网络首发时间：2021-09-24 14:19:23
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210924.0840.002.html

第 42 卷第 8 期 生 态 学 报 Vol.42,No.8
2022 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2022

DOI: 10.5846/stxb202103020564
马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,李占斌,李鹏,张星.基于地理探测器的砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析.生态学报,2022,42(8).
Ma X N, Ren Z P, Xie M Y, Li Z B, Li P, Zhang X.Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector.Acta Ecologica Sinica,2022,42(8).

基于地理探测器的砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析

马晓妮[1],任宗萍[1,*],谢梦瑶[1],李占斌[1],李 鹏[1,2],张 星[1]
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, 西安 710048
2 西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048

摘要:砒砂岩区地形破碎,生态环境恶劣,降水量少且以暴雨为主,研究该区植被覆盖变化及环境驱动因子作用机制对区域植被建设具有重要的理论意义。本研究基于 1999—2018 年的 NDVI 数据分析了砒砂岩区近 20 年植被覆盖度时空变化特征,利用了地理探测器方法量化分析了不同环境因子对植被覆盖度的影响。结果表明:1)近 20 年砒砂岩区平均植被覆盖度为 42.3%,时间尺度上 1999—2018 年区域植被覆盖度呈增加趋势,平均上升幅度为 0.086/10 a,空间尺度上植被覆盖度呈现从东南向西北递减的空间分布特征;2)近 20 年区域植被覆盖整体得到改善要比退化的区域面积大,45.5%的区域面积植被覆盖度极显著增加,主要分布在砒砂岩区东部区域,该区植被覆盖度未来变化趋势将以持续性改善为主,但仍有约 41.6%的植被将由改善向退化方向变化;3)降水、土壤水分和气温是影响砒砂岩区植被覆盖空间分布的主导环境因子,且降水同其他环境因子的交互作用对植被覆盖影响最大。

关键词:砒砂岩区; 植被覆盖度;环境因子;地理探测器

Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector

MA Xiaoni[1], REN Zongping[1,*], XIE Mengyao[1], LI Zhanbin[1], LI Peng[1,2], ZHANG Xing[1]
1 *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*
2 *Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*

Abstract: The Pisha sandstone area is broken in topography, with little precipitation and mainly rainstorm, the ecological environment in the area is harsh. It is of great theoretical significance for regional vegetation construction to study the dynamic change of vegetation and explore the response characteristics of vegetation coverage to environmental factors. Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) from 1999 to 2018, this study analyzed the spatio-temporal change characteristics of vegetation coverage in the Pisha sandstone area. In addition, the geodetector was used to analyze the influence of different environmental factors on the change of vegetation coverage, then we determined the most suitable range and type of each factor to promote vegetation growth. The results show that: 1) In the past 20 years, the average vegetation coverage in the Pisha sandstone area was 42.3%. On the time scale, the regional vegetation coverage had an increasing trend from 1999 to 2018, with an average increase of 0.086/10 a. On the spatial scale, the vegetation coverage presents a distribution characteristic of decreasing from southeast to northwest. The vegetation coverage of the three areas changes from

基金项目:国家自然科学基金项目(42077074);国家重点研发计划(2017YFC0504501)
收稿日期:2021-03-02;
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: renzp@ xaut.edu.cn

large to small in order of soil-covered Pisha sandstone area, sand-covered Pisha sandstone area, and bare Pisha sandstone area. 2) In the past 20 years, the overall improvement of vegetation coverage in the Pisha sandstone area is greater than the degraded area. About 45.5% vegetation coverage of the regional area has increased obviously, mainly in the eastern part of the Pisha sandstone area whereas the significantly reduced areas were scattered in the middle of the bare area. The future trend of vegetation coverage in the Pisha sandstone area will be dominated by continuous improvement, accounting for 50.5% of the total area, mainly distributed in the southern soil-covered Pisha sandstone area. Although the vegetation in this area is showing an overall trend of improvement, it still faces greater challenges. About 41.6% of the vegetation is at risk of changing from improvement to degradation. 3) Precipitation, soil moisture and temperature are the dominant environmental factors that affect the spatial distribution of vegetation coverage in the region, while the slope and aspect have the weakest explanatory power for vegetation coverage. The interaction among environmental factors is dominated by a two-factor enhancement trend. As the dominant climate factor in the spatial distribution of vegetation coverage in this region, precipitation has the greatest influence on vegetation coverage under the interaction with other environmental factors.

Key Words: Pisha sandstone area; vegetation coverage; environmental factors; geodetector

植被作为陆地生态系统的主要组成部分,同气候变化关系紧密,在全球物质和能量的循环过程中起着至关重要的作用[1]。近年来,在全球气候变化以及人类活动的影响下,陆地植被发生着不同程度和方式的变化[2]。特别是进入 20 世纪 80 年代以来,全球范围内的植被覆盖率一直在持续增加,成为生物圈变化最显著的特征之一[3]。其中,近 30 年来中国归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)呈增加趋势的面积占比达 53.8%,极显著增加的面积达 29.3%[4]。黄土高原作为退耕还林还草工程实施的重点区域,是我国植被覆盖变化最显著的地区,约 43.4%的区域植被覆盖度呈显著改善[5]。因此,掌握该区植被动态变化以及探索退耕后植被覆盖度对环境因子的响应特征至关重要。

