

河北省 2000—2017 年荒漠化的 时空演变及其气候驱动因子

赵文博¹, 冯莉莉^{1,2}, 赵安周¹, 张兆江¹, 高叶鹏¹

(1.河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 0560382;

2.中国科学院 地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: [目的] 对河北省荒漠化进行遥感监测及驱动因子分析, 为该区荒漠化防治提供可靠的理论依据和数据支持。[方法] 基于 2000—2017 年 MODIS13A3 的 NDVI 数据和气象数据, 以荒漠化指数为评价指标, 采用趋势分析、未来趋势变化分析、气候因子驱动分析的方法, 分析了河北省荒漠化的时空演变及其驱动因素。[结果] ① 2000—2017 年河北省荒漠化呈减少趋势, 减少速率为 0.009/18 a, 其中极显著减少 ($p < 0.01$) 比重为 11.13%, 显著减少 ($p < 0.05$) 比重为 8.86%; ② 河北省未来荒漠化呈持续性和反持续性的比重分别为 41.29% 和 58.71%, 其中弱持续性与弱反持续性所占比例分别为 37.43%, 51.35%; 在现有基础上, 未来趋势变化以基本不变为主, 持续性特征与反持续性特征所占比例分别为 14.89%, 19.6%; ③ 研究区荒漠化指数与生长季气温、降水的偏相关系数较小, 相关性不显著。[结论] 河北省 2000—2017 年荒漠化整体呈改善趋势, 但具有明显的空间异质性, 荒漠化区域主要集中在坝上高原地区, Hurst 指数表明未来荒漠化在局部地区可能呈逆转态势; 就气候因子而言, 气温的升高和降雨的减少对研究区内荒漠化起到推进作用。

关键词: 荒漠化指数; 时空演变; NDVI; 趋势分析; 河北省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0252-08

中图分类号: P931.3, TP751

文献参数: 赵文博, 冯莉莉, 赵安周, 等. 河北省 2000—2017 年荒漠化的时空演变及其气候驱动因子[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 252-259. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.034; Zhao Wenbo, Feng Lili, Zhao Anzhou, et al. Spatial and temporal evolution of desertification and its driving factors of climate in Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 252-259.

Spatial and Temporal Evolution of Desertification and Its Driving Factors of Climate in Hebei Province

Zhao Wenbo¹, Feng Lili^{1,2}, Zhao Anzhou¹, Zhang Zhaojiang¹, Gao Yepeng¹

(1.School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan,

Hebei 056038, China; 2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The desertification in Hebei Province was monitored by remote sensing and its driving factors was analyzed, in order to provide reliable theoretical basis and data support for desertification control. [Methods] Based on MODIS13 A3-NDVI and meteorological data from 2000 to 2017, taking the desertification index as the evaluation index, the temporal and spatial evolution of land desertification in Hebei Province and its driving factors were analyzed by trend analysis, future change analysis, and climate factors analysis. [Results] ① In 2000—2017, the desertification of study area decreased, with a decreasing rate of 0.009/18 a, of which the proportion of extremely significant decrease ($p < 0.01$) was 11.13% and significant decrease ($p < 0.05$) was 8.86%. ② The proportions of persistent and anti-persistent desertification in future in the study area were expected to be 41.29% and 58.71% respectively, of which, the weak persistence and weak

收稿日期: 2021-04-15

修回日期: 2021-05-14

资助项目: 河北省高等学校科学技术研究项目“河北省荒漠化土地时空演变及其分异规律研究(QN2018054); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH257); 河北省普通高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2018043); 国家科技基础资源调查专项(2019FY202503)

第一作者: 赵文博(1996—), 男(汉族), 陕西省宜君县人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: 963058576@qq.com。

通讯作者: 冯莉莉(1986—), 女(汉族), 吉林省四平市人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事生态遥感研究。Email: fengll@igsrr.ac.cn。

anti-persistence was expected to be 37.43% and 51.35%, respectively. On the existing basis, the trend change in the future was basically unchanged, and the proportions of persistent and anti-persistent characteristics were 14.89% and 19.6% respectively. ③ The partial correlation coefficient of desertification index with precipitation and temperature in growing season was small and insignificant. [Conclusion] The overall desertification situation is improved during 2000—2017, but with obvious spatial heterogeneity. The desertification areas are mainly concentrated in the Bashang Plateau area and the Hurst index indicates that desertification might be reversed in local areas in the future. In terms of climate factors, the increase of temperature and the decrease of precipitation can promote desertification in the study area.

