

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180021

李镇, 齐菲, 尚国珩, 等. 滹沱河流域植被覆盖时空演变及其与 SPEI 的相关关系[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 135-143. LI Z, QI F, SHANG G F, SUN L G, et al. Spatial-temporal change of vegetation cover and its relationship with SPEI in Hutuo river basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 135-143. (in Chinese)

滹沱河流域植被覆盖时空演变及其与 SPEI 的相关关系

李镇¹, 齐菲¹, 国珩¹, 孙雷刚², 夏玉杰¹

(1. 河北地质大学 土地资源与城乡规划学院, 石家庄 050031; 2. 河北省科学院 地理科学研究所, 石家庄 050081)

摘要: 选择 2001–2015 年 MODIS NDVI(250 m) 及 14 个气象站点气温、降水数据, 通过计算标准化降水蒸散指数 (SPEI), 探究滹沱河流域近 15 年植被覆盖时空演变特征, 分别从月、季节、年等尺度探究植被覆盖与 SPEI 的相关关系。结果显示: (1) 近 15 年滹沱河流域归一化植被指数 (NDVI) 呈显著增加趋势, 增速为 0.024/(10a)。(2) 植被恢复以明显改善为主, 覆盖范围占整个流域面积的 51.58%, 主要分布于流域中、上游。(3) 滹沱河流域 SPEI 总体上呈波动上升趋势, 干旱程度有所降低, 流域中游变湿趋势最显著。(4) 6 月、7 月是干旱条件对植被覆盖影响最显著的月份, 其中, 6 月气温对 NDVI 的影响大于降水, 而 7 月降水对 NDVI 的影响大于气温; 夏季干旱程度对植被覆盖度的影响最为明显; NDVI 年际变化与 SPEI 具有显著正相关关系, 干旱对植被生长状态有较大影响。

关键词: 中分辨率成像光谱仪-归一化植被指数; 时空演变; SPEI; 相关分析; 滹沱河流域
中图分类号: TP79; X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0135-09

Spatial-temporal change of vegetation cover and its relationship with SPEI in Hutuo river basin

LI Zhen¹, QI Fei¹, SHANG Guofei¹, SUN Leigang², XIA Yujie¹

(1. School of Land Resources and Urban and Rural Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;
2. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Spatial-temporal change of coverage is in favor of understanding the ecosystem response to climatic variability and human induced land transformations. The objective of this study was to analysis vegetation dynamics its relationship with drought in Hutuo river basin, based on 250 m MODIS NDVI time series data and monthly temperature and precipitation of 14 meteorological stations (2001-2015). The characteristics of drought were studied using the drought index (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI), and the monthly temperature and precipitation were used to compute the SPEI of 1, 3 and 12 month timescale. Results are shown as follows: (1) The NDVI of the study area was improvement progressively from 2001 to 2015, with a linear tendency being 0.024/(10a). (2) The largest proportion of the contribution to vegetation restoration was observed in the significantly improved area, and the area where the values of NDVI significantly increased accounts for reached 51.58% was mainly located in the upstream and midstream of Hutuo river basin. (3) The SPEI was fluctuating upward trend, which indicated that drought could be easing over the past 15 years in Hutuo river basin. And the trend was most marked in the midstream. (4) Correlation analysis results showed that the SPEI had a strong influence on vegetation coverage mainly occurred in June and July on the monthly, and temperature was the dominant factor affecting the change of vegetation in June, while precipitation was the dominant factor in July. Seasonally, drought in summer had more influence on vegetation coverage. There was a positive correlation between the annual NDVI and annual SPEI, and drought has a great influence on vegetation growth.

Key words: MODIS NDVI; Spatial-temporal change; SPEI; Correlation analysis; Hutuo river basin

收稿日期: 2017-09-29 修回日期: 2017-12-01 网络出版时间: 2018-01-08
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180104.1327.002.html>

基金项目: 河北省水利科研与推广计划项目(2016-71); 河北地质大学博士科研基金项目(BQ201605)

Funds: Water conservancy scientific research and promotion project of Hebei province(2016-71); Scientific Research Staring Foundation for doctor of Hebei GEO university(BQ201605)

作者简介: 李镇(1984), 男, 河北秦皇岛人, 讲师, 博士, 主要从事 GIS 与土壤侵蚀, 水土保持与生态修复方面研究。E-mail: lizhen_bj@163.com

通讯作者: 尚国珩(1964), 男, 河北唐山, 教授, 博士, 主要从事土地资源管理方面研究。E-mail: shangguofei@hgu.edu.cn

植被是生态系统物质循环和能量交换的枢纽^[1],不仅决定生态系统的形态结构,还能指示环境的变化,如植被破坏会导致生物多样性降低、土地退化、自然灾害加剧等生态环境问题^[2],因此,植被覆盖已是区域生态环境质量评价的重要指标。评估区域植被覆盖变化不仅对评价生态系统有重要意义,还对区域生态建设和保护具有重要的实践意义^[3-4]。干旱是所有气候因子作用于生态环境中的综合反映^[5],具有发生频率高、持续时间长和波及范围广的特点^[6]。干旱的发生会加剧水资源短缺,影响工农业生产及社会经济发展,恶化生态环境^[7],因此,量化干旱程度对植被的影响,对评估干旱农业生产的影响及协调生态系统的可持续发展具有重要的意义^[8]。