旱区的植被覆盖率增加主要受降水、温度、土壤类型和植被类型的影响,位于干旱半干旱地区的黄土高原,其不同区域的植被恢复对水热条件的响应也不尽相同[6-7]。砒砂岩区位于黄土高原北部,地形破碎,降水量少且以暴雨为主,土壤类型以砒砂岩土、黄绵土、风沙土为主,土层较薄,抗冲抗蚀性较差,难以满足大多数植物生长的需求,导致该区植被覆盖特征以及其驱动因子有别于典型的黄土区[8]。砒砂岩区受风力、水力、冻融等作用,区域内侵蚀剧烈,为黄河粗泥沙的集中来源区,植被恢复是该区域主要的治理措施之一[9]。近年来先后实施了一系列项目对区域生态环境状况进行治理,但由于该区生态环境波动性明显,原生环境极易受到损坏,面对全球气候变化,脆弱而敏感的砒砂岩地区近十几年来植被发生的变化以及与环境因子的关系有待考究[10-12],而且现有关于砒砂岩区植被变化特征及其影响因子研究中,综合考虑多因子对植被覆盖度的响应研究较少。

地理探测器是一种新的空间分析模型,主要是用于探测地理要素的空间分异性,定量化多环境驱动因子对植被覆盖度的直接和间接作用[13]。因此本文基于 1999—2018 年的 NDVI 数据,结合气象数据、土壤数据以及 DEM 数据,通过 Mann-Kendall 趋势检验、Hurst 指数分析砒砂岩区 1999—2018 年植被覆盖度时空变化特征,利用地理探测器方法分析气候、土壤、地形等因子对植被覆盖变化的解释力,确定促进植被生长的环境因子最适宜的范围和类型,对砒砂岩区生态效益的合理评估以及进一步的植被建设等具有重要的理论和实践意义。

1 研究区概况

砒砂岩区位于 38°10′—40°10′N,108°45′—111°31′E,是黄土高原侵蚀最剧烈的区域,主要分布在内蒙古自治区鄂尔多斯市的东胜区、准格尔旗、伊金霍洛旗、达拉特旗、杭锦旗,在陕西省的神木、府谷两县,山西省的河曲、保德两县,内蒙古的清水河县有零星分布[14]。研究区总面积 1.67 万 km^2,主要包括了鄂尔多斯盆地在

中生代形成的地层中的砂岩、粉砂岩和泥岩等多种沉积岩,该区西北部为低丘陵地貌,东南部为高丘陵地貌,最东部黄河西岸为低山地貌[15]。属于暖温带北缘半干旱大陆气候,年平均气温 6.5—9.6℃,年平均降雨量 315—442mm,年平均蒸发量 2200—2600mm。根据地被物类型及覆盖程度将其分为覆土砒砂岩区、覆沙砒砂岩区、裸露砒砂岩区三种类型(图 1)。

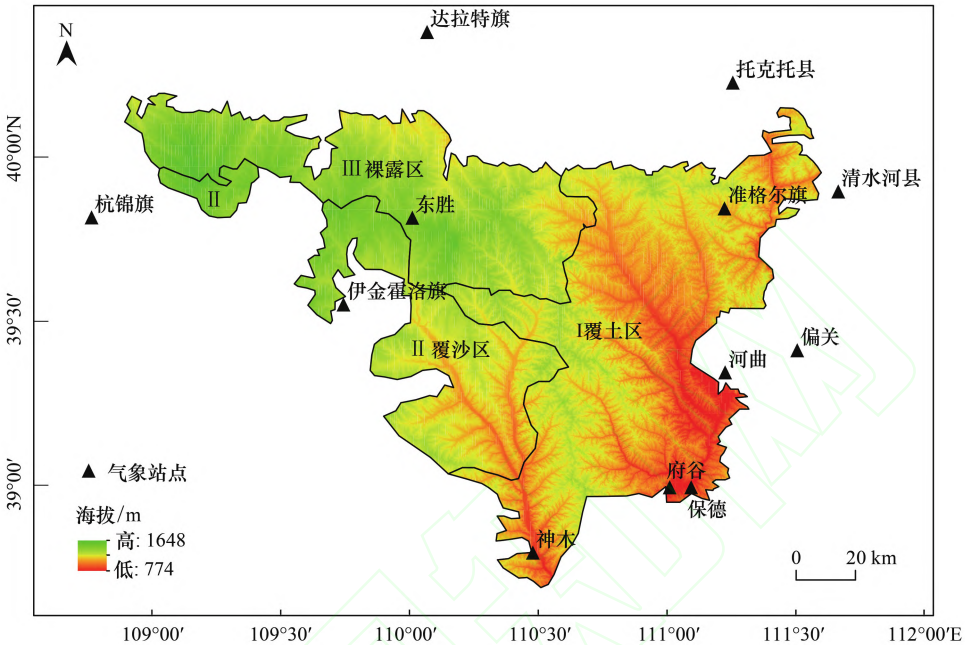

图 1　砒砂岩区位置图

Fig.1　Location map of the Pisha sandstone area

2　数据与方法

2.1　数据来源与处理

遥感数据:砒砂岩区 1999—2018 年 NDVI 数据(分辨率 1000m),来源于资源环境科学数据中心的中国年植被指数(NDVI)空间分布数据集(http://www.resdc.cn)。数字高程模型(分辨率 30m)、土地利用数据(分辨率 30m),来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。土壤类型数据(分辨率 1000m),来源于联合国粮农组织网(http://www.fao.org)。土壤体积含水量数据(分辨率 0.0625°×0.0625°),来源于中国气象数据网 CLDAS-V2.0(http://data.cma.cn)。利用 Arcgis10.2 软件对以上遥感数据进行投影转换和掩膜提取,并重采样为 1000m 分辨率的空间数据。

气象数据:1999—2018 年砒砂岩区及其周边共 12 个气象站点的日降雨量以及日平均气温数据(图 1),来源于资源环境科学与数据中心的中国气象要素站点观测逐日数据集;基于反距离权重内插法生成 1000m 分辨率栅格数据。