Keywords: desertification index; spatial and temporal change; NDVI; trend analysis; Hebei Province

荒漠化主要是由于气候变异和人类不合理的经济活动,使原有的生态环境进一步恶化而形成的土地退化现象^[1]。荒漠化是当今全球面临的十大环境问题之一,全球1/4的陆地表面积,2/3的国家和近10亿的人口受到荒漠化的影响,每年有 1.20×10^7 hm²可耕地流失^[2-4]。在全球气候变暖的情况下,荒漠化在全球局部地区呈现增长趋势^[5-6]。遥感因其大面积同步观测、时效性、数据的综合性和可比性等优势,能够在荒漠化的监测中得到广泛应用^[7-10]。大量的试验数据表明,植被能够很好的表征荒漠化的状况,可作为荒漠化监测的主要依据。如拉巴等^[11]利用植被覆盖度构建荒漠化监测模型,对2000—2017年西藏荒漠化的时空变化特征进行分析,发现全区荒漠化呈现微弱改善趋势。贺振等^[12]基于MODIS数据,通过像元二分法计算植被覆盖度作为监测荒漠化的主要指标,对黄土高原8a的荒漠化土地进行动态监测,分析了荒漠化土地的时空变化,发现黄土高原的荒漠化呈现减少态势,但结构转化强度却处于不断发展阶段。陈文倩等^[13]利用植被覆盖度对2000—2015年中亚地区荒漠化进行分析,得到中亚地区荒漠化程度分布图以及荒漠化等级数据,结果发现中亚地区的荒漠化程度依然在加剧。目前,对于河北省荒漠化的研究相对较少,研究时段主要停留在10a前,同时相关研究缺少对荒漠化变化的趋势预测以及驱动因子分析。因此,本研究以2000—2017年的MODIS数据的NDVI产品为基础,计算荒漠化指数(DI),结合2000—2017年生长季的降雨量与平均气温,利用趋势分析、Hurst指数、偏相关系数等数学方法对研究时段内的荒漠化时空演变进行分析,对研究区荒漠化防治具有重要意义。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

河北位于中国的华北地区,地处北纬36°03—42°40,东经113°27—119°50之间,西起太行山,东至渤海区域,南邻山东、河南,西北接内蒙古高原,称为

坝上高原,东北方向为燕山山脉,且其中间包围着北京和天津,占地总面积为188 800 km²。河北省气候为温带季风气候,从整个地势上来看,南部及东部地区气温明显高于北部地区,中部和东部的年均降雨量要高于北部,且降雨量主要集中在夏季,春季出现阶段性干旱。据统计,河北省年平均降水量在400~800 mm之间,其趋势主要呈现西北至东南方向逐渐增多,且降雨多集中在6—9月,占整体降雨量的60%~80%。

1.2 数据源

本研究采用MOD13A3的月合成的植被指数产品,数据来源于USGS(<https://lpdaac.usgs.gov/tools/appears/>),其空间分辨率为1 km×1 km,研究时间段为2000—2017年生长期(4—10月),该时段地物热辐射较为明显,有利于将地物与荒漠进行有效区分。采用最大值合成法(maximum value composition, MVC)将生长季的NDVI进行合成,获得年度NDVI最大值,由此通过像元二分法计算植被覆盖度。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),采用中国气象站点月值数据集的月平均气温和月降水量,通过62个站点进行插值,其空间坐标系及像元大小均与NDVI相一致。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),该数据基于Landsat 8数据,结合人工目视解译对河北省的土地利用进行分类,空间分辨率为1 000 m,本文选取2015年河北省土地分类中的城镇用地,将DI指数的干扰因素排除,在此基础上对荒漠化的时空演变进行进一步分析。

2 研究方法

2.1 荒漠化监测方法

植被覆盖度(FVC)是指植被冠层垂直投影的面积与统计的有效区域面积的比值^[14-15],是表征地表植被状况的重要参数,对评价生态区域环境质量、水土流失、动态监测及荒漠化的防治等具有重要意义^[16-17]。

像元二分法是基于NDVI计算的,是一种混合

像元分解模型^[18]。其原理是假设每个像元都包含植被与非植被两种成分,混合像元中植被指数则表示这两部分覆盖面积百分比的加权平均和^[19]。其计算公式为:

$$FVC = \frac{S - S_{soil}}{S_{veg} - S_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC 代表植被覆盖度;S 代表遥感传感器所观测到的信息;S_{soil} 为裸土的纯像元信息;S_{veg} 为全植被覆盖的纯像元信息,且因为 NDVI 与植被覆盖度之间高度相关,所以将两者进行转换得到以下公式^[20]:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (2)$$

式中:FVC 代表植被覆盖度;NDVI 代表归一化植被指数值;NDVI_{soil} 代表完全裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值,理论上应该接近于 0,但由于受到各种因素影响,在 -0.1~0.2 之间上下波动^[21-23]。NDVI_{veg} 代表全植被覆盖像元的 NDVI 值。本研究选用 0.5% 的累计频率的 NDVI 作为 NDVI_{soil},选用 99.5% 的累计