归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 能够指示植被密度与长势^[9],已成为评估植被覆盖状况的有效参数^[10]。连续的 NDVI 数据,能够特征化植被活动对环境变化的响应^[1]。MODIS NDVI 数据具有高空间分辨率、覆盖范围广及免费获取等特点^[11],能在较大时空尺度上反映植被覆盖信息^[4],已成为长时间序列植被覆盖监测重要数据源^[12-13]。NDVI 受气候因子及干旱程度等因素的影响^[14],因此,近年来国内外基于 NDVI 数据开展了大量关于植被时空演变与气候因子(主要为降水和温度)的关系的研究^[15],相比之下,探究植被对干旱指数响应的研究仍需深入研究。干旱指数有多种类型,如帕默尔干旱指标 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[15,16]、标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)^[16-17]、标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)^[18-20]。其中, SPEI 由 Vicente Serrano 提出^[21-22],考虑了降水及温度两个变量对干旱的共同作用,弥补了 SPI 仅依靠降水因子的不足,克服了 PDSI 在旱情界定上的主观性及区域适用上的局限性^[23]。SPEI 具有多时间尺度特性,且适用于不同的气候区,已被广泛应用于干旱时空特征监测,因此,利用 SPEI 指标量化干旱,能够克服探究植被对单独气候因响应时尺度单一且不全面问题^[19]。

滹沱河流域地貌形态复杂,主要包括基岩山区、山间盆地、黄土丘陵区及河谷冲积平原区等^[24-25],其中,流域山区是典型的生态敏感区,也是水土流失严重的地区。在气候变化和人类活动影响下,特别是“退耕还林工程”的实施,流域内植被覆盖状况发生了明显变化。基于 MSS 及 TM 数据反演的植被覆盖度显示,近年来滹沱河流域植被覆盖呈增加趋

势^[26]。但仅依靠特定时间段内有限的几个不连续数据,可能会疏漏植被覆盖年际变化的趋势特征。另外,流域尺度能有效细致地反映干旱对植被生长状况的影响^[9],亦有助于人类提升对气候波动对植被造成的脆弱性的认知^[21]。本文首次利用 SPEI 和 NDVI 探究滹沱河流域植被覆盖时空演变特征及其与气候变化的相互关系,从而全面反映该区域植被恢复状况。

本文以 2001-2015 年 250 m 分辨率的 MODIS/NDVI 为数据源,结合气温及降水等气象数据,采用一元线性回归、Mann-Kendall 检验、相关分析等方法,旨在探究滹沱河流域植被覆盖的时空演变特征及对干旱条件的响应,揭示生态建设工程取得的效果及干旱对植被生长的影响特征,以期为区域可持续发展、生态修复及环境保护提供决策依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

滹沱河发源于山西省繁峙县泰戏山下,经山西北部穿越太行山进入河北省境内,东流汇入子牙河。地理位置为 112° 13' - 115° 16' E, 37° 17' - 39° 28' N,流域面积为 2 47 万 km²。属温带大陆季风气候,受地形的影响,流域内降水、气温等气候条件差异明显,多年平均降水量在 382~818.9 mm 之间,年均气温在 4.0~13.3 °C^[15]。流域内海拔在 7~3 058 m 之间,主要包括山间盆地、山地、丘陵、平原等地貌类型。源头至山西五台县瑶池村为上游河段,属山间盆地地形;瑶池至黄壁庄水库段为中游河段,属太行山山地和丘陵地带;黄壁庄水库以下至河北献县为下游河段,属平原地带^[26],本文中的下游指黄壁庄水库至深泽段。土壤类型主要为褐土。流域内以五台山区植被最好,海拔从低到高呈现草原植被、灌丛植被、森林植被、草甸植被分布的垂直地带性^[27]。

1.2 数据来源

1.2.1 NDVI 数据

NDVI 数据来自于美国国家宇航局 (NASA) MODIS13Q1 产品 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>),空间分辨率为 250 m,时间覆盖为 2001 年 1 月到 2015 年 12 月,时间分辨率为 16 天,共 345 景。利用 MRT (MODIS Reprojection Tools) 软件,将原始数据转化为 Geotiff 格式,投影为 Albers 投影;采用最大值合成法 (Maximum Value Composite, MVC) 将月内两时相 NDVI 生成

各个月 NDVI 数据集,以减少云、大气等噪声的影响^[28],将每年 12 个月的月最大 NDVI 取平均值,表征当年植被生长状况^[29]。

1.2.2 气象数据

选用 2001–2015 年溱沔河流域及周边 14 个地面气象观测站的逐月降水量、平均气温等数据,资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),用于计算标准化降水蒸散指数(SPEI)。文中采用程序法计算 SPEI,其值越小越干旱,越大越湿润。原始程序从网址(<http://digital.csic.es/handle/10261/10002>)下载。本文基于 1 个月、3 个月和 12 个月时间尺度的 SPEI 值,分别从月、季节和年尺度,利用相关分析方法探讨研究区干旱程度对植被的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI 变化趋势分析及显著性检验

基于一元线性回归分析模拟每个栅格的变化趋势,表征特定时间段内区域空间格局演变^[4]。利用 ArcGIS 10.1 中的栅格计算器模拟 2001–2015 年溱沔河流域的 NDVI 变化趋势,计算公式为:

$$S_{NDVI} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n NDVI_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n NDVI_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中: S_{NDVI} 为变化趋势,若 $S_{NDVI} > 0$,表示 NDVI 呈增加趋势;反之,则表示 NDVI 呈下降趋势。 $NDVI_i$ 表示第 i 年 NDVI 的值, n 表示年跨度,本文取值为 15。