地理探测器输入数据处理:基于 Arcgis10.2 软件创建渔网工具,生成 1km×1km 格网,共 15732 个格点作为采样点,采用自然断点法将年均降水量、年均气温、土壤水分、海拔、坡度分为 9 类,坡向分为 9 类(表 1),土壤类型分为 17 类,土地利用分为 6 类,提取植被覆盖度及各个环境因子数据至采样点输入地理探测器软件,用于分析植被覆盖度与环境因子之间的关系。

2.2　研究方法

2.2.1　植被覆盖度计算

根据像元二分模型原理推求砒砂岩区植被覆盖度,计算公式如下[16]:

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \tag{1}$$

其中：

$$NDVI_{soil}=\frac{FVC_{max}\cdot NDVI_{min}-FVC_{min}\cdot NDVI_{max}}{FVC_{max}-FVC_{min}} \tag{2}$$

$$NDVI_{veg}=\frac{FVC_{max}\cdot NDVI_{max}-FVC_{min}\cdot NDVI_{max}}{FVC_{max}-FVC_{min}} \tag{3}$$

式中：$NDVI_{soil}$为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值，$NDVI_{veg}$则代表完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值。$NDVI_{max}$、$NDVI_{min}$分别为归一化植被指数的最大值和最小值。

表 1 环境因子自然断点法分区

Table 1 Classification of environmental factors by natural breaks

分区 Partition	年均降水量 Annual average precipitation/mm	年均气温 Annual average temperature/℃	土壤水分 Soil moisture/ (m^3/m^3)	高程 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect
1	315—343	6.48—6.85	0.09-0.10	774—956	0—3.84	平坡
2	343—364	6.85—7.17	0.10-0.13	956—1053	3.84—6.53	北坡
3	364—379	7.17—7.54	0.13-0.17	1053—1130	6.53—9.14	东北坡
4	379—390	7.54—7.84	0.17-0.18	1130—1195	9.14—11.89	东坡
5	390—400	7.84—8.11	0.18-0.19	1195—1257	11.89—14.96	东南坡
6	400—409	8.11—8.41	0.19-0.20	1257—1320	14.96—18.52	南坡
7	409—419	8.41—8.74	0.20-0.22	1320—1390	18.52—22.95	西南坡
8	419—429	8.74—9.13	0.22-0.23	1390—1467	22.95—29.33	西坡
9	429—442	9.13—9.58	0.23-0.26	1467—1648	29.33—65.81	西北坡

由于采用的是最大值合成法生成的植被指数数据集，参考相关文献[16]，近似取 FVC_{max}为 100%，FVC_{min}为 0%，即公式可变为

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \tag{4}$$

为避免噪声影响，$NDVI_{max}$、$NDVI_{min}$一般取累积概率 5%和 95%的 NDVI 作为区域最小和最大的 NDVI 值。

2.2.2 植被覆盖度变化趋势分析方法

本研究采用变异系数(Cv)表示砒砂岩区植被覆盖度变化的稳定性，分别采用 Mann-Kendall 方法和 Hurst 指数逐像元分析近 20 年区域植被覆盖度变化趋势以及未来变化趋势。

(1)变异系数(Cv)

变异系数 Cv 反映的是相对变异，即随机变量的离散程度，计算公式为：

$$Cv=\sigma/\mu \tag{5}$$

式中：σ 为标准差；μ 为均值。

根据 Nielsen 的划分标准，当 $Cv \leqslant 10\%$、$10\% < Cv < 100\%$、$Cv \geqslant 100\%$时，依次为弱变异、中等程度变异和强变异[17]。

(2)Mann-Kendall 趋势检验及 Sen 倾斜度

Mann-Kendall 是水文气象时间序列数据趋势检验中使用最广泛的非参数检验方法，其优点是不需要样本遵循特定的分布，且不受异常值的干扰，用于分析近 20 年砒砂岩区植被覆盖度变化趋势，具体公式见文献[18]。

趋势性大小以及变化方向使用 Sen 倾斜度表示[19]，其中 β 的计算公式如下：

$$\beta = \text{median}\left(\frac{\text{FVC}_j - \text{FVC}_i}{j - i}\right), 1 < i < j < n \tag{6}$$

式中:β 表示植被覆盖度上升或下降的趋势,其中 $\beta > 0$ 代表植被覆盖度呈上升趋势,$\beta < 0$ 代表植被覆盖度呈下降趋势。

(3)Hurst 指数

Hurst 指数可判断时间序列未来变化的趋势,多用于定量描述长时间序列信息相关性,其取值范围为 H ($0<H<1$),具体计算原理见文献[20]。当 $0<H<0.5$ 时,表明植被覆盖序列具有反持续性,即未来趋势与过去相反,H 越小反持续性越强;$H=0.5$ 时,表明植被覆盖序列为随机序列,不存在长期相关性;$0.5<H<1$ 时,表明植被覆盖序列具有持续性,H 越大持续性越强。将 Sen 趋势分析的分级结果同 Hurst 指数结果叠加处理,获得持续性变化趋势。

2.2.3　植被覆盖度驱动因子定量分析方法

(1)地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,本论文应用了地理探测器中的因子探测器,交互探测器,风险探测器以及生态探测器来研究植被驱动力以及多因子交互作用[21]。因子探测器主要探测不同环境因子对 FVC 空间分异的影响大小,其中 q 值越高,影响力越大,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^{\ 2}}{N\sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \tag{7}$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 \tag{8}$$

式中:h 为 FVC 值影响因子的分类或分区;N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数;$\sigma_h^{\ 2}$ 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差,q 的值域为[0,1]。