频率的 NDVI 作为 NDVI_{veg},由此来估算河北省的植被覆盖度。

荒漠化与植被覆盖度呈现负相关关系,当植被覆盖度越高时,荒漠化程度越低^[24]。荒漠化指数 DI 的公式为:

$$DI = 1 - FVC \quad (3)$$

式中:DI 为荒漠化指数;FVC 为植被覆盖度。

DI 指数是基于植被覆盖度来进行计算,在进行分类过程中,会将研究区内城镇化区域统计在内,影响分类精度。因此本文借助土地利用数据,将城镇用地进行剔除,在此基础上对河北省的荒漠化土地进行统计,分析荒漠化土地的时空演变。

2.2 荒漠化程度分析

参考全国荒漠化与沙化监测技术规定与以往研究^[25-26],将河北省荒漠化程度分为 4 个等级,即重度荒漠化、中度荒漠化、轻度荒漠化、非荒漠化(表 1)。在将河北省进行荒漠化分级后,通过相关软件进行统计,得出荒漠化的年际变化状况。

表 1 河北省荒漠化指数分级标准

荒漠化等级	荒漠化指数(DI)	荒漠化与非荒漠化特征
重度荒漠化	>0.9	植被覆盖度<10%,特征差异明显,植被再生的可能性小,主要为裸地和盐碱光板地
中度荒漠化	0.8~0.9	植被覆盖度为 10%~20%,土地生产力低下,主要为少量植被和重度盐碱化区域
轻度荒漠化	0.5~0.8	植被覆盖度为 20%~50%,植被种类单一,主要为生长草原植被和盐碱化耕地区
非荒漠化	<0.5	植被覆盖度>50%,植被旺盛,地表基本被植被覆盖,主要为耕地和高植被覆盖草地

2.3 一元线性回归

采用一元线性回归分析,以像元为尺度,DI 指数为变量,对河北省 2000—2017 年荒漠化的变化趋势进行分析,其计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times C_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n C_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:slope 为变化趋势的斜率;n 为时间序列的总长度(n=18);i=1,2,3,⋯,18;C_i 为第 i 年的 DI 数据。当 slope 为正(负)时,表明在研究时间内,DI 值的变化趋势增加(减少),且当 slope 绝对值越大时,变化趋势越明显。

2.4 未来趋势分析

Hurst 指数是一种基于重标极差(RS)的指数分析方法,用来描述长时间序列信息的持续性及未来的变化特征,已经被广泛应用于经济、水文、化学、气候等多个领域广泛应用^[27-29],其原理为:

DI 的时间序列 DI_i,i=1,2,3,⋯,n,对于任意整数 m≥1,定义其均值序列为:

$$\overline{DI}_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m DI_i \quad (i=1,2,3, \dots, n) \quad (5)$$

累计离差计算为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^m DI_i - \overline{DI}_m \quad (1 \leq t \leq m) \quad (6)$$

极差:

$$R(m) = \max_{1 \leq m \leq n} X(t) - \min_{1 \leq m \leq n} X(t) \quad (m=1,2,3, \dots, n) \quad (7)$$

标准差:

$$S(m) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (DI_i - \overline{DI}_m)^2} \quad (m=1,2,3, \dots, n) \quad (8)$$

引入比值 $\frac{R}{S}$,若存在 $\frac{R}{S} = (ct)^H$ 关系,则说明时

间序列存在 Hurst 现象。其中,R 为数据极差,S 为标准差,c 为常数,t 为研究时段。Hurst 指数可采用双对数 $[\ln(m), \ln(\frac{R}{S})]$,利用最小二乘求解,主要有以下规律:① 当 0<H<0.5 时,表明时间序列具有反持续性,即未来和现在呈现负相关关系,且当 H 越接近于 0 负相关性越强。② 当 H=0.5 时,表明时间序列并无相关性,相对独立,现在的趋势并不足以影响未来。③ 当 0.5<H<1 时,表明时间序列具有持续

性,未来的趋势可能与现在趋势呈正相关关系,且越接近1时相关性越强,当 H 完全等于1时,则表明未来可以由现在准确的预测到。

本研究参照上述规律,将 $0.5 < H < 1$ 定义为持续性,将 $0 < H < 0.5$ 定义为反持续性并参考李双双等^[30]人以0.35,0.65为阈值对Hurst进行进一步划分,共定义为4类:强反持续性,弱反持续性,弱持续性,强持续性。

2.5 气候因子驱动分析

相关性分析是用来衡量两个或多个变量之间的相关关系或者说是密切程度。本研究通过计算偏相关系数,用来探究荒漠化与气候或降雨两个气象因子之间的相关关系及显著性水平,相关系数、偏相关系数公式为^[31]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中: r_{xy} 是相关系数,取值范围介于-1~1之间,当 $r_{xy} < 0$ 时,表明 x 与 y 两变量为负相关,当 $r_{xy} > 0$ 时,表明 x 与 y 变量呈正相关,当绝对值越接近于1时,其相关程度越大。 x_i 表示第 i 年DI的值, y_i 第 i 年气温或降雨的值; \bar{x} 与 \bar{y} 表示时间序列中两变量的均值。研究年限 $n=18$ 。

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1-r_{13}^2)(1-r_{23}^2)}} \quad (10)$$

