

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.002

闫奕飞,白强,孙虎,等. 黄河流域植被变化和产水服务的时空特征分析[J].水土保持学报,2024,38(1):130-139.

YAN Yifei, BAI Qiang, SUN Hu, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of vegetation cover and water production services in the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):130-139.

黄河流域植被变化和产水服务的时空特征分析

闫奕飞¹, 白强², 孙虎¹, 王宁¹, 劳显然¹

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119;2.神木市自然资源和规划局,陕西 神木 719399)

摘要: [目的] 黄河流域是我国重要的生态保护屏障,但其生态环境脆弱,研究黄河流域植被变化与产水服务之间的关系,为其生态建设和高质量发展提供保障。[方法] 基于 NDVI 数据和 InVEST 模型,采用趋势分析和相关分析方法,将植被变化与水源供给服务相结合,对 2001—2020 年黄河流域 NDVI 与产水服务的时序变化和空间特征进行分析,研究 NDVI 与产水服务的趋势变化和相互关系。[结果] (1)黄河流域 NDVI 与产水深度均呈现增加趋势,增速分别为 0.05 /10,18.215 mm/10 a,NDVI 以明显增长为主,产水深度则以不明显增长为主,此外,流域产水量也不断增长。(2)NDVI 与产水深度联系紧密,二者在时间上呈显著正相关,相关系数为 0.75 ($p < 0.01$),空间上表现出东北正相关—西南负相关的空间分化。(3)较高植被覆盖度下产水深度增加速率最高,不同植被覆盖度下 NDVI 与产水深度均以正相关为主,但随着植被覆盖度增多,NDVI 与产水深度的负相关比例不断增加,表明目前各类植被覆盖度下 NDVI 对产水的影响均是积极的,但随着植被覆盖度增加,其对产水深度的消极影响也不断增加。[结论] 黄河流域 NDVI 与产水服务近年来都呈现增长态势且密切相关,目前的植被恢复对产水依然表现出积极作用,但要注意过度植被恢复对植被生长产生消极影响,适度的植被恢复对黄河流域的产水服务有益。

关键词: 植被变化; InVEST 模型; 趋势分析; 相关性分析; 黄河流域

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)01-0130-10

Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Vegetation Cover and Water Production Services in the Yellow River Basin

YAN Yifei¹, BAI Qiang², SUN Hu¹, WANG Ning¹, LAO Xianran¹

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2.Shenmu Natural Resources and Planning Bureau, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract: [Objective] The Yellow River Basin is an important ecological protection barrier in China, but its ecological environment is fragile. Studying the relationship between vegetation changes and water production services in the Yellow River Basin provides guarantees for its ecological construction and high-quality development. [Methods] Based on NDVI data and InVEST model, trend analysis and correlation analysis methods were used to combine vegetation change with water supply services. The temporal and spatial characteristics of NDVI and water production services in the Yellow River Basin from 2001 to 2020 were analyzed, and the trend changes and interrelationships between NDVI and water production services were studied. [Results] (1) The NDVI and water production depth of the Yellow River basin showed an increasing trend, with the growth rate of 0.05/10 a and 18.215 mm/10 a respectively. The NDVI was mainly showing a significant increase, while the water production depth was mainly showing an insignificant increase. In addition, the water production in the basin was also continuously increasing. (2) NDVI was closely related to water production depth, and there was a significant positive correlation between the two in terms of time, with a correlation coefficient of 0.75 ($p < 0.01$). The spatial differentiation showed a positive correlation in

收稿日期:2023-04-08

修回日期:2023-05-22

录用日期:2023-06-25

网络首发日期(www.cnki.net):2023-10-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41501290)

第一作者:闫奕飞(1999—),女,硕士研究生,主要从事区域开发与环境治理研究。E-mail:calista@snnu.edu.cn

通信作者:孙虎(1962—),男,博士,教授,主要从事区域开发与环境治理、水土保持研究。E-mail:kycjh6@snnu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

the northeast and a negative correlation in the southwest. (3) The rate of increase in water production depth was highest under higher vegetation coverage, and NDVI was mainly positively correlated with water production depth under different vegetation coverage. However, as vegetation coverage increased, the proportion of negative correlation between NDVI and water production depth continued to increase. At present, the impact of NDVI on water production under various vegetation cover levels is positive, but as vegetation cover increases, its negative impact on water production depth will continue to increase. [Conclusion] In recent years, NDVI and water production services in the Yellow River Basin have shown a growth trend and are closely related. Currently, vegetation restoration still shows a positive effect on water production, but it should be noted that excessive vegetation restoration can have a negative impact on vegetation growth. Moderate vegetation restoration is beneficial for water production services in the Yellow River Basin.

Keywords: vegetation change; InVEST model; trend analysis; correlation analysis; Yellow River Basin

Received: 2023-04-08

Revised: 2023-05-22

Accepted: 2023-06-25

Online(www.cnki.net): 2023-10-12

植被是联结土壤、大气和水分的“纽带”,在全球变化研究中起着“指示器”的作用,植被覆盖变化的研究不仅对该地区的水循环及气候变化有重要意义,而且是反映区域生态环境变化的重要指标^[1]。植被的生长需要大量的水分,如果区域降水不足,植物根系会深入地下吸收水分,导致土壤含水量不足,使得径流和产水下降^[2]。产水服务计算的是水循环过程中降雨减去实际蒸散发后余下的水量,植被变化一方面通过改变地表物理条件影响土壤入渗、地表径流等水热要素,从而改变陆面大气交互作用,反馈给区域降水;另一方面,植被增加导致蒸散发增加,进而提高大气输送水汽量和大气湿度,增加水循环和区域降水,反之,区域降水也是影响植被变化的重要因素^[3-4]。故有学者^[5]认为,植被生长会消耗大量地表水和地下水,蒸散发增加,导致产水量减少;另一部分学者^[6-7]则认为,植被恢复增强蒸散发的同时也加强了水汽循环,从而产生频繁的降水,导致产水量增加。植被变化与产水服务之间关系复杂,不仅是水资源与生态学领域关注的一个重要理论问题,也是与生态恢复和保护相关的一个重要应用课题^[8]。