交互探测器主要是识别不同因子之间的交互作用,即评估两个因子共同作用时是否会增加或减弱对 FVC 的解释力或这些因子对 FVC 的影响是相互独立的。评估方法是首先分别计算两种影响因素 $X1$ 和 $X2$ 对 Y 的 q 值,并且计算它们交互时的 q 值,对三者之间的 q 值大小进行比较,主要分为以下几种结果(表 2)。

表 2　交互探测器判断依据

Table 2　Judgment basis of interaction detector

判断依据 Judgments based	交互作用 Interaction	判断依据 Judgments based	交互作用 Interaction
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强		

生态探测器用于比较两因子对 FVC 空间分布的影响是否有显著差异,用 F 统计量来检验:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{x2} - 1)\ \text{SSW}_{X1}}{N_{X2}(N_{x1} - 1)\ \text{SSW}_{X2}} \tag{9}$$

式中:N_{X1} 和 N_{X2} 表示两因子的样本量;SSW_{X1} 和 SSW_{X2} 表示两因子形成分层的层内方差之和。

风险探测器用于探测不同环境因子对 FVC 影响的适宜范围或类型,用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(Y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(Y_{h=2})}{n_{h=2}}\right]^{1/2}} \tag{10}$$

式中:$\bar{Y}_h$ 为子区域 h 内 FVC 的均值;n_h 为子区域 h 内的样本数量;Var 为方差。

(2)偏相关分析

偏相关分析用于进一步探究砒砂岩区植被覆盖度对单因子降水和气温的响应,计算公式:

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xa}R_{xz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^{2})}\sqrt{(1-R_{yz}^{2})}} \tag{11}$$

式中:$R_{xy,z}$ 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数;R_{xy} , R_{xz} , R_{yz} 为两因子间的相关系数;x 为植被覆盖度,y 为年降水量,z 为年均气温。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度时空特征

基于砒砂岩区 NDVI 数据集(1999—2018 年)提取了该区植被覆盖度,用于分析砒砂岩区植被时空变化特征。砒砂岩区平均植被覆盖度年际变化如图 2 所示,区域内植被覆盖度总体呈波动上升趋势,平均上升幅度为 0.086/10a。根据砒砂岩区平均植被覆盖度年际变化图,2013 年区域平均植被覆盖度在研究时段内达到最大值(56.5%),将 2013 年植被覆盖度与 1999 年及 2018 年区域植被覆盖度进行成对样本 T 检验,结果显示,1999 年和 2018 年的区域植被覆盖度与 2013 年相比均存在显著性差异($P<0.01$),2013 年植被覆盖相比 1999 年显著增加,而与 2018 年相比出现减少趋势,表明该区植被覆盖度敏感性较强。

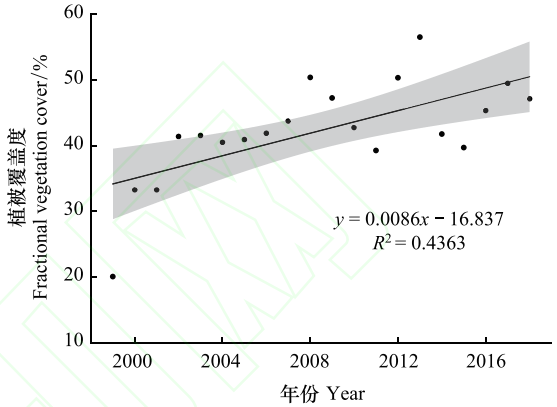

图 2 砒砂岩区平均植被覆盖度年际变化图

Fig.2 Annual variation of mean vegetation coverage in the Pisha sandstone area

阴影代表 95%置信区间

统计 1999—2018 年平均植被覆盖度,并根据 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》[22],即 10%、30%、45%、60%四个节点将砒砂岩区分为裸地、低植被覆盖度、中低植被覆盖度、中植被覆盖度、高植被覆盖度 5 个等级,得到砒砂岩区多年平均植被覆盖度空间分级图(图 3)。砒砂岩区多年平均植被覆盖度为42.3%,空间上总体呈现出东南高、西北低的空间格局,即覆土区>覆沙区>裸露区。分别统计各砒砂岩分区不同植被覆盖度等级的面积比例可知覆土区处于中植被覆盖度水平,该等级面积占比 57.1%;覆沙区与裸露区以中低植被覆盖度为主,占比分别是 56.1%、48.4%。

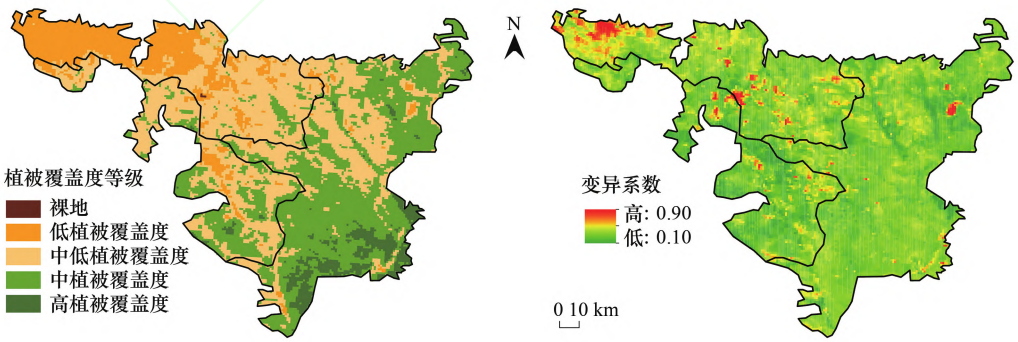

图 3 1999—2018 年砒砂岩区平均植被覆盖度等级及变异系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average vegetation coverage grade and coefficient of variation in the Pisha sandstone area from 1999 to 2018