式中: $r_{12.3}$ 表示在变量3不变的条件下,变量1与变量2之间的相关性; r_{12} 表示变量1与变量2之间的相关性; r_{13} 表示变量1与变量3之间的相关性; r_{23} 表示变量2与变量3之间的相关性。本文采用 t 检验法对其进行显著性检验,其计算公式为:

$$t = \frac{r_{12.3}}{\sqrt{1-r_{12.3}^2}} \times \sqrt{n-m-1} \quad (11)$$

式中: $r_{12.3}$ 为偏相关系数; n 为样本数; m 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 河北省生长季DI的空间分布特征

图1为2000—2017年河北省在去除城镇区域后DI的空间分布。表2为荒漠化比例情况。研究表明,近18a来河北省荒漠化的空间分布及走势,以非荒漠化($DI < 0.5$)为主,占全区总面积的85.65%;其次轻度荒漠化($0.5 < DI < 0.8$)占全区总面积的13.17%;中度荒漠化($0.8 < DI < 0.9$)占全区总面积0.89%;重度荒漠化($DI > 0.9$)所占面积最小,占全区

总面积0.29%。从空间上看,研究区内荒漠化区域差异显著,研究区内荒漠化面积主要分布在坝上高原地区,由西北向东南方向演化,其类型主要以轻度荒漠化为主。而在河北平原地区荒漠化区域则主要分布在沿海唐山、秦皇岛、沧州以及保定西南部分地区,基本没有中度、重度荒漠化。

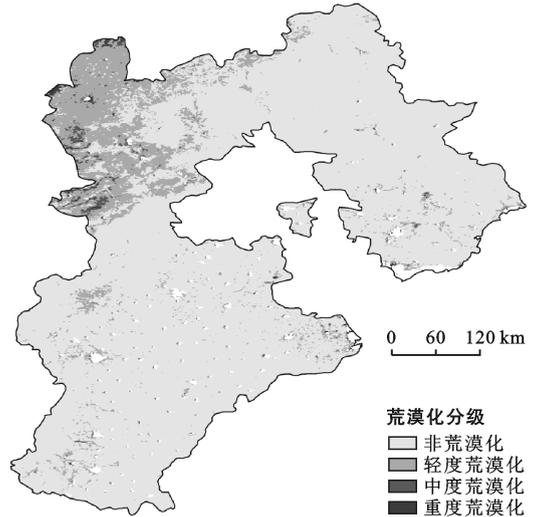


图1 河北省生长季荒漠化空间分布

表2 河北省荒漠化等级面积状况

荒漠化分级	像元数/个	面积/ 10^4 km ²	所比例例/%
非荒漠化	236 554	16.43	85.65
轻度荒漠化	36 366	2.53	13.17
中度荒漠化	2 451	0.17	0.89
重度荒漠化	797	0.06	0.29

3.2 河北省生长季DI的时间变化特征

从时间上来看,2000—2017年河北省在去除城镇因素DI的最高点出现在2000年(图2),最低点出现在2006年,均值为0.298,整体呈轻微下降趋势(0.009/18 a)。分阶段来看,在2000—2008年,荒漠化程度呈现波动状态,但整体有了明显的改善,DI的减少斜率为-0.07/9 a;2009—2017年DI的斜率为0.02/9 a,较之前9 a相比,荒漠化程度有了轻微增加的趋势,至2017年DI值达到0.3。查阅《中国林业手册》发现,在2000年6月国家为加强生态环境建设启动京津风沙治理工程(2001—2010年),同年10月国家正式批准了天然林资源保护工程,以及后续开展的退耕还林、人工造林、封沙育林等一系列措施,对荒漠化状况都起到一定的改善作用。

利用回归分析方法计算出DI的线性回归方程,得出其斜率值与 R 值,通过查阅相关系数表,将 $p < 0.05$ 的参数值设定为显著,将 $p < 0.01$ 的参数值设定为极显著,在像元水平上绘制DI的变化趋势图

(图 3)。由图 3 和表 3 可知,2000—2017 年河北省荒漠化变化趋势呈增加和减少的面积分别占 45.29% 和 54.71%,其中变化不显著的地区(增加不显著与减少不显著)所比例最大(64.48%),主要分布在以农耕地为主的河北平原地区;极显著增加区域($p < 0.01$)与显著增加区域($p < 0.05$)占总面积的 9.64% 和 5.89%,零星分布在邯郸、邢台、石家庄、保定、唐山等城市的外围区域,而极显著减少区域($p < 0.01$)和显著减少区域($p < 0.05$)分别占总面积的 11.13% 和 8.86%,主要分布在张家口市、太行山、燕山山脉、其余较少部分分布在衡水、沧州、秦皇岛市等地。