进一步,为了更好地评价该区域植被恢复状况,参照已有研究^[4,29],将 S_{NDVI} 划分为: $S_{NDVI} < -0.0009$ 、 $-0.0009 \leq S_{NDVI} < 0.0009$ 和 $S_{NDVI} \geq 0.0009$ 等 3 个等级,分别表示退化区域、不变区域和改善区域。同时采用 Mann-Kendall 统计检验法对 NDVI 变化趋势的显著性进行检验,本文采用在 0.05 置信水平上的显著性:即 $Z > 1.96$ 或 $Z < -1.96$ 时,为显著变化,当 $-1.96 \leq Z \leq 1.96$ 时,为变化不显著。将 S_{NDVI} 分级结果与 Mann-Kendall 统计检验的分级结果叠加,得到每个像元 NDVI 的趋势变化程度数据,最终确定趋势变化的 5 个等级(表 1)。

1.3.2 NDVI 变化的稳定性

采用标准差来研究 2001–2015 年溱沔河流域 NDVI 变化的稳定性。计算公式为:

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{ADVI})^2} \quad (2)$$

表 1 NDVI 变化趋势分级标准

Tab. 1 The classification standard for vegetation coverage changes

NDVI 趋势变化	Z 值	程度
$S_{NDVI} \geq 0.0009$	> 1.96	明显改善
$S_{NDVI} \geq 0.0009$	$[-1.96, 1.96]$	轻微改善
$[-0.0009, 0.0009]$	任意	稳定不变
$S_{NDVI} < -0.0009$	$[-1.96, 1.96]$	轻微退化
$S_{NDVI} < -0.0009$	< -1.96	严重退化

式中: S_D 为标准差,表征 NDVI 离散程度,值越大,表明研究时段内 NDVI 年际变化波动越大;表示 15 年 NDVI 均值。进一步利用 ArcGIS 10.1 中 Natural Breaks(Jenks)聚类分析,将标准差(S_D)分为五类:高($S_D \geq 0.0687$)、较高($0.0438 \leq S_D < 0.0687$)、中($0.0310 \leq S_D < 0.0438$)、较低($0.0215 \leq S_D < 0.0310$)和低($0 \leq S_D < 0.0215$),用来说明溱沔河流域 2001–2015 年 NDVI 变化的稳定性。

1.3.3 NDVI 与 SPEI 的相关性

本文分别基于月尺度、年尺度、季节尺度采用相关系数探究 NDVI 与 SPEI 之间的关系,计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为 x 、 y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年的 NDVI; y_i 为第 i 年的年平均 SPEI。

进一步采用偏相关系数分析了气温(降水)对 NDVI 的单独影响,计算公式为:

$$R_{z_1x \cdot z_2} = \frac{R_{z_1x} - R_{z_1z_2}R_{z_2x}}{\sqrt{(1 - R_{z_1z_2}^2)(1 - R_{z_2x}^2)}} \quad (4)$$

式中: $R_{z_1x \cdot z_2}$ 为消除温度(降水)影响后,降水(温度)与 NDVI 之间的偏相关系数; $R_{z_1z_2}$ 、 R_{z_1x} 、 R_{z_2x} 分别为降水与温度、降水与 NDVI、温度与 NDVI 之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时间变化特征

2001–2015 年溱沔河流域植被覆盖呈明显增加趋势,增速为 0.024/(10a)(图 1),2001–2015 年 NDVI 从 0.376 增长到 0.416,增长率为 10.64%。溱沔河流域植被恢复可以分为两个阶段,迅速增长阶段(2001–2008 年),增速为 0.0579/10a,该期间 NDVI 从 2001 年的 0.376 增长到 2008 年的 0.428,增长率为 13.83%;缓慢增长阶段(2009–2015 年),增速为 0.0206/(10a),但该阶段不存在明显的趋势

特征($P > 0.1$), NDVI 从 2009 年的 0.404 增长到 2015 年的 0.416, 增长率为 2.97%。与已有研究结果相比, 滹沱河流域 NDVI 增速接近 2000–2013 年华北地区的 NDVI 增速 ($0.02/(10a)$)^[9], 小于 1998–2011 年海河流域的 NDVI 增速 ($0.045/(10a)$)^[30], 亦远小于 2001–2014 年黄土高原的 NDVI 增速 ($0.0693/(10a)$)^[31]。

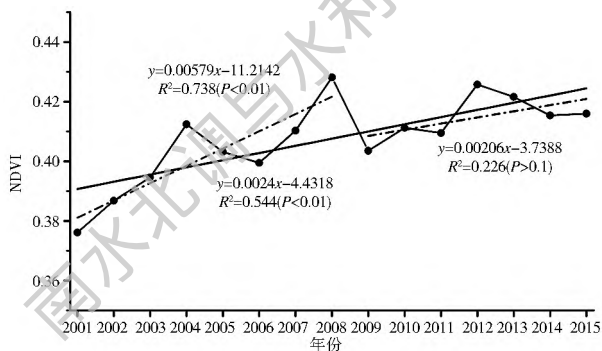


图 1 2001–2015 年滹沱河流域 NDVI 变化趋势

Fig. 1 Annual changing trend of NDVI in Hutuo river basin during 2001–2015

2.2 植被覆盖空间格局演变特征

2.2.1 NDVI 空间分布特征

2001–2015 年滹沱河流域年均 NDVI 值为 0.41, 集中分布于 0.3~0.5 范围, 占流域面积的 74.3%; 0.2~0.3 和 0.5~0.6 范围面积比例分别为 8.8% 和 15.9%; 大于 0.6 和小于 0.2 的面积比例最小, 约为 0.5%。图 2 显示了 2001–2015 年滹沱河流域年均 NDVI 的空间分异特征, 可以看出, 滹沱河流域 NDVI 从西北–中部–东南呈现出低–高–低分布, 其中 NDVI 值中部最高, 东南次之, 西北最低。进一步对流域上、中、下游 NDVI 进行统计, 结果如表 2 所示, 可以看到, 滹沱河流域上游 NDVI 主要集中于 0.2~0.5 范围, 占面积比例为 94.14%, 其中 NDVI 在 0.3~0.4 范围的面积比例最大, 为 54.25%; 流域的中游和下游 NDVI 主要集中于 0.3~0.6 范围, 占面积的比例分别为 96.55% 和 89.99%, 其中 NDVI 在 0.4~0.5 范围的面积比例最大, 分别为 46.67% 和 39.60%。NDVI 小于 0.2 和大于 0.6 的面积比例在流域的上游、中游、下游均非常小, 都在 1.55% 以内。