砒砂岩区近 20 年植被覆盖度年均空间变化范围为 4.8%—89.5%,变异系数空间变化范围为 0.10—0.90(图 3),整个砒砂岩区植被覆盖度变化均属于中等程度变异。由表 3 可知,四个分区中,覆土区植被覆盖度最

大,均值为 49.0%,平均变化率为 0.096/10 a,变异系数最小,最稳定,而裸露区植被覆盖度最小,均值为 30.7%,生态系统比其他类型区脆弱。

表 3　不同砒砂岩区植被覆盖度变化的统计特征

Table 3　Statistical characteristics of vegetation coverage changes in different Pisha sandstone areas

分区 Subarea	平均值 Mean/%	变化率 Changing rate/10 a^{-1}	变异系数 *Cv*
覆土砒砂岩区 Soil-covered Pisha sandstone area	49.0	0.096	0.17
覆沙砒砂岩区 Sand-covered Pisha sandstone area	41.6	0.074	0.22
裸露砒砂岩区 Bare Pisha sandstone area	30.7	0.056	0.27

3.2　植被覆盖度变化趋势分析

1999—2018 年砒砂岩区植被覆盖变化趋势图(图 4)表明,呈增加趋势的面积为 15383.58km^2,约占砒砂岩区总面积的 92.2%;呈减少趋势的面积为 1322.64km^2,约占砒砂岩区总面积的 7.8%。正值区域大于负值区域面积,表明近 20 年砒砂岩区植被有改善的趋势。由表 4 可知,植被覆盖度极显著增加的面积占 45.6%,主要分布在覆土区和覆沙区,两者分别占 25.6%和 10.2%;显著增加的面积占砒砂岩区总面积的 16.8%,其中裸露区显著增加的面积为 4.5%。显著与极显著增加的区域基本相同,主要分布在砒砂岩区东部区域。显著和极显著减少的区域面积占比分别为 0.6%和 0.5%,零星分布在裸露区中部。总的来说,砒砂岩区植被覆盖度整体得到改善的面积比例远大于退化。

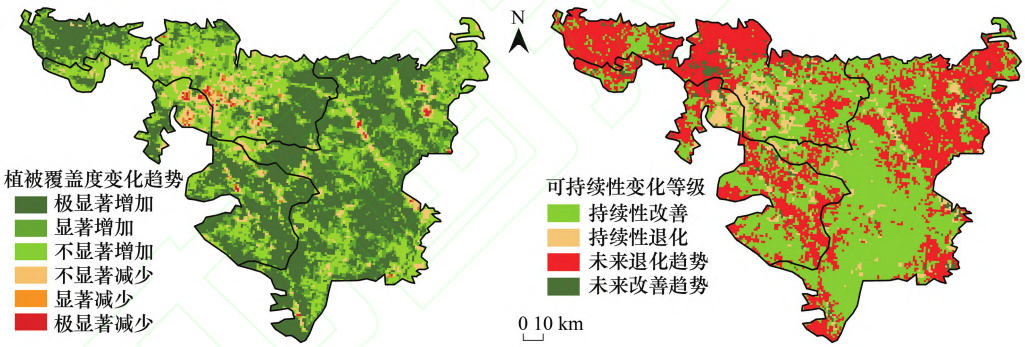

图 4　砒砂岩区植被覆盖度变化趋势及可持续性变化等级空间分布

Fig.4　Spatial distribution of vegetation coverage change trend and the sustainable change grades in the Pisha sandstone area

表 4　不同砒砂岩区植被覆盖度空间变化趋势面积占比统计/%

Table 4　Statistics on the spatial variation trend of vegetation coverage in different Pisha sandstone areas

分区 Subarea	$\beta>0$			$\beta<0$		
	$P<0.01$	$0.01<P<0.05$	–	$P<0.01$	$0.01<P<0.05$	–
覆土砒砂岩区 Soil-covered Pisha sandstone area	25.6	9.5	13.4	0.2	0.1	2.3
覆沙砒砂岩区 Sand-covered Pisha sandstone area	10.2	2.8	6.1	0.1	0.2	1.7
裸露砒砂岩区 Bare Pisha sandstone area	9.8	4.5	10.3	0.2	0.3	2.7
合计 Total	45.6	16.8	29.8	0.5	0.6	6.7

$P<0.01$.极显著;$0.01<P<0.05$.显著;–:不显著

砒砂岩区 1999—2018 年植被覆盖度的 Hurst 指数介于 0.23-0.99 之间,植被覆盖度呈正向持续性变化(Hurst>0.5)的区域占总面积的 56.2%,反向持续变化(Hurst<0.5)面积比重为 43.8%。说明砒砂岩区植被覆

盖度变化将在短期内保持现有的发展趋势,即未来植被覆盖度的变化呈现正向趋势。Hurst 指数按照砒砂岩分区进行统计可知(图 4),砒砂岩区植被持续性变化趋势主要以持续性改善为主,面积占比 50.5%,主要分布在覆土区南部,植被由改善向退化方向变化的面积约占 41.6%,主要分布在覆土区东北部以及裸露区西北部,植被由退化向改善方向变化的面积约 2.4%,零星分布在裸露区中部,其余 5.6%的植被呈持续性退化趋势。