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),可以客观地反映地表植被的覆盖程度和动态变化,与其他植被指数相比,它对绿色敏感性较好、数据易获取、分辨率高,便于长时序植被覆盖变化研究,在全球范围内得到广泛应用^[9]。InVEST模型在评估水源供给服务方面较为成熟,国内外学者成功应用于西班牙东北部 Francoli 流域^[10]、石羊河流域^[11]、黄土高原等区域的评估^[12]。近年来,很多学者聚焦植被变化与产水服务的关系,研究常以 NDVI 与 InVEST 模型结合来说明问题,张耀文等^[13]研究渭河流域的植被覆盖度和产水量的

时空变化表明,当植被覆盖度达到阈值时流域产水量不增加反而出现减少趋势;周国逸等^[3]对流域植被变化与产水量的关系进行了推导分析发现,在面积小、持水能力弱的流域,植被恢复会通过提高流域持水能力而减少产水量,但在一些面积大、持水能力高的复杂流域,植被的增加并不会改变径流量。

近年来,气候趋于暖干化和人类活动频繁使黄河流域的植被覆盖增加,导致黄河流域水资源状况发生显著变化^[14]。基于黄河流域生态环境的脆弱性,国家对其进行了长期大规模的综合治理,并在生态建设、环境治理等方面取得了突破性进展,但黄河流域依旧面临生态环境恶化和水资源短缺等问题,作为重要的供水服务和植被恢复区域,研究其植被覆盖变化和水源供给服务对黄河流域高质量发展和生态环境保护具有重要意义^[15-16]。有研究^[15,17]表明,黄河流域的植被生态质量整体呈现显著的提升,产水量和产水深度在大部分区域增加,生态环境明显改善,生态服务功能不断提升。

但以往研究更多关注黄河流域植被覆盖和产水服务的变化及二者的驱动因素,对二者间的相互关系关注较少,但黄河流域的植被问题与水资源问题突出,基于其在全国发展中重要的战略地位,本文以植被与水资源视角为切入点,从植被变化与流域产水关系的研究角度出发,将二者结合起来从时间和空间上进行分析,研究黄河流域植被变化及水源供给服务的时空特征及关系,为黄河流域高质量发展提供理论和现实依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域发源于青海省巴颜喀拉山脉,跨越青

海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东省份,干流全长 5 464 km,流域面积达到 $79.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1)^[18]。流域大部分处于干旱、半干旱和半湿润地区,气候差异大,地形起伏明显,植被类型丰富,生态环境脆弱,是我国重要的生态屏障^[19-20]。黄河流域是北方地区最大的供水水源,承担着全国 15% 耕地面积和 12% 人口的供水服务,自 1999 年来实施了植树造林、退耕还林(草)等一系列生态建设工程,植被覆盖情况和生态环境得到良好改善,但黄河流域各种植被与水文等自然问题仍旧突出^[15,21]。

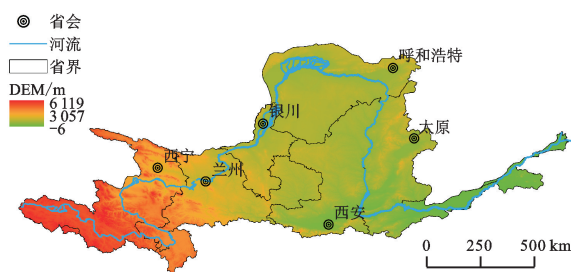


图 1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

1.2 数据来源与处理

归一化植被指数(NDVI)数据在 MRT(MODIS-ReProjection Tools)软件中进行格式转换和重投影之后,用最大值合成法(maximum value composite, MVC)得到研究区的年际植被 NDVI 数据集。降水量和潜在蒸散发数据通过均值法合成为年际数据,由于需要模型导出逐年的产水深度,故土地利用覆被数据需要年际连续的数据,土地利用现状一般表示 5 年内土地的使用状况,逐年土地利用数据变化不大,2001—2005 年数据较少,5 年 1 期,2010—2019 年数据均是 3 年 1 期,为了尽可能让土地覆被数据符合当年情况,若当年没有土地利用调查数据,都用距其最近的调查过的年份的土地利用数据来代表(表 1)。InVEST 模型需要输入的各土地利用/覆被类型植被蒸散系数(K_e)、最大根系深度参考前人^[11,15]的研究; Z 系数的确定参考前人^[15]研究、区域实际降水情况和历年黄河流域的年际径流量和入海水量,来自黄河水利委员会提供的水资源公报^[22]。

表 1 研究所需要的数据产品、数据来源及时空尺度

Table 1 Data products, data sources and spatial and temporal scales required for research

数据名称	数据来源	时空尺度
归一化植被指数(NDVI)	美国国家航空航天局(NASA)数据中心 MOD13A2 数据产品	2001 年 1 月至 2020 年 12 月,空间分辨率 1 km,时间分辨率 16 天
降水量	国家科技基础条件平台—国家地球系统 科学数据中心(http://www.geodata.cn) 国家科技基础条件平台—国家地球系统	2001—2020 年空间分辨率 1 km,时间分 辨率逐月
潜在蒸散发	科学数据中心—黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)	2001—2020 年空间分辨率 1 km,时间分 辨率逐月
土地利用覆被	中国科学院地理科学与资源研究所	2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年、2020 年空间分辨率 1 km
土壤的最大根系深度以及沙粒、粉粒、黏粒、有机碳含量等土壤数据	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn)的基于世界土 壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集	—
植物可利用水量	根据土壤质地计算获得	—
蒸散系数	根据叶面积指数计算获得	—