2.2.2 NDVI 空间演变趋势及稳定性

2001–2015 年滹沱河流域植被恢复效果明显 (图 3(a)), 其中, NDVI 改善区域的面积比例为 73.57%, 植被退化的面积比例仅为 13.83%。空间上, 植被恢复程度差异明显, 上游和中游植被改善状况明显好于下游, 植被改善的面积比例分别为 75.89%

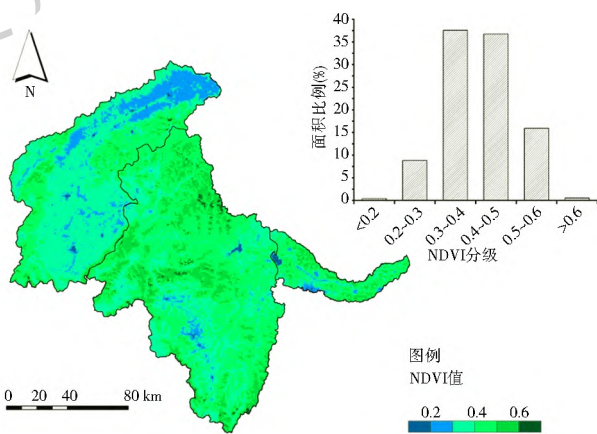


图 2 2001–2015 年滹沱河流域年均 NDVI 空间分布特征
Fig. 2 Average annual NDVI in Hutuo river basin during 2001–2015

表 2 滹沱河流域不同 NDVI 等级的面积比例

T ab. 2 Statistics of different NDVI grades in Hutuo river basin

年均 NDVI 分级	面积比例 (%)		
	上游	中游	下游
< 0.2	0.45	0.23	1.55
0.2~ 0.3	18.48	2.48	8.51
0.3~ 0.4	54.25	28.17	23.98
0.4~ 0.5	21.44	46.67	39.60
0.5~ 0.6	5.24	21.72	26.33
> 0.6	0.14	0.74	0.03

和 77.15, 其中, 明显改善的面积比例都在 51.58% 以上; 而流域下游植被改善的面积仅为 30.82%, NDVI 退化区域的面积比例达到了 51.15%。2001–2015 年滹沱河流域 NDVI 标准差在 0.00536~0.177 之间, 植被覆盖变化波动性存在明显的空间差异性 (图 3(b))。滹沱河流域 NDVI 的波动表现为, 低、较低波动区主要集中分布于流域的上游和下游, 面积比例均在 76.40% 以上, 而下游该波动区的面积比例仅为 33.11%; 中波动区分布于流域上游、下游及中游的南部, 面积比例分别为 19.36%, 37.85 和 19.15%; 高、较高波动区主要集中于流域的下游, 面积比例达到 29.05%, 零散分布于流域的上游和下游, 面积比例均较小, 分别为 3.30% 和 4.46%, 该区域的主要土地利用类型为耕地和建筑用地, 可能人类活动影响显著, 导致植被覆盖波动较大。

3 滹沱河流域 NDVI 与 SPEI 之间的关系

3.1 滹沱河流域 SPEI 时空特征

2001–2015 年滹沱河流域 SPEI 以 0.683/(10a) 呈波动上升趋势, 说明该区域气象干旱条件有所缓解。SPEI 低值出现在 2001 年、2005 年和 2006 年, 其中, 2001 年为中度干旱, 其他年份为轻微干

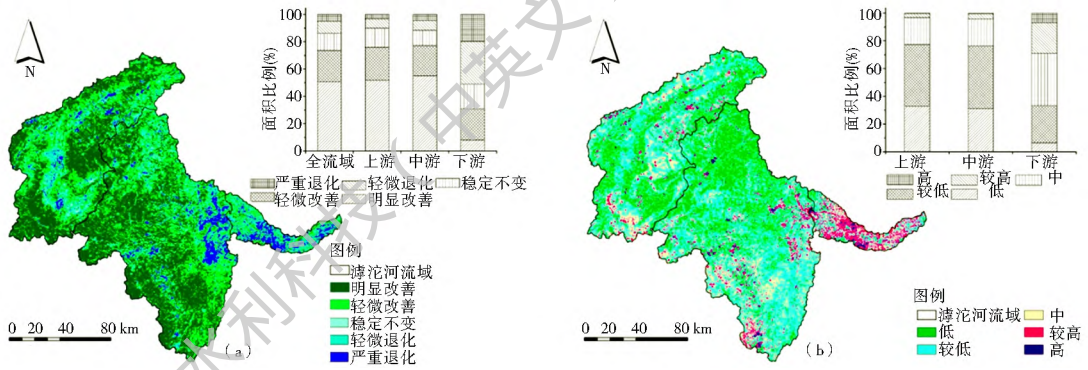


图3 2001-2015年滹沱河流域NDVI演变格局(a)及波动性(b)

Fig. 3 The trend (a) and standard deviation (b) of NDVI during 2001-2015 in Hutuo river basin

