River Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(4): 288-293. (in Chinese))

[5] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. 1993, 17(22): 179-183.

[6] SOBRAL B S, DE OLIVEIRA-JNIOR J F, DE GOIS G, et al. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO[J]. Atmospheric Research, 2019, 220: 141-154.

[7] WANG Jing, WANG Kelin, ZHANG Mingyang, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China[J]. Ecological Engineering, 2015, 81: 451-461.

[8] 彭少明,黄强,张新海,等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(2):153-158. (PENG Shaoming, HUANG Qiang, ZHANG Xinhai, et al. Research on multi-objective planning model for sustainable utilization of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(2): 153-158. (in Chinese))

[9] WANG Genxu, CHENG Guodong. Characteristics of grassland and ecological changes of vegetations in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 101-107.

[10] 赵志平,关潇,李果,等. 近 45 年来青海三江源区干湿变化的趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2017(4):148-153. (ZHAO Zhiping, GUAN Xiao, LI Guo, et al. Trend analysis of dry and wet changes in the source region of the Three Rivers in Qinghai in the past 45 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017(4): 148-153. (in Chinese))

[11] 张士锋,华东,孟秀敬,等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. 地理学报,2011,66(1):13-24. (ZHANG Shifeng, HUA Dong, MENG Xiujing, et al. Climate change in the source of the Three Rivers and its driving analysis on runoff[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 66(1): 13-24. (in Chinese))

[12] LIANG Liqiao, LI Lijuan, LIU Changming, et al. Climate change in the Tibetan plateau three rivers source region: 1960-2009[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(13): 2900-2916.

[13] LIU Xiaofeng, ZHANG Jinshui, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011[J]. 2014, 24(2): 288-302.

[14] WANG Dingbao, HEJAZI M, CAI Ximing, et al. Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois[J]. Water Resources Research, 2011, 47(9): 1995-2021.

[15] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of drought indices[J]. Environmental Reviews, 2011, 19(NA): 333-349.