1.3 研究方法

本文采用 InVEST 模型评估黄河流域的产水深度和产水量,Theil—Sen media 趋势分析方法和 Mann—Kendall 显著性检验分析黄河流域 NDVI 和产水深度的变化趋势及空间特征,产水深度是逐年的栅格数据,易与 NDVI 结合进行分析,可以更好地反映产水服务和植被覆盖二者在空间上的特征和关系,故将 NDVI 与产水深度二者进行叠合分析,采用相关性分析方法来探究 NDVI 和产水深度之间的相关性,采用等间距法将黄河流域的植被情况划分为 5

类,探究不同植被覆盖度区域的产水深度变化趋势及二者的相关性。

1.3.1 Theil-Sen media 趋势分析 Theil-Sen media 趋势分析为非参数统计趋势分析方法^[23],该方法在研究中不受异常值影响,且不要求数据服从正态分布,避免了由异常值产生的误差^[24]。计算公式为:

$$\beta = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中: β 为年际变化趋势; x_j 和 x_i 为序列数据表示不同年份的值; j 和 i 为时间序列数据。

1.3.2 Mann-Kendall 显著性检验 Mann-Kendall (M-K) 检验是一种非参数检验方法,通常用于研究气候学和水文学的时间序列趋势^[25-26]。检验方法为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{2}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \tag{3}$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列数据; n 为数据个数; sgn 为符号函数。当 $n \geq 10$ 时,统计量(S)近似服从正态分布,所以定义标准化检验统计量(Z):

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \tag{4}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

当 $|Z| > 1.65, 1.96, 2.58$ 时,表达趋势分别通过置信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

1.3.3 InVEST 模型 生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST) 的产水模块是水量平衡

原理,基于 Budyko 水热耦合平衡假设和年平均降水量数据,计算研究区每个栅格单元 x 的年产水量^[27],计算公式为:

$$Y_x = 1 - (\text{AET}_x / P_x) \times P_x \tag{6}$$

$$\text{AET}_x / P_x = (1 + \omega_x R_x) / [1 + \omega_x R_x + (1 / R_x)] \tag{7}$$

$$R_x = (k_x \times \text{ET}_{0x}) / P_x \tag{8}$$

$$\omega_x = Z \times (\text{AWC}_x / P_x) \tag{9}$$

$$\text{AWC}_x = \text{Min}(\text{MSD}_x, \text{RD}_x) \times \text{PAWC}_x \tag{10}$$

$$\text{PAWC} = 54.509 - 0.132 \times \text{SAN} - 0.003 \times \text{SAN}^2 - 0.55 \times \text{SIL} - 0.006 \times \text{SIL}^2 - 0.738 \times \text{CLA} + 0.007 \times \text{CLA}^2 - 2.688 \times C + 0.501 \times C^2 \tag{11}$$

式中: Y_x 、 AET_x 、 P_x 分别为栅格 x 的年均产水量、年实际蒸散量和年降水量; R_x 为栅格 x 的干燥度指数,无量纲; ET_{0x} 为栅格 x 内的潜在蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 的年降水量(mm); ω_x 为经验参数,用来描述气候-土壤属性; AWC_x 为植被可利用含水量(mm); Z 为 Zhang 系数,表示季节降雨分布和降雨深度的参数; MSD_x 为最大土壤深度(mm); RD_x 为根系深度(mm); PAWC 为植物可利用含水率(单位); SAN 为土壤沙粒(%); SIL 为土壤粉粒(%); CLA 为土壤黏粒(%); C 为土壤有机碳的含量(%)。InVEST 产水模块的生物物理参数见表 2。

表 2 输入 InVEST 产水模块的生物物理参数

Table 2 Biophysical parameters in InVEST water yield model

土地利用类型	地类代码	K_c	最大根系深度/mm	土地利用类型	地类代码	K_c	最大根系深度/mm
水田	11	0.70	2 100	滩涂	45	1.00	1 000
旱地	12	0.65	2 000	滩地	46	0	0
有林地	21	1.00	7 000	城镇用地	51	0.30	100
灌木林地	22	0.90	5 000	农村居民地	52	0.20	100
疏林地	23	0.80	5 100	其他建设用地	53	0.20	100
其他林地	24	0	0	沙地	61	0.20	300
高覆盖草地	31	0.85	2 600	戈壁	62	0.20	300
中覆盖草地	32	0.65	2 300	盐碱地	63	0.20	300
低覆盖草地	33	0.65	2 000	沼泽地	64	1.00	300
河渠	41	1.00	100	裸土地	65	0	0
湖泊	42	0	0	裸岩石质地	66	0	0
水库坑塘	43	1.00	100	其他	67	0	0
冰川及永久积雪	44	0.50	100	海洋	99	0	0

1.3.4 相关性分析 相关性分析主要用于反映特征之间的相关程度,本文利用 Pearson 相关分析,其计算公式^[9]为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{12}$$

式中: R 为变量 x 和 y 的相关系数; x_i 是第 i 年/月

的 NDVI 值; $\bar{x}$ 为多年/年内中每个月平均 NDVI; y_i 为第 i 年/月的产水深度; $\bar{y}$ 为多年/年内产水深度平均值。其中,相关系数(R)的值范围为 $[-1, 1]$, R 越大,表示变量之间的相关性越强。Pearson 相关分析要求变量正态分布,故需要对序列数据进行正态检验。 p 值代表显著性水平,一般以 $p < 0.05$ 为显著, $p < 0.01$ 为非常显著, $p < 0.001$ 为极显著。