3.3 植被覆盖度变化驱动因子量化

为了探究不同环境因子对砒砂岩区植被覆盖度空间分布的影响,选取 8 种因子并对其进行地理探测器分析,得到影响因子的解释力 q 值(见表 5)。解释力从大到小依次为降水、土壤水分、气温、海拔、土壤类型、土地利用类型、坡度和坡向($P<0.01$)。降水、土壤水分和气温的 q 值均大于 0.5,是区域内植被覆盖空间分布的主导环境因子。土壤类型的 q 值为 0.333,与海拔 q 值(0.319)接近,即对植被覆盖空间分布的解释力中等,坡度和坡向对植被覆盖的解释力最弱,q 值分别为 0.054 和 0.003。

表 5 1999—2018 年砒砂岩区环境因子对植被覆盖的解释力

Table 5 The explanatory power of environmental factors in the Pisha sandstone area on vegetation coverage from 1999 to 2018

环境因子 Environmental factors	Pre	Tem	ST	SM	Lucc	Elevation	Slope	Aspect
q 值 q statistic	0.582	0.533	0.333	0.540	0.096	0.319	0.054	0.003
显著性 Significance	0	0	0	0	0	0	0	0

Pre 为降水,Tem 为气温,ST 为土壤类型,SM 为土壤水分,Lucc 为土地利用,Elevation 为海拔,Slope 为坡度,Aspect 为坡向

双因子交互作用下会加强对植被覆盖度的解释力(图 5),坡向同其他因子交互时均为非线性增强趋势,其余各因子交互均为双因子增强趋势。其中,降水∩土壤水分(q 值为 0.651)、气温∩土壤水分(q 值为 0.647)、土壤类型∩土壤水分(q 值为 0.641)和降水∩土壤类型(q 值为 0.628)对砒砂岩区植被覆盖空间分布的解释力较大。由此可以看出,降水作为砒砂岩区植被覆盖空间分布的主导气候类因子,在同其他环境因子的交互作用下,对植被覆盖度影响最大。

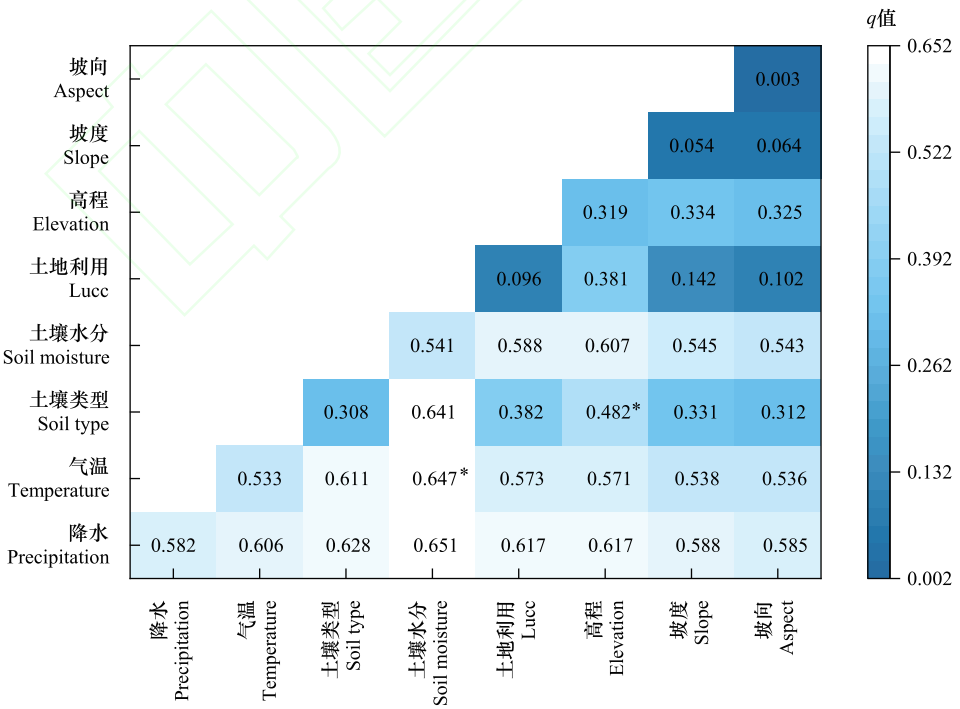

图 5 1999—2018 年砒砂岩区各环境因子交互探测解释力(q)以及生态检测

Fig.5 The interactive detection explanatory power (q) and ecological detection of various environmental factors in the Pisha sandstone from 1999 to 2018

* 双因子间无显著差异

土壤类型单因素对该区域植被覆盖度的解释力较弱,但同土壤水分的交互作用解释力较大(q 值为 0.641),表明土壤类型在满足一定的土壤水分时对植被覆盖度产生显著的影响。此外,为检测双因子间对植被覆盖度空间分布是否存在显著差异,对各因子做生态探测,结果表明:土壤水分和气温、土壤类型和海拔对植被覆盖度空间分布无显著差异(检测值为 N),其余各因子间均有显著性差异($P<0.05$),说明土壤水分和气温对植被空间分布具有相似的机理,二者的解释力值也较相近。

土地利用、坡度以及坡向对植被覆盖度的解释力不超过 0.1,即使在交互作用下,对区域植被覆盖度的影响也较低,因此本研究选取年均降水量、年均气温、土壤类型、土壤水分、高程输入风险探测器以确定各环境因子促进植被生长的适宜范围或类型,其中植被覆盖度均值越大,相对应的环境因子范围或类型更适合植被生长。对于气候因子来说,年均降水量划分为 9 个分区,其中各分区的年均降水量范围分别是 315—343、343—364、364—379、379—390、390—400、400—409、409—419、419—429、429—442 mm。在年均降水量>429 mm 时,植被覆盖度均值最大,其中>429 mm 的区域占砒砂岩区域面积 9.9%,且有统计检验表明,该分区(429—442 mm)同其他分区具有显著性差异($P<0.05$)。同样,年均气温也划分为 9 个分区,数值越大表明温度越高,在 9 分区(9.1—9.6℃),植被覆盖度均值最大为 58.0%。