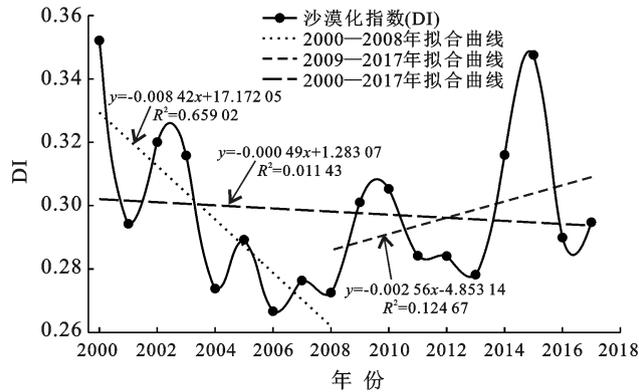


图 2 河北省 2000—2017 年生长季年际变化曲线

表 3 河北省 2000—2017 年荒漠化面积变化趋势

变化趋势	像元数/个	面积/ 10^4 km ²	比例/%
极显著增加	26 571	1.845 21	9.64
显著增加	16 227	1.126 87	5.89
增加不显著	82 010	5.695 13	29.76
减少不显著	95 693	6.645 34	34.72
显著减少	24 426	1.696 25	8.86
极显著减少	30 662	2.129 30	11.13

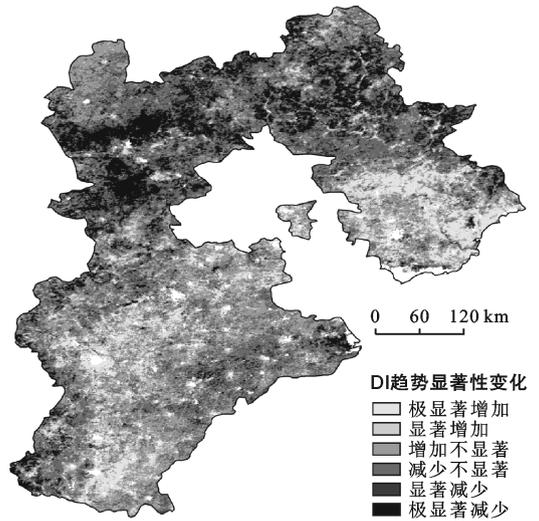
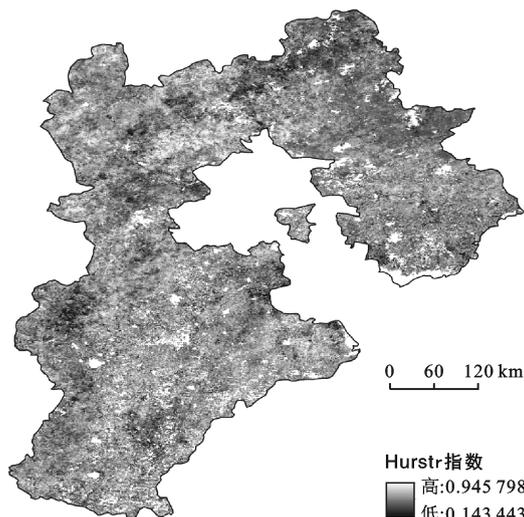


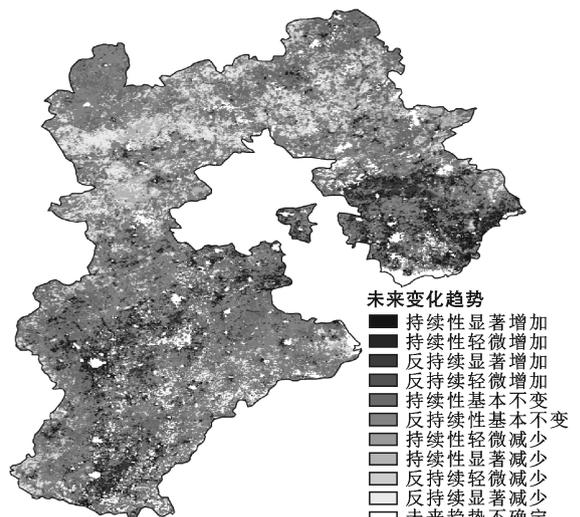
图 3 河北省 2000—2017 年生长季沙漠化指数(DI)显著性变化

3.3 河北省生长季 DI 的未来变化趋势

为分析河北省荒漠化的未来趋势变化,采用 R/S 算法,在像元尺度上计算 2000—2017 年 DI 的 Hurst 指数,其结果图 4a 所示。河北省 Hurst 均值为 0.48,属于弱反持续性。从空间分布上来看,北部的 Hurst 指数高,南部的 Hurst 指数相对较低,但在邢台、廊坊以及石家庄的西部也存在小面积的高分布区域。河北省反持续性面积($0 < H < 0.5$)比例为 58.71%,其中属于弱反持续性($0.35 < H < 0.5$)居于主要地位,占总面积的 51.35%,数据表明未来河北省荒漠化呈现反持续性变化,即反持续性改善或反持续性退化。而持续性区域($0.5 < H < 1$)比例 41.29%,其中强持续性($0.65 < H$)区域仅占 3.86%,在研究区内零星分布,主要集中在邢台市的东部、廊坊市的南部,以及在石家庄的河北省边界地区。