2 结果与分析

2.1 NDVI 的时空变化

用 2001—2020 年各年份黄河流域 NDVI 影像的平均值来代表当年黄河流域的植被覆盖状况,绘制黄河流域 NDVI 的年际变化(图 2)。20 年来,黄河流域的 NDVI 整体呈现明显的上升趋势,增长速率为 0.05/10 a($p<0.001$),其中 2001—2010 年平稳增长,2010—2020 年有明显波动,但整体仍然呈上升趋势。

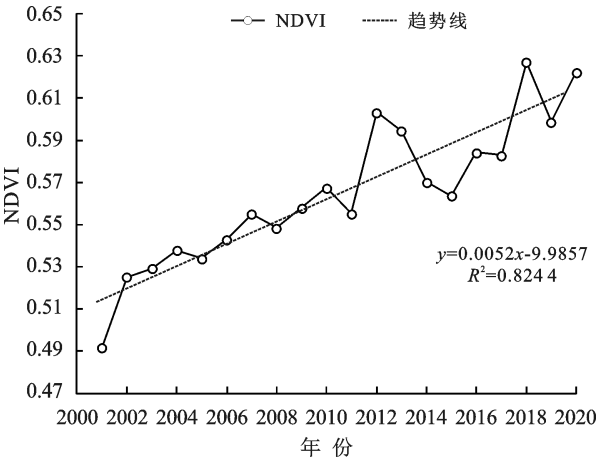


图 2 NDVI 年际变化

Fig. 2 Interannual variation in NDVI

将 20 年间黄河流域 NDVI 变化趋势分为 9 类(表 3),得到 2001—2020 年黄河流域的 NDVI 变化趋势的空间分布特征(图 3),其中 NDVI 趋势极显著增加的区域占比最多,达到 47.68%,主要分布在黄河流域中部和北部即黄河流域中游的大部分地区;极显著减少的区域很少,主要分布在关中盆地、运城盆地、宁夏平原和河南省北部小部分地区。

整体来看,黄河流域的 NDVI 变化趋势在空间上也主要以增加为主,主要呈现出极显著增加的特征,少部分地区呈现减少趋势,主要分布在黄河流域东南部 and 西部部分地区。

表 3 NDVI 变化趋势统计

Table 3 NDVI trend statistics

β	Z	NDVI 趋势变化	面积百分比/%
$\beta<0$	$2.58<Z$	极显著减少	0.96
	$1.96<Z\leq2.58$	显著减少	0.84
	$1.65<Z\leq1.96$	微显著减少	0.58
$\beta=0$	$Z\leq1.65$	不显著减少	7.33
	Z	无变化	0.36
$\beta>0$	$Z\leq1.65$	不显著增加	22.60
	$1.65<Z\leq1.96$	微显著增加	6.20
	$1.96<Z\leq2.58$	显著增加	13.46
	$2.58<Z$	极显著增加	47.68

2.2 产水深度/总量的时空变化

用 2001—2020 年年际产水深度的均值分析产水

深度随时间的变化趋势(图 4)。

可以看到 20 年间黄河流域的产水深度整体是增加的,2001—2005 年和 2015—2019 年 2 个区间内稳定地增加,其余年份波动增加,波动范围大概在 40~90 mm,2006 年和 2015 年出现 2 个低值,但产水深度整体依然为增长特征,增长速率 18.215 mm/10 a($p<0.001$)。同样按照变化趋势的分类方法,得到 2001—2020 年黄河流域产水深度 9 类变化趋势(表 4)及黄河流域产水深度的变化趋势空间分布(图 5)。

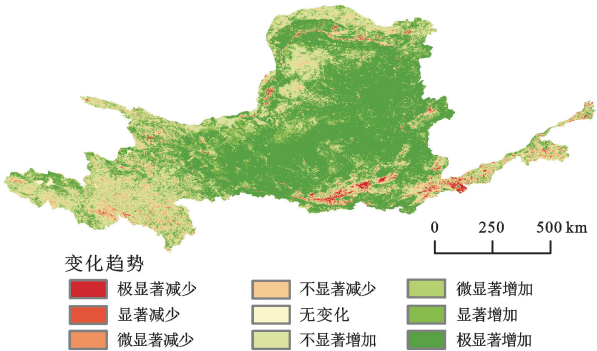


图 3 NDVI 变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI trends

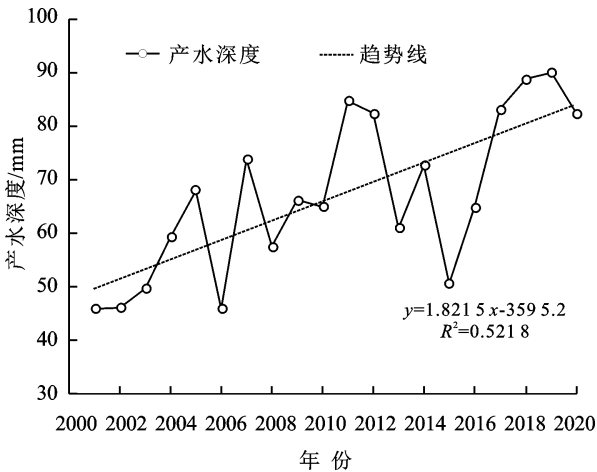


图 4 产水深度年际变化

Fig. 4 Interannual variation in the depth of water production

表 4 产水深度的变化趋势统计

Table 4 Statistics on the trend of changes in the depth of water production

β	Z	NDVI 趋势变化	面积百分比/%
$\beta<0$	$2.58<Z$	极显著减少	0.04
	$1.96<Z\leq2.58$	显著减少	0.70
	$1.65<Z\leq1.96$	微显著减少	1.21
$\beta=0$	$Z\leq1.65$	不显著减少	8.95
	Z	无变化	9.97
$\beta>0$	$Z\leq1.65$	不显著增加	52.57
	$1.65<Z\leq1.96$	微显著增加	12.16
	$1.96<Z\leq2.58$	显著增加	10.39
	$2.58<Z$	极显著增加	3.99