不同土壤类型的植被覆盖度呈波动变化(表 6),其中潜育雏形土、饱和薄层土以及石灰性雏形土更适宜植被生长,植被覆盖度均值最大分别为 57.1%、56.0%、52.0%。土壤水分与植被覆盖度呈正相关,最适宜的分区为 9 分区,即满足土壤水分在 0.23-0.26 m^3/m^3 范围下,植被覆盖度可达 55.1%。对于不同的高程范围,植被覆盖度均值随着高程的增加而降低,在 1 分区(774—956 m)达到最大值 51.0%。

表 6　不同环境因子的适宜范围或类型

Table 6　Suitable ranges or types of different environmental factors

	因子 Factors	植被覆盖度 FVC/%	范围/类型 Range/Type
气候因子 Climate factors	Pre	56.4%	429—442mm
	Tem	58.0%	9.13—9.58℃
下垫面因子 Underlying surface factors	ST	57.1%	潜育雏形土
		56.0%	饱和薄层土
		52.0%	石灰性雏形土
	SM	55.1%	0.23-0.26m^3/m^3
	Elevation	51.0%	774—956m

4　讨论

植被对环境变化相当敏感,尤其是在半干旱地区,气候是对植被生长具有决定性影响的自然驱动力[23]。全球半干旱地区的植被绿化受降水控制的区域约 50%,受气温控制的约 7%[24]。砒砂岩区降水量稀少,且区域雨热同期,土壤水分主要靠降水量补给[25]。肖强[26]等研究发现黄土高原西北部的植被覆盖度与降水呈显著正相关,而与温度呈显著负相关。He[27]等发现黄土高原 90.12%的区域降水和 NDVI 呈正相关,且通过显著性检验的区域主要分布在黄土高原北部地区。黄土高原地处干旱半干旱区,降水是限制该区域植被生长的主要因子,具体表现为植被覆盖度随着降水的增加而增大[28]。本研究也进一步证实了降水是主要的影响因素,在砒砂岩区不同的区域,植被覆盖度同降水以及气温的偏相关性方向以及程度均有不同(图 6),其中降水同植被覆盖度呈正相关的区域面积占 96.8%,且 69.7%的面积显著正相关($P<0.05$),年均气温同植被覆盖度呈负相关的区域面积占比 68.5%,仅 3.9%的区域面积通过显著性检验。温度升高会导致地面水分蒸发增加,以至于出现土壤干化现象,对植被的生长不利[29]。在半干旱地区,气温主要是调节了植被的年内生长规律,同降水相比来说,气温与植被的年际变化相关性一般较小,降水对植被覆盖的影响更加敏感,是西北干旱区植被变化的关键因子[30]。

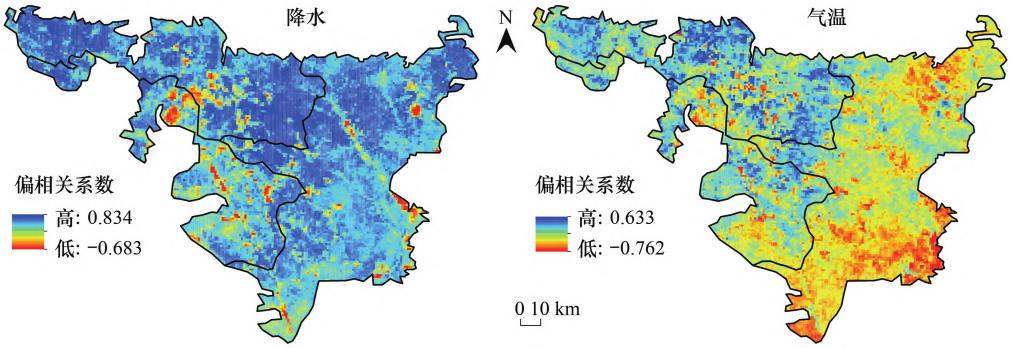

图 6 植被覆盖度同降水与气温的偏相关系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of partial correlation coefficient between vegetation coverage and precipitation and temperature

砒砂岩区 1999—2018 年植被生长状况整体呈增加趋势,该结论同之前的研究结果是一致的[31]。而本论文中进一步指出,该区植被总体虽呈现向好趋势,但是仍旧面临较大的挑战。植被这种向好态势一方面与地区气象环境关联较密,一方面也与区域治理措施相关。为恢复黄土高原生态环境状况,自 1999 年以来实施退耕还林工程,其中约 2×10^6公顷的耕地变为草地和森林,该区近 80%的区域植被覆盖率增加[32]。砒砂岩区地形破碎,生态环境恶劣,针对于该区域的治理,国家先后实施了沙棘资源建设,国家生态工程建设等水土保持项目[33]。虽然取得了一定成效,对当地生态环境的改善具有重要意义,但受该地区自身雨热条件限制,这些措施的作用仍然是有限的,砒砂岩地区的生态恶化和水土流失问题依然没有得到完全有效的解决,区域植被建设进入了一定瓶颈期。同时也有研究表明陕甘宁地区 15 年来植被虽有一定程度的恢复,但由于能源设施以及矿产资源的开发,北部地区植被退化的风险越来越大,植被覆盖度未来退化趋势面积占比达 58.7%[34-35]。因此,研究该区植被覆盖特征并量化环境驱动因子的影响,能够针对覆土、覆沙、裸露砒砂岩区不同环境背景条件下合理优化植被格局,对于维系该区植被建设成果,实现区域生态保护同资源利用协调发展具有重要意义。