a Hurst 指数空间分布



b 荒漠化未来趋势变化

图 4 河北省 2000—2017 年 Hurst 指数及未来趋势分布

为进一步了解荒漠化未来趋势的变化,将 Hurst 指数结果与趋势分析结果进行耦合,得出研究区未来变化趋势(如图 4b 和表 4 所示)。由图 4 和表 4 可知,河北省未来趋势变化具有明显的空间异质性,其中基本不变的(持续性与反持续性)居于主要地位,其累计比例为 60.15%。持续性显著增加与持续性轻微增加累计比例 6.29%,主要分布在邯郸、廊坊、石家庄以及唐山等地。另外在秦皇岛也有小面积分布。这表明未来荒漠化状况呈现持续增加的趋势。反持续性显著增加和反持续性轻微增加累计比例为 8.41%,

主要分布在南部的河北平原地区以及沿海地区,表明在这些地区荒漠化将由退化转变为改善。持续性轻微减少与持续性显著减少累计比例为 8.59%,主要分布在河北省北部地区,其中以燕山山脉和坝上高原地区最为明显。11.18%的区域荒漠在未来可能会由减少转变为增加,主要分布于张家口、承德、保定北部的高海拔区域,在河北平原的衡水和沧州地区零星分布。总的来说,荒漠化状况在目前有了较为明显的改善,但是在未来还可能存在部分逆转,对于城市化、建筑用地、不合理的土地利用等方式都可能加剧荒漠化状况。

表 4 河北省沙漠化指数(DI)预测类型统计

Hurst 指数	斜率及显著性	DI 预测类型	比例/%
$0.5 < H < 1$	$\text{slope} > 0; p < 0.01$	持续性显著增加	4.04
$0.5 < H < 1$	$\text{slope} > 0; 0.01 < p < 0.05$	持续性轻微增加	2.26
$0 < H < 0.5$	$\text{slope} > 0; p < 0.01$	反持续性显著增加	5.19
$0 < H < 0.5$	$\text{slope} > 0; 0.01 < p < 0.05$	反持续性轻微增加	3.23
$0.5 < H < 1$	$p > 0.05$	持续性基本不变	24.18
$0 < H < 0.5$	$p > 0.05$	反持续性基本不变	35.97
$0.5 < H < 1$	$\text{slope} < 0; 0.01 < p < 0.05$	持续性轻微减少	3.73
$0.5 < H < 1$	$\text{slope} < 0; p < 0.01$	持续性显著减少	4.86
$0 < H < 0.5$	$\text{slope} < 0; 0.01 < p < 0.05$	反持续性轻微减少	4.99
$0 < H < 0.5$	$\text{slope} < 0; p < 0.01$	反持续性显著减少	6.19
Nodata 或 $H = 0.5$	$\text{slope} > 0$ 或 $\text{slope} < 0$	未来趋势不确定	5.38

3.4 河北省生长季 DI 与气候因子相关分析

荒漠化受气候影响显著,而气温和降水是表征气候的重要指标^[32],因此本文对河北省 18 a 的 DI 与生长季降水与平均温度进行了偏相关分析。结果如图 5 所示,荒漠化指数 DI 与生长季降水的平均偏相关系数为 -0.14,呈正相关区域主要分布在河北平原的西部地区以及沿海的唐山和秦皇岛市,占总面积的 30.95%;呈负相关区域主要分布在坝上高原,太行山、燕山山脉。由图 5 可知,荒漠化指数 DI 与气温呈正相关的区域主要分布在邯郸、张北高原的西北地区,在内陆的石家庄、廊坊及秦皇岛市则呈现片状分布,占总面积的 42.68%;呈负相关主要集中在衡水市以及保定市的北部地区、燕山地区。对河北省荒漠化 DI 与气温和降雨进行 T 显著性检验,其中 DI 与降雨有 11.75%通过了 $p < 0.05$ 显著性检验,有 3.43%的区域通过了 $p < 0.01$ 的检验,极显著相关主要分在在石家庄市和张家口市西北边界地区,其余在河北平原内零星分布;DI 与气温有 4.71%通过了显著性性检验($p < 0.05$),有 1.08%通过了显著性 $p < 0.01$ 的检验,极显著相关区域分布在张家口市的南部区域。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文以 MODIS 数据为数据源,基于植被覆盖度