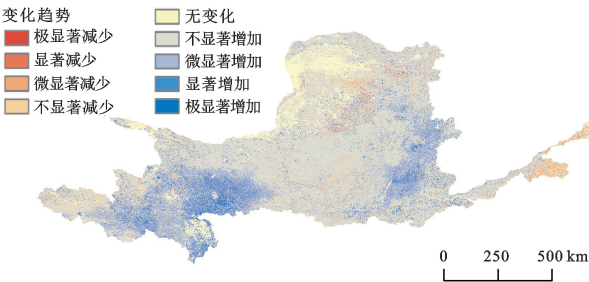


图 5 产水深度变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of trends in the depth of water production

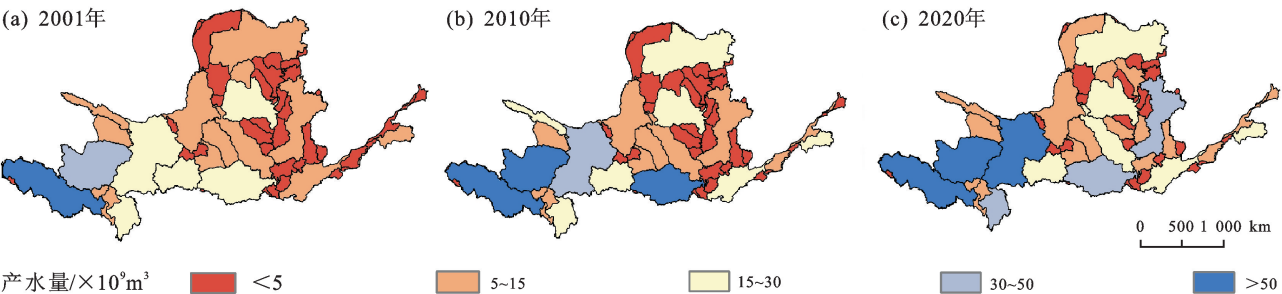


图 6 产水量变化的空间特征

Fig. 6 Spatial Characteristics of changes in water production

黄河流域 NDVI 和产水深度在 2001—2020 年的变化趋势均以增加为主,将 20 年来 NDVI 与产水深度的变化趋势进行结合分析(图 7)。其中 NDVI 增加而产水深度不明显变化的区域面积 $38.90 \times 10^5 \text{ km}^2$,占到总区域的 49.00%,集中分布在黄河流域中部和北部地区;NDVI 与产水深度均不明显变化的区域主要在黄河流域西北部,宁夏和内蒙古交界处、宁夏平原和河套平原连续分布,以及黄河流域的北部内蒙古境内以及黄河流域西部地区,面积 $17.00 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全区域的 21.00%;NDVI 与产水深度均增加的区域面积 $5.66 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全区域的 7.00%,在青海省东南部和甘肃省西南部交界处有一定范围的集中分布,在关中盆地和临汾盆地以及河南省的东北部块状分布。

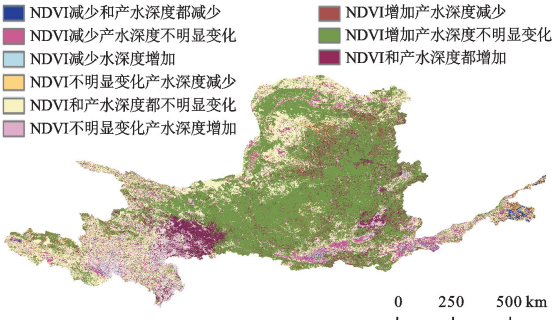


图 7 NDVI 与产水深度的变化趋势叠合分析

Fig.7 Overlapping analysis of trend changes between water pro-duction depth and NDVI

2.3 NDVI 与产水深度的相关性

为了探究 NDVI 与产水深度之间的相互关系,

其中,产水深度趋势不显著增加面积占比最多,达到 52.57%,主要分布在黄河流域中部、东北部黄河流域中游的大部分地区。20 年间黄河流域产水深度的变化趋势特征也主要是增加,其中以不显著增加为主,东部和北部部分地区存在产水深度趋势减少情况。黄河流域产水量随时间呈增长趋势(图 6),上游区域产水量最高且大于 500 亿 m^3 的子流域逐渐增加,300 亿~500 亿 m^3 产水量的区域在 2001—2010 年集中在上游区域,在 2020 年也扩张到黄河流域下游位置。

从年际数据进行相关性分析,NDVI 与产水深度 20 年年际均值数据通过 S—W 检验, $p > 0.05$ (表 5),均符合正态分布(图 8)。Pearson 相关分析表示,黄河流域 20 年来 NDVI 与产水深度正相关,相关性极显著,相关性系数为 0.75($r = 0.75, p < 0.01$)。