旱, 2007年之后未出现干旱; 高值出现在2003年、2011年、2012年和2013年, 表现为中度湿润和轻微湿润(图4(a))。从图4(b)中可以看出, 过去15年各像元SPEI均呈现增加的趋势, 即流域干旱程度有所缓解, 有向湿润方向发展的趋势。其中, 流域中游南部变湿趋势最为明显, 而流域上游的西南部及流域下游

变湿趋势较缓慢。从单因子对SPEI的影响上考虑, SPEI与降水呈显著正相关($p < 0.01$), 与气温呈显著负相关($p < 0.1$)。通过偏相关分析结果可知, 当气温一定时, 降水对SPEI具有显著正向影响($p < 0.01$); 当降水一定时, 气温对SPEI没有显著影响, 说明滹沱河流域降水是影响SPEI的主要条件。

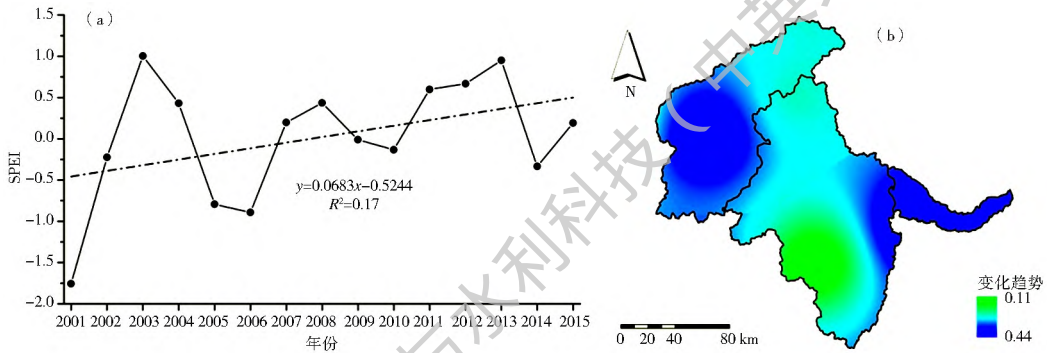


图4 2001-2015年滹沱河流域SPEI(a)及变化趋势(b)

Fig. 4 Annual change (a) and trend (b) of SPEI during 2001-2015 in Hutuo river basin

3.2 滹沱河流域NDVI与SPEI的关系

从图1和图4(a)可以看出, 2001年至2003年左右, NDVI和SPEI均呈现迅速上升阶段, 2005年至2012年左右, NDVI和SPEI均呈现波动中上升趋势; 2013年之后表现出下降趋势。因此, 认为滹沱河流域NDVI与SPEI存在一定程度的相关关系。下面分别从月、季节、年等尺度探究植被覆盖与SPEI的相关关系。

考虑到只有在植被生长月份NDVI才会与干旱程度表现出显著的线性关系^[32], 因此, 本文主要探讨生长季各月SPEI与NDVI之间的相关性。从图5可以看出, 生长季各月的NDVI与SPEI之间关系为: 4月、6月、7月、8月表现为正相关, 且6月、7月份在 $p < 0.1$ 水平上显著; 5月、9和10月份表现为负相关, 但均不显著。另外, 生长季各月的NDVI与前一月的SPEI具有一定的相关性, 但都不具有显著性, 即NDVI对SPEI没有表现出明显的滞后性。

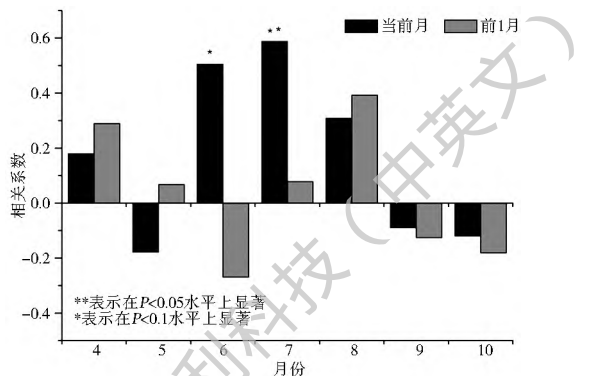


图5 滹沱河流域生长季NDVI与月SPEI相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between NDVI and SPEI in Hutuo river basin

从表3可以看出, 2001-2015年滹沱河流域NDVI与SPEI呈显著正相关, 且降水是植被生长的主要因子。考虑到滹沱河流域属于温带季风气候, 降水主要集中在汛期(6月-9月), 且以7月为最高, 其中汛期占全年降水量的63.4%~87%, 结合图5结果, 选择6月-8月为典型月份探究气候要素对

NDVI 的影响, 相关分析结果如表 3 所示。6 月份表现为气温主导, 即温度越高, NDVI 值越小, 可能是因为气温上升, 地表蒸散加速, 土壤干层发育, 对植被生存产生抑制作用^[4]。7 月份表现为降水主导, 即降水越多, NDVI 越大。可能是 7 月达到了植物生长所需要的积温, 充沛的降水为植物生长提供了充足的水分条件。

表 3 滹沱河流域 NDVI 与气候要素相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between NDVI and climatic factors in Hutuo river basin

尺度	$R_{NDVI \cdot SPEI}$	$R_{NDVI \cdot P \cdot T}$	$R_{NDVI \cdot T \cdot P}$	备注
年	0.635**	0.604**	-0.028	降水主导
6 月	0.505*	0.118	-0.453*	气温主导
7 月	0.588**	0.469*	-0.289	降水主导
8 月	0.308	0.373	0.096	-