构建荒漠化指数 DI,并在此基础上借助土地利用数据剔除城镇区域对荒漠化区域统计的影响,对河北省的荒漠化区域进行长时间序列的监测和评价。与现有成果相比^[33-34],荒漠化面积及空间分布与上述研究成果基本一致。整体来看,2000—2017 年研究区内荒漠化整体呈改善状况,但未来还可能存在部分逆转,一方面是因为城市扩张过程中,建设用地急剧增加,耕地、林地等植被景观破碎化可能会造成植被退化^[35-36],进而使得荒漠化程度加深。另一方面在全球气候变化的大背景下,荒漠化同样受到自然因素的影响,干旱的气候条件也可能导致荒漠化程度加深。从其局部来看,荒漠化主要集中分布在河北坝上高原地区,该地区是我国北方地区典型的农牧交错地带,多年来土地利用处于不稳定态势,发生较大改变^[37],其土壤类型主要以沙壤土和沙质地表土为主,气候恶劣等一系列因素使得研究区内该地区荒漠化最为严重。自 2000 年以来,为遏制荒漠化进一步发展,河北省于 2000 年在张家口市、承德坝上地区试点实施退耕还林政策,2001 年开展京津风沙源治理工程^[38],2002 年启动黄河故道沙化土地综合治理项目,以及后续建立的三北防护林及封山育林等相关条例都使得荒漠化情况得到改善,这与本研究所得荒漠化变化趋势相符。荒漠化是自然因素和人为因素叠加的结果^[39-40],

本文仅从气温和降雨量作为荒漠化变化的影响因子,并未对人为因素对荒漠化的贡献程度进行分析,并且荒漠化是一种由多种因素造成的土地退化过程,因难

以量化的气候区域、相关政策以及人为因素,无法判定各种影响因素的贡献率,在以后的研究中会进一步进行讨论。

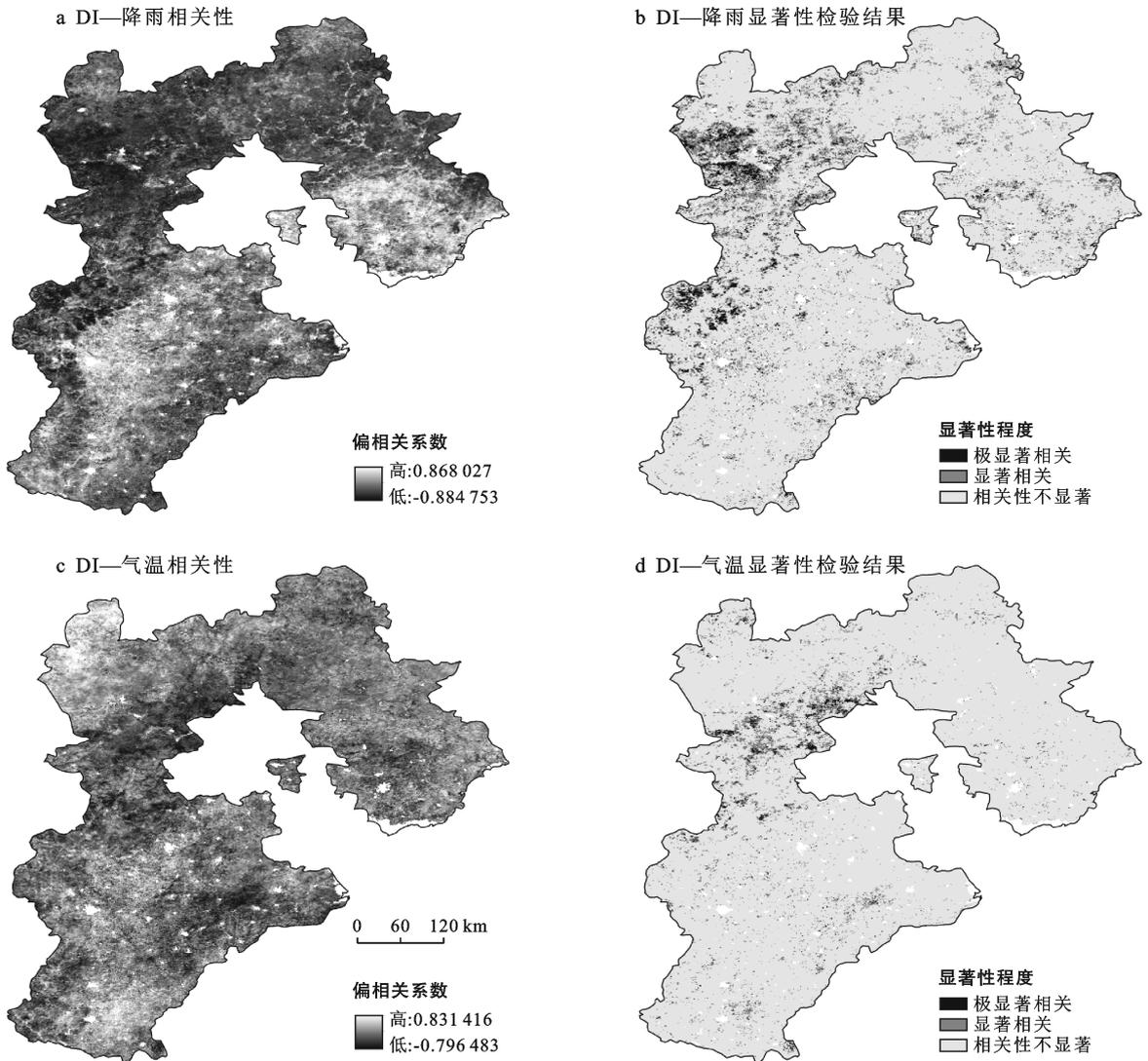


图 5 荒漠化指数(DI)与气温和降水的偏相关系数及其显著性检验结果

4.2 结论

(1) 河北省荒漠化主要以轻度荒漠化为主,主要分布在坝上高原地区。变化趋势表现为从河北省由南向北、由东向西逐步递减,在张家口、太行山脉等地呈极显著减少趋势,而在石家庄、邯郸等地的外围区域呈现极显著增加。