表 5 NDVI 和产水深度的正态检验

Table 5 Normal testing of NDVI and water production depth

指标	Shapiro—Wilk 检验		
	统计	自由度	显著性
NDVI	0.984	20	0.971
产水深度	0.930	20	0.155

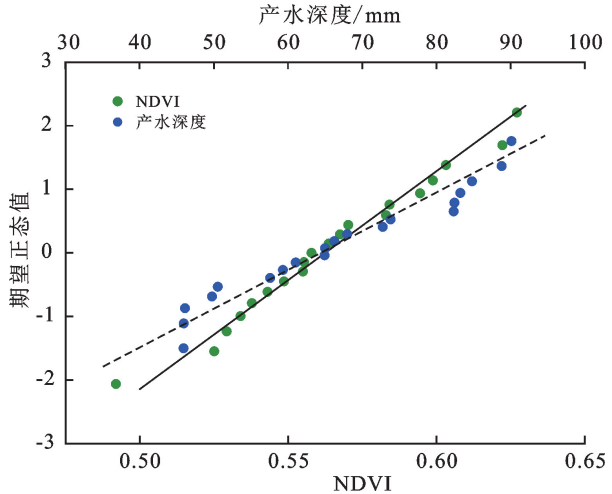


图 8 NDVI 和产水深度的正态分布 Q—Q 图

Fig.8 Q—Q diagram of normal distribution of NDVI and water production depth

分析 NDVI 与产水深度空间上的相关性,得到 2001—2020 年黄河流域植被覆盖与产水深度的相关情况(图 9),已通过 0.05 显著性检验,NDVI 与产水深度在空间上绝大部分地区表现出强相关性,图中蓝色区域表示正相关,橙色区域代表负相关,颜色愈深代表相关性愈强,正相关和负相关区域存在明显的分化,以东北—西南方向为界,西北部 and 北部地区 NDVI 与产水深度呈现出明显正相关的特征,而东南部和西南部地区负相关特征更明显。从位置上看,陇中黄土高原、内蒙古南部和宁夏东部表现出大范围的正相关,陕西省中南部,包括子午岭、关中盆地,山西省临汾盆地和运城盆地以及河南北部均呈现出明显的负相关。

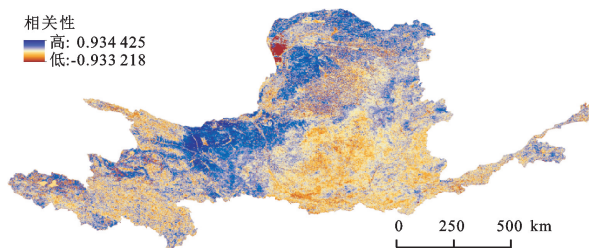


图 9 NDVI 与产水深度的空间相关性

Fig.9 Spatial correlation of NDVI with water depth

2.4 不同植被覆盖度的产水趋势变化

将黄河流域的植被情况划分为低植被覆盖度、较低植被覆盖度、中植被覆盖度、较高植被覆盖度和高植被覆盖度五类(图 10)。黄河流域植被覆盖度呈现出西北低、东南高,与付含培等^[28]的研究相符,植被覆盖情况的空间分布与 NDVI 和产水深度趋势变化

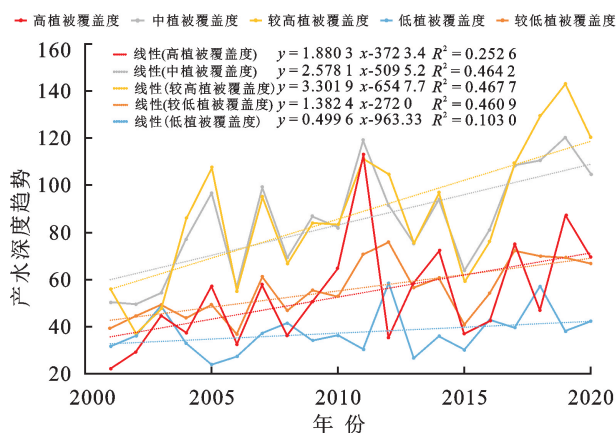


图 11 不同植被覆盖度产水深度的趋势变化及其与 NDVI 的正负相关占比

Fig.11 The trend change of water production depth of different vegetation cover and its positive and negative correlation with NDVI

3 讨论

黄河流域是我国重要的生态安全屏障区,生态问题突出,为了保护黄河流域的生态环境和实现高质量发展,政府实施了一系列生态建设工程。已有研究^[29-30]表明,20 年来黄河流域植被不断增多,产水量

的相关性在空间上有很程度的相似,从西北方向到东南方向都呈现出阶梯特征,故根据不同的植被覆盖度研究产水深度的变化。

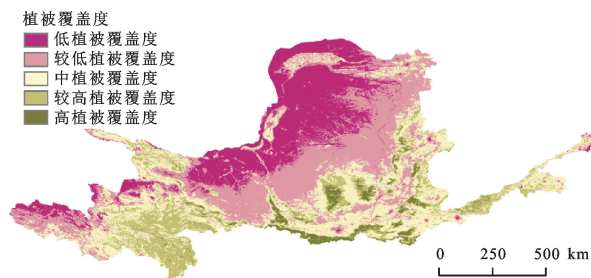
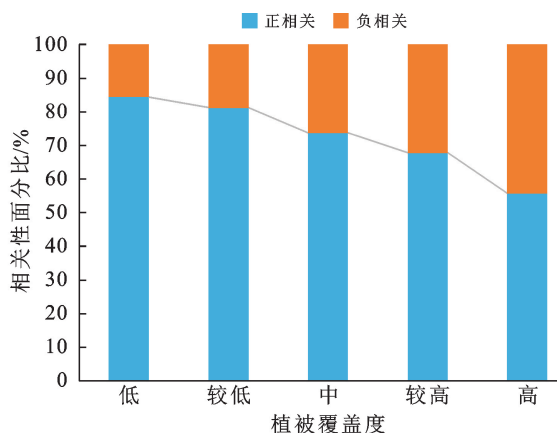