注: $R_{NDVI \cdot SPEI}$ 表示 NDVI 与 SPEI 的相关系数; $R_{NDVI \cdot P \cdot T}$ 和 $R_{NDVI \cdot T \cdot P}$ 分别表示 NDVI 对降水和气温的偏相关系数; - 表示无; * 为在 0.1 水平显著, ** 为在 0.05 水平显著。

季节尺度上, 本文选择春季、夏季和秋季来探究 NDVI 与 SPEI 之间的关系。研究结果显示, NDVI 与春季、夏季和秋季的平均相关系数分别为 0.01、0.32 和 0.20, 其中, 通过 $P < 0.05$ 显著性检验的象元比例分别为 1.64%、16.11% 和 5.06%。也就是说, 滹沱河流域夏季和秋季干旱程度对植被覆盖度的影响较为明显。这与赵舒怡等探究华北地区植被覆盖与干旱程度的结果一致^[5]。进一步, 从图 6 可以看出, 流域上和中游, NDVI 与 SPEI 之间的相关系数均表现出夏季最大, 秋季次之, 春季最小, 表明夏季植被生长状态最容易受到干旱的影响, 这可能是由于夏季植被生长旺盛, 需水量大。相比之下, 流域下游相关系数较小, 且春季表现出了负相关, 可能是由于该区域人类活动较大, 导致植被覆盖与自然干旱程度关系不大。

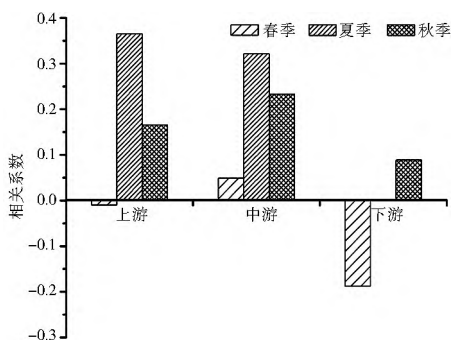


图 6 2001-2015 年滹沱河流域不同季节 NDVI 与 SPEI 的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between NDVI and SPEI in different seasons in Hutuo river basin during 2001-2015

从年尺度上看, 研究区大部分区域 NDVI 与

SPEI 呈正相关, 特别是流域的上游、中游地区, 两者正相关性较强(图 7)。滹沱河流域年均 NDVI 与 SPEI 的平均相关系数为 0.34, 其中, 正相关和负相关的面积比例分别为 91.53% 和 8.47%。在正相关区域中, 分别有 23.18% 和 7.00% 的区域通过了 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 检验; 负相关区域中, 分别仅有 0.05% 和 0.01% 通过了 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 检验。流域下游 NDVI 与 SPEI 的相关系数也较小, 与季节尺度上呈现的结果相一致。

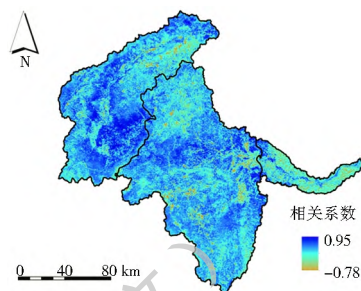


图 7 2001-2015 年滹沱河流域年均 NDVI 与 SPEI 的相关关系

Fig. 7 Correlation between NDVI and SPEI in Hutuo river basin during 2001-2015

4 讨论

植被覆盖演变是自然与人类活动交互作用的过程, 其中, 人类活动主要体现在促进 NDVI 增加的正作用、抑制 NDVI 增加的负作用等两方面。如何量化人类活动? 是一个难题。已有研究中常采用残差分析法探讨人类活动对植被覆盖的影响^[33-34]。基本思路是: 建立每个栅格单元 NDVI 与 SPEI 序列的回归模型, 基于该模型, 利用各年 SPEI 预测各栅格的年 NDVI 值, 然后用遥感观测的 NDVI 真实值减去预测的 NDVI 值得到各年 NDVI 残差, 最后采用 Mann Kendall 统计检验法对 NDVI 残差序列进行趋势分析。基于该方法, 得到了滹沱河流域人类活动对植被覆盖的作用(图 8), 可以看出, 人类活动对 NDVI 正作用的区域占总面积的 73%, 明显高于人类活动对 NDVI 负作用的比例, 说明近 15 年滹沱河流域人类活动对生态环境产生了积极作用, 生态保护和建设已初见成效。人类活动对 NDVI 负作用的流域上游中部山间盆地、中下游平原区是主要分布区域, 这些区域是人口聚集区及耕作区, 可能由于城镇化进程对该区域生态与植被状况造成破坏。人类活动还影响植被的恢复程度, 人类活动的正作用使滹沱河流域超过 50% 的区域的植被覆盖情况发生明显改善, 而人类活动的负作用也导致该区域 8.5% 的植被严重退化(图 8)。可见, 人类活动人是植被覆

盖演变过程中不可忽视的驱动因素。

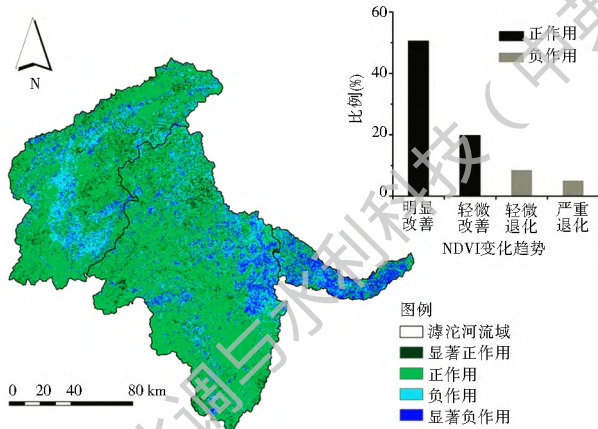


图 8 2001-2015 年滹沱河流域人类活动对植被覆盖的作用

Fig. 8 Impact of human actives on vegetation coverage in Hutuo river basin during 2001-2015