5 结论

本研究分析了近 20 年砒砂岩区的植被覆盖度变化及未来变化趋势,并利用地理探测器定量分析了不同环境因子对植被覆盖度的影响,具体结论如下:

(1)1999—2018 年砒砂岩区植被覆盖度呈增加趋势,平均上升幅度为 0.086/10a,多年平均植被覆盖度为 42.3%。空间上,砒砂岩区植被覆盖度呈现从东南向西北递减的空间分布特征,其三个区的植被覆盖度从大到小变化依次是覆土区、覆沙区、裸露区。

(2)近 20 年砒砂岩区植被覆盖度得到改善的比重较大,其中 45.5%的区域呈极显著增加,主要分布在覆土区和覆沙区,显著和极显著减少的区域零星分布在裸露区中部。该区植被覆盖度未来变化趋势以持续性改善为主,面积占比 50.5%,主要分布在覆土区南部,虽然区域植被总体呈向好趋势,但是仍旧面临较大挑战,约 41.6%的植被存在由改善向退化转变的风险。

(3)降水、土壤水分和气温是影响区域内植被覆盖空间分布的主导环境因子,坡度和坡向对植被覆盖的解释力最弱;环境因子间的交互作用以双因子增强趋势为主,其中降水∩土壤水分解释力最高为 0.651,各因子对砒砂岩区植被生长的影响均有其适宜的范围/类型,研究结果为该区域下一步植被恢复工作提供相应科学依据。

参考文献(References):

[1] Yin G, Hu Z Y, Chen X, Tiyip T. Vegetation dynamics and its response to climate change in Central Asia. Journal of Arid Land, 2016, 8(3):

375-388.
[2] Jiang H L, Xu X, Guan M X, Wang L F, Huang Y M, Jiang Y. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastural transitional zone of northern China from 2000 to 2015. Science of the Total Environment, 2020, 718: 134871.
[3] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.
[4] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982-2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
[5] Li G, Sun S B, Han J C, Yan J W, Liu W B, Wei Y, Lu N, Sun Y Y. Impacts of Chinese grain for green program and climate change on vegetation in the Loess Plateau during 1982-2015. Science of the Total Environment, 2019, 660: 177-187.
[6] Du Z Q, Zhang X Y, Xu X M, Zhang H, Wu Z T, Pang J. Quantifying influences of physiographic factors on temperate dryland vegetation, Northwest China. Scientific Reports, 2017, 7(1): 40092.
[7] Li P, Wang J, Liu M M, Xue Z H, Bagherzadeh A, Liu M Y. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015. CATENA, 2021, 203: 105331.
[8] 姚文艺, 李长明, 张攀, 王愿昌. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望. 人民黄河, 2018, 40(6): 1-7, 65-65.
[9] Liang Z S, Wu Z R, Yao W Y, Noori M, Yang C Q, Xiao P Q, Leng Y B, Deng L. Pisha sandstone: causes, processes and erosion options for its control and prospects. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(1): 1-8.
[10] 王文龙. 晋陕蒙地区的生态环境特征及其研究. 水土保持通报, 1997, 17(S1): 90-93.
[11] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 李克南. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-110.
[12] Xie M Y, Ren Z P, Li Z B, Li P, Shi P, Zhang X M. Changes in runoff and sediment Load of the Huangfuchuan River following a water and soil conservation project. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 75(5): 590-600.
[13] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
[14] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 闵德安, 常玉忠, 张绒君. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
[15] 石迎春, 叶浩, 侯宏冰, 毕志伟. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析. 地球学报, 2004, 25(6): 659-664.
[16] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
[17] Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field//Hillel D, ed. Applications of Soil Physics. Amsterdam: Elsevier, 1980: 319-344.
[18] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, Kisi O. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. Water, 2019, 11(9): 1855.
[19] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
[20] Hurst H E. Methods of using long-term storage in reservoirs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1956, 5(5): 519-543.
[21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
[22] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 3-12.
[23] Gu Z J, Duan X W, Shi Y D, Li Y, Pan X. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China. Ecological Indicators, 2018, 93: 54-64.
[24] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbow C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 144-158.
[25] 陈敏玲, 张兵伟, 任婷婷, 王姗姗, 陈世苹. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(7): 658-668.
[26] 肖强, 陶建平, 肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力. 生态学报, 2016, 36(23): 7594-7602.
[27] He P, Xu L S, Liu Z C, Jing Y D, Zhu W B. Dynamics of NDVI and its influencing factors in the Chinese Loess Plateau during 2002-2018. Regional Sustainability, 2021, 2(1): 36-46.
[28] 钟莉娜, 赵文武. 基于 NDVI 的黄土高原植被覆盖变化特征分析. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 57-62.
[29] Ma X F, Zhu J T, Wang Y, Yan W, Zhao C Y. Variations in water use strategies of sand-binding vegetation along a precipitation gradient in sandy regions, northern China. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126539.
[30] Xie B N, Jia X X, Qin Z F, Shen J, Chang Q R. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982-2011. Regional Environmental Change, 2016, 16(6): 1583-1594.
[31] 王瑞杰, 闫峰. 2000-2018 年西北砒砂岩区植被覆盖度与地形效应. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1194-1202.
[32] Kou P L, Xu Q, Jin Z, Yunus A P, Luo X B, Liu M H. Complex anthropogenic interaction on vegetation greening in the Chinese Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146065.
[33] 吴永红, 胡建忠, 闫晓玲, 刘晓静, 左涛鸣. 砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 68-73.
[34] Li S S, Yang S N, Liu X F, Liu Y X, Shi M M. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11163-11182.
[35] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 2000-2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1248-1258.