图 10 黄河流域的植被覆盖度空间格局分级

Fig.10 Vegetation cover grading in the Yellow River Basin

20 年来不同植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性表示,各类植被覆盖度与产水深度均以正相关为主,植被覆盖与产水深度正相关的面积比例都大于负相关(图 11)。其中黄河流域低植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性以正相关为主,正相关 84.40%,负相关 15.60%;较低植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性有 81.20%是正相关,18.80%负相关;总植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性,正相关 73.70%,负相关 26.20%;较高植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性,正相关占比 67.80%,负相关占比 32.20%;高植被覆盖度的 NDVI 与产水深度的相关性中 55.80%正相关,44.20%负相关。由此总结出,低植被覆盖度的区域的 NDVI 与产水深度的正相关性更为明显,而随着植被覆盖的程度逐渐增加,与产水深度的正相关性逐渐降低,负相关性逐渐增加。



与产水深度波动增加,生态质量改善,生态服务功能也不断提升。

黄河流域植被和水体都呈现增长趋势,这与侯鹏等^[31]的研究相符,黄河流域上游的 NDVI、产水深度和产水量都呈现出明显增加态势,尤其是在黄南与藏

南藏族自治州区域,甘南自治州是黄河、长江的水源涵养区和补给区,国家确定的生态主体功能区、生态文明先行示范区,故该区域植被覆盖和产水性能情况良好^[32]。在空间上,黄河流域产水量分布不均,历年来产水量多的区域集中在上游黄河源区,产水量和产水深度也在此区域内增加明显,黄河河源区为黄河最大的冰雪融水和降水补给区,也是黄河水资源的主要产水区之一^[33]。在空间上 NDVI 与产水深度存在明显的正负相关的分界区域,一是与黄河流域的气候变化及地形因素有关,其中降水是重要的影响因素,由于黄河流域东部和南部易受到东南季风的影响,气候湿润,有利于植被生长,但暖湿气流难以进入西北地区^[19]。已有研究^[18,34]表明,降水量不仅是黄河流域植被覆盖空间分布的决定性因素,也是影响产水服务的重要因素,产水深度对降水的变化敏感度很高,降水变化导致产水量的显著变化。除此之外,植被变化间接影响降水过程,从而影响产水量,也会导致二者呈现相关关系,东南地区得益于气候条件,植被覆盖与产水在年际上表现出正相关关系。二是黄河流域得益于植被恢复等生态建设工程,植被恢复影响大气水汽含量和大气湿度,导致降水增多,使得区域内产水服务也有所提升^[35]。较高植被覆盖度下的产水增长情况是最好的,低植被覆盖度的产水深度趋势增加是最不明显的,但随着植被覆盖度越高,其与产水深度的负相关性越强,是由于植被覆盖增加增强林冠截流,影响大气与地表间的水量和能量平衡关系,使得蒸腾作用明显,从而引起产水量下降^[35-36]。

适当的植被恢复措施对于黄河流域的产水服务有益,但同时要因因地制宜,避免在区域实施与自然环境不匹配的过度的人工植被,也避免不科学的植被恢复手段,如“小树龄”以免造成水资源减少的问题^[3,9]。近年来各界密切关注生态环境问题,黄河流域的植被与水资源关系一直是研究的焦点,InVEST模型在评估各类流域水资源产水服务方面虽被广泛应用和认可,但是模型只能尽量模拟,其设定运算不能完全反映现实情况,产水模块输入的因子也不能涵盖所有影响因素,且黄河流域范围广阔,各类因子在空间上差异巨大,用同一种参数来模拟不一定符合所有区域。除此之外,径流和水循环过程的量化复杂,对于植被与水循环之间相互影响的复杂机制和众多影响因素缺乏更具体更贴近实际的模拟研究,机制研究与定量分析等也需要在后续的研究中不断完善。

4 结论

(1)从变化趋势来看,2001—2020年黄河流域NDVI和产水深度均呈增长趋势($p < 0.001$),且

NDVI以显著增长为主,产水深度则以不明显的增长为主。产水量也逐渐增加,大于 $15 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的小流域逐渐增多。其中,在青海甘肃交界的黄南藏南自治州附近三者均呈现出显著增长。

(2)从相关性分析来看,黄河流域NDVI与产水深度在时间上表现出较强的正相关($p < 0.01$),且呈现出西北正相关—东南负相关的空间分化。

(3)不同的植被覆盖度下,产水深度的变化趋势不同,较高植被覆盖度下产水深度增加趋势最为明显。此外,随着植被覆盖度由低到高,NDVI与产水深度的正相关性减弱,负相关性增强,但正相关仍然占比更多。

黄河流域植被覆盖与产水服务在2001—2020年总体都表现出增长的态势,就目前来看,黄河流域进行的植被恢复并未使得流域内的产水服务功能减弱,但是同时也要注意流域内植被与水资源之间的联系,进行适度的植被恢复,促进产水功能良好发展。

参考文献:

- [1] 武正丽,贾文雄,刘亚荣,等.近10 a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.
- [2] 刘孟竹.北方农牧交错带“变绿”驱动下的产水量研究[D].河北 张家口:河北建筑工程学院,2022.
LIU M Z. Study on water yield driven by “greening” in the northern farming-pastoral ecotone [D]. Zhangjiakou, Hebei: Hebei Institute of Architecture and Engineering, 2022.
- [3] 周国逸,夏军,周平,等.不恰当的植被恢复导致水资源减少[J].中国科学:地球科学,2021,51(2):175-182.
ZHOU G Y, XIA J, ZHOU P, et al. Not vegetation itself but mis-revegetation reduces water resources [J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 51(2): 175-182.
- [4] 白鹏,刘小莽.汾河流域径流减少因素的定量解析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):842-850.
BAI P, LIU X M. Quantitative analysis of runoff reduction factors in the Fenhe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2022, 20(5): 842-850.
- [5] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10):1142-1149.
YANG D W, LEI H M, CONG Z T. Overview of the research status in interaction between hydrological processes and vegetation in catchment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [6] SHAO R, ZHANG B Q, SU T X, et al. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau,