植被覆盖演变除了受到降水、气温等因素影响外,还受地貌、土壤、人类活动等因素共同作用。本文的结果显示,气候暖湿化的趋势决定了滹沱河流域植被的增长方向,退耕还林等人类活动亦促进了植被生长,但人类活动与气候因子对植被覆盖演变的动因孰轻孰重?在今后的研究中需进一步讨论。此外,不同植被类型的生理结构不同,生境条件亦存在差异,使其对气候条件的响应也有所不同^[35-36],因此,不同植被类型对气候变化的敏感性及其响应特征有待进一步探讨。

5 结论

本文旨在探究滹沱河流域近 15 年植被覆盖时空演变特征,进一步结合 SPEI 干旱指标,分别从月、季节、年等尺度分析植被覆盖与 SPEI 的相关关系。结果如下。

(1) 2001-2015 年滹沱河流域 NDVI 呈显著增加趋势,增速为 0.024/(10a),可以大致分为 2 个阶段,快速增长阶段(2001-2008 年)和缓慢增长阶段(2009-2015 年),NDVI 的增长率分别为 13.83% 和 2.97%;空间上从西北-中部-东南呈现出低-高-低分布。

(2) 2001-2015 年滹沱河流域 NDVI 改善区域的面积比例为 73.57%,植被退化的面积比例仅为 13.83%,集中分布于流域下游地区;植被变化存在明显的空间差异性,上游和中游植被改善状况明显好于下游;NDVI 波动较大区域集中分布于流域下游,可能受人类活动影响显著。

(3) 从月尺度上看,6 月、7 月是干旱程度对植被覆盖影响最显著的月份,其中,6 月气温对 NDVI 的

影响大于降水,而 7 月降水对 NDVI 的影响大于气温;从季节尺度上看,夏季干旱程度对植被覆盖度的影响最为明显,秋季次之;从年尺度上看,NDVI 年际变化与 SPEI 具有显著正相关关系。表明干旱程度对植被生长状态有较大影响。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125. (PIAO S L, FANG J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1): 119-125. (in Chinese))
- [2] 胡娟娟,郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646. (HU C J, GUO L. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1640-1646. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.09.007.
- [3] 赵健赞,彭军. 基于 MODIS NDVI 的青海高原植被覆盖时空变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 67-73. (ZHAO J Y, PENG J. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Qinghai Plateau based on MODIS NDVI data[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4): 67-73. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.115.
- [4] 李双双,延军平,万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, (37) 7: 960-970. (LI S S, YAN J P, WAN J. The spatiotemporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi Gansu Ningxia region[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, (37) 7: 960-970. (in Chinese))
- [5] 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 S Y, GONG Z N, LIU X Y. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 717-729. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201505004.
- [6] 中国气象局. 气象干旱等级国家标准 GB/T20481-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. (The China meteorological administration. The national standard of the Classification of Meteorological Drought GB/T20481-2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese))
- [7] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213. (ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 196-213. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1008-8166.2015.02.0196.
- [8] 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 Z L, HUANG Z Q, LI J, et al. Assess-

- ing impacts of meteorological drought on vegetation at catchment scale in China based on SPEI and NDVI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 177-186. (in Chinese) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.0187.
- [9] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 1-17. (AD, ZHAO W J, GONG Z N, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north china plain from 1981 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 576-592. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201507301600.
- [10] PARUELO J M, EPSTEIN H E, LAUENROTH W K, et al. A NPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States[J]. Ecology, 1997, 78(3): 953-958.
- [11] 武正丽, 贾文雄, 刘亚荣, 等. 近 10a 来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 80-87. (WU Z L, JIA W X, LIU Y R, et al. Change of vegetation coverage in the Qilian Mountains in recent 10 years[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 80-87. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2014.01.023.
- [12] ECKERT S, HÜSLER F, LINIGER H, et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2015, 113: 16-28. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001.
- [13] SHAO Y, LUNETTA R S, WHEELER B, et al. An evaluation of time series smoothing algorithms for land cover classifications using MODIS NDVI multi-temporal data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 258-265. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.023
- [14] ZHAO Maosheng, RUNNING S W. Drought induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. science, 2010, 329(5994): 946-943. DOI: 10.1126/science.1199544.
- [15] 丁文荣. 金沙江下段植被 NDVI 变化趋势及其归因[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 107-112. (DING W R. Study on the relationship between change trend of NDVI and environment factors in the lower section of Jinsha River, China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 107-112. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.01.018.
- [16] 赵新来, 李文龙, Guo Xulin, 等. Pa, SPI 和 SPEI 干旱指数对青藏高原东部高寒草地干旱的响应比较[J]. 草业科学, 2017, 34(2): 273-282. (ZHAO X L, LI W L, GUO X L, et al. The responses of Pa, SPI and SPEI to dry climate in alpine meadows of eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(2): 273-282. (in Chinese)) DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0187.
- [17] 江珊珊, 张增信, 王玮琳, 等. 植被动态演变规律及其与极端气候事件的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 74-80. (JIANG S S, ZHANG Z X, WANG W L, et al. Dynamic variation rules of vegetation cover in Jiangsu Province and its response to climate change[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(5): 74-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.05.012.
- [18] VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time scales across global land biomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(1): 52-57. DOI: 10.1073/pnas.1207068110.
- [19] 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 等. 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(02): 142-150. (ZHANG Y F, WU C L, ZHANG H Y, et al. Dependency relationship between NDVI and SPEI for spatial-temporal variations in the source areas of the Yellow River. (in Chinese)) DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000206.
- [20] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7908-7918. (KONG D D, ZHANG Q, GU X H, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 7908-7918. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201506111182.
- [21] VICENTE-SERRANO S M, BEGUER A S, L? PEZ-MORENO J L. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23: 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [22] VICENTE-SERRANO S M, L? PEZ-MORENO J L, LORENZO-LACRUZ J, et al. The NAO impact on droughts in the mediterranean region[J]. Advances in Global Change Research, 2011, 46: 23-40.
- [23] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677-688. (ZHOU D, ZHANG B, REN P G, et al. Analysis of Drought Characteristics of Shaanxi Province in Recent 50 Years Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 677-688. (in Chinese))
- [24] 张瑞钢, 莫兴国, 林忠辉. 滹沱河上游山区近 50 年蒸散变化及主要影响因素分析[J]. 地理学报, 2012, 32(5): 628-634. (ZHANG R G, MO X G, LIN Z H, et al. The trend and the principal influence factors of evapotranspiration in Hutuo river basin during last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 32(5): 628-634. (in Chinese))
- [25] 宋保平, 过仲阳, 郑艳侠, 等. 近 50 年来滹沱河流域水资源变化规律与影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 17-21. (SONG B P, GUO Z Y, ZHENG Y X, et al. Variation characteristics and their impact factors of water resources in the Hutuo river basin during 50 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 17-21. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04017.
- [26] 孙雷刚, 郑振华. 基于 RS 的近 30 年滹沱河流域植被覆盖度动态变化研究[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(6): 36-60, 45. (SUN L G, ZHENG Z H. RS based study on dynamic change of vegetation coverage in Hutuo river watershed in the past 30 years[J]. Geography and Geoinformation Science,