- China[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2019, 124: 11783-11802.
- [7] DEKKER S C, RIETKERK M, BIERKENS M F P. Coupling microscale vegetation-soil water and macroscale vegetation-precipitation feedbacks in semiarid ecosystems[J]. *Globe Change Biology*, 2007, 13: 671-678.
- [8] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(11): 2105-2138.
- LI Z K, LI X Y, ZHOU S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(11): 2105-2138.
- [9] 苗旭, 李九一, 宋小燕, 等. 2000-2020 年鄂尔多斯市植被 NDVI 变化格局及归因分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 300-307.
- MIAO X, LI J Y, SONG X Y, et al. Analysis on change pattern and attribution of vegetation NDVI in Ordos City from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 300-307.
- [10] MONTSE M, RUBAB F B, VIKAS K. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystems services in the Francoliriver Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263: 224-232.
- [11] 赵亚茹, 周俊菊, 雷莉, 等. 基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3789-3799.
- ZHAO Y R, ZHOU J J, LEI L, et al. Identification of drivers for water yield in the upstream of Shiyang River based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3789-3799.
- [12] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.
- [13] 张耀文, 张勃, 姚荣鹏, 等. 2000—2020 年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 223-233.
- ZHANG Y W, ZHANG B, YAO R P, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 223-233.
- [14] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 52-60.
- MA Z G, FU C B, ZHOU T J, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1): 52-60.
- [15] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [16] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2431-2436.
- LU D D, SUN D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [17] 孙高鹏, 刘宪锋, 王小红, 等. 2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 205-212.
- SUN G P, LIU X F, WANG X H, et al. Changes in vegetation coverage and its influencing factors across the Yellow River Basin during 2001—2020[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 205-212.
- [18] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849-858.
- ZHANG Z Q, LIU H, ZUO Q T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000—2019[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 849-858.
- [19] 王晓蕾, 石守海, 陈江朝霞. 黄河流域植被覆盖度变化及驱动因素[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(11): 5358-5368.
- WANG X L, SHI S H, CHEN J Z X. Fractional vegetation cover change and its driving factors in the Yellow River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(11): 5358-5368.
- [20] 赵倩倩, 李建华, 张桂琴, 等. 气候变化背景下黄河流域植被变化及其成因[J]. *气候与环境研究*, 2022, 27(1): 157-169.
- ZHAO Q Q, LI J H, ZHANG G Q, et al. Vegetation changes and their causes in the Yellow River Basin under the background of climate change[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(1): 157-169.
- [21] 李雪银, 张志强, 孙爱芝. 1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究[J]. *地球环境学报*, 2022, 13(4): 428-436.
- LI X Y, ZHANG Z Q, SUN A Z. Study on the spatial-temporal evolution and influence factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin during 1982—2021[J].

- Journal of Earth Environment, 2022, 13(4): 428-436.
- [22] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报[EB/OL]. [2000—2019]. <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/2000.htm>.
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Yellow River Water Resources Bulletin[EB/OL]. [2000—2019]. <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/2000.htm>.
- [23] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [24] THEIL H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis[M]. Dordrecht: Springer, 1992.
- [25] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [26] KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86-91.
- [27] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide[EB/OL]. [2017-10-20]. <http://www.NaturalCapitalProject.Org>.
- [28] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999—2018年黄河流域NDVI时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 145-153, 162.
FU H P, WANG R H, WANG X J. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the Yellow River Basin during 1999—2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 145-153, 162.
- [29] 杜高奇, 李自强, 赵勇, 等. 基于RSEI的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(12): 81-93.
DU G Q, LI Z Q, ZHAO Y, et al. RSEI-based analysis on eco-environment quality monitoring and driving factors of Yellow River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(12): 81-93.
- [30] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
ZHAO A Z, ZHANG A B, LIU H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 449-460.
- [31] 侯鹏, 翟俊, 高海峰, 等. 黄河流域生态系统时空演变特征及保护修复策略研究[J]. 环境保护, 2022, 50(14): 26-28.
HOU P, ZHAI J, GAO H F, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and protection and restoration strategies of ecosystem in the Yellow River Basin[J]. Environmental Protection, 2022, 50(14): 26-28.
- [32] 马琳雅, 崔霞, 冯琦胜, 等. 2001—2011年甘南草地植被覆盖度动态变化分析[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 1-9.
MA L Y, CUI X, FENG Q S, et al. Dynamic changes of grassland vegetation coverage from 2001 to 2011 in Gannan Prefecture[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(4): 1-9.
- [33] 钱云平, 林银平, 金双彦, 等. 黄河河源区水资源变化分析[J]. 水利水电技术, 2004(5): 8-10.
QIAN Y P, LIN Y P, JIN S Y, et al. Analysis of water resources changes in the source region of the Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004(5): 8-10.
- [34] YANG D, LV W, TANG L Y, et al. Estimation of water provision services for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 182: 133-143.
- [35] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1080-1091.
ZHANG B Q, TIAN L, ZHAO X N, et al. Study on the feedback effect of vegetation restoration on Local Precipitation in the Loess Plateau[J]. Scientia Sinica: Earth Sciences, 2021, 51(7): 1080-1091.
- [36] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 594-606.
ZHANG B Q, SHAO R, ZHAO X N, et al. Effects of large-scale vegetation restoration on the eco-hydrological process in the Loess Plateau[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 594-606.