- 2014, 30(6): 36-60, 45. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2014.06.008.
- [27] 张金屯. 五台山植被类型及分布[J]. 山西大学学报, 1986, (2): 87-91. (ZHANG J T. The vegetation types and their distribution on Wutai mountains in Shanxi province[J]. Learned Periodical Society Shanxi University, 1986, (2): 87-91. (in Chinese))
- [28] HOLBEN B N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1471-1434.
- [29] 何远梅, 姚文俊, 张岩, 等. 黄土高原区植被恢复的空间差异性分析[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 63-69. (HE Y M, YAO W J, ZHANG Y, et al. Spatial variability of vegetation restoration on the Loess Plateau based on MODIS/NDVI[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 63-69. (in Chinese) DOI: 10.16843/j.sswc.2015.02.011.
- [30] 王永财, 孙艳玲, 王中良. 1998-2011年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 594-602. (WANG Y C, SUN Y L, WANG Z L. Spatiotemporal change in vegetation cover and climate factor drivers of variation in the Haihe River Basin 1998-2011[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 594-602. (in Chinese))
- [31] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000-2014年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1568-1578. (ZHAO A Z, LIU X F, ZHU X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1568-1578. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.05.043.
- [32] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001-2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268. (MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268. (in Chinese))
- [33] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000-2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 882-888. (BAI J J, BAI J T, WANG L. Spatiotemporal change of vegetation NDVI and its relations with regional climate in Northern Shaanxi Province in 2000-2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(7): 882-888. (in Chinese))
- [34] 刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因素的相对作用分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 12-23. (LIU B, SUN Y L, WANG Z L, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in North China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 12-23. (in Chinese) DOI: 10.11849/zyzxb.2015.01.002.
- [35] 全莉棉, 曾彪, 王鑫. 2000-2012年山西省不同植被类型物候变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2016, 23(02): 194-200. TONG L M, ZENG B, WANG X. Phenological variation of different vegetation types and its responds to climate changes in shanxi province from 2000 to 2012[J]. Research of soil and water conservation, 2016, 23(02): 1255-1268. (in Chinese) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.02.037.
- [36] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001-2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764. MU S J, LI J L, ZHOU W, et al. Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3752-3764. (in Chinese) DOI: 10.5846/stxb201205030638.

(上接第 99 页)

- [3] 刘国强, 王长德, 管光华, 等. 南水北调中线干渠弧形闸门过流能力校核分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 24-28. (LIU G Q, WANG C D, GUAN G H, et al. Analysis and check of radial gate conveyance capability on the Middle Route of the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 24-28. (in Chinese))
- [4] 金旻, 徐岩, 王彤彤. 南水北调中线水资源调度复杂性对策研究[J]. 中国水利, 2013(20): 4-8. (JIN Y, XU Y, WANG T T. Complexity and countermeasure study on water allocation of Middle Route of South-North Water Transfer Project[J]. China Water Resources, 2013(20): 4-8. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利部关于印发《南水北调中线一期工程水量调度方案(试行)》的通知[Z]. 2014-10-27. (The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China: Notification on issuing water regulation scheme of the first stage of the Middle Route of South to North Water Transfer Project (try out)[Z]. 2014-10-27. (in Chinese))
- [6] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 南水北调中线一期工程2015-2016年度水量调度计划实施总结报告[R]. 武汉: 2016. (Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., LTD.: Summary report of water regulation plan from 2015 to 2016 of the first stage of the Middle Route of South to North Water Transfer Project[R]. Wuhan: 2005. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国国家发展改革委员会. 国家发展改革委关于南水北调中线一期工程运行初期供水价格政策的通知[Z]. 2014-12-26. (National Development and Reform Commission: Notification on water supply price policy of the first stage of the Middle Route of South to North Water Transfer Project in the initial operation period[Z]. 2014-12-26. (in Chinese))