(2) Hurst 指数结果显示河北省荒漠化反持续性比例 58.71%,持续性比例 41.29%,持续增加与反持续增加比例分别为 6.29%和 8.41%,持续减少与反持续减少比例分别为 8.59%和 11.18%,未来变化趋势反持续性特征比重略强于持续性特征。表明未来河北省荒漠化在局部地区可能呈逆转态势。

(3) 研究区荒漠化指数 DI 与生长季气温、降水

的偏相关系数较小,相关性不显著。但存在明显的空间异质性,呈片状分布,坝上地区气温的升高和降雨的减少对研究区内荒漠化起到推进作用。

[参 考 文 献]

- [1] 王涛.中国沙漠与沙漠化[M].河北 石家庄:河北科学出版社,2003.
- [2] 赵媛媛,高广磊,秦树高,等.荒漠化监测与评价指标研究进展[J].干旱区资源与环境,2019,33(5):81-87.
- [3] 朱震达,陈广庭.中国土地沙质荒漠化[M].北京:科学出版社,1994.
- [4] 王涛,朱震达.中国沙漠化研究[J].中国生态农业学报,2001,9(2):7-12.
- [5] Huang Jianping, Yu Haipeng, Guan Xiaodan, et al.

- Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2):166-171.
- [6] Pravalie, Remus. Drylands extent and environmental issues: A global approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 161:259-278.
- [7] 吕爱锋,周磊,朱文彬.青海省土地荒漠化遥感动态监测[J].*遥感技术与应用*, 2014, 29(5):803-811.
- [8] 努尔麦麦提·如孜,王雪梅.新疆和田地区土地荒漠化时空特征分析[J].*生态与农村环境学报*, 2020, 36(7):870-878.
- [9] 刘晓茜,解云虎,海春兴.基于荒漠化差值指数的荒漠绿洲过渡带土地沙化研究[J].*内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2020, 49(1):59-67.
- [10] 李任时,邵治涛,张红红,等.近30年来黄河上游荒漠化时空演变及成因研究[J].*世界地质*, 2014, 33(2):494-503.
- [11] 拉巴,扎西欧珠,白玛央宗,等.基于MODIS数据的西藏荒漠化遥感监测研究[J].*气象与环境科学*, 2019, 42(4):39-46.
- [12] 贺振,贺俊平.基于MODIS的黄土高原土地荒漠化动态监测[J].*遥感技术与应用*, 2011, 26(4):476-481.
- [13] 陈文倩,丁建丽,谭娇,等.基于DPM-SPOT的2000—2015年中亚荒漠化变化分析[J].*干旱区地理*, 2018, 41(1):119-126.
- [14] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote sensing of Environment*, 2002, 80(1):76-87.
- [15] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18):3519-3535.
- [16] 张成才,姜洋,李颖,等.基于像元二分模型的伏牛山地区植被覆盖度变化[J].*水土保持研究*, 2020, 27(3):301-307.
- [17] 赵明伟,王妮,施慧慧,等.2001—2015年我国陆地植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J].*干旱区地理*, 2019, 42(2):324-331.
- [18] 牛宝茹,刘俊蓉,王政伟.干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(1):27-30.
- [19] 李登科,范建忠,王娟.陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J].*应用生态学报*, 2010, 21(11):2896-2903.
- [20] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].*资源科学*, 2004, 26(4):153-159.
- [21] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3):241-252.
- [22] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tall-grass prairie [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1):129-135.
- [23] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].*生态学报*, 2019, 39(5):1583-1594.
- [24] 银山.内蒙古浑善达克沙地荒漠化动态研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- [25] 王非,毋兆鹏,汪洋,等.基于RS和GIS的塔里木盆地荒漠化动态监测[J].*生态学杂志*, 2017, 36(4):1029-1037.
- [26] 刘艳,李杨,崔彩霞,等. MODIS MOD13 Q1 数据在北疆荒漠化监测中的应用评价[J].*草业学报*, 2010, 19(3):14-21.
- [27] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1):770-799.
- [28] 钱峰,董林垚,黄介生,等.基于Hurst指数与相关系数的降雨侵蚀力变异识别与分级方法[J].*农业工程学报*, 2018, 34(14):140-148.
- [29] 李卓,孙然好,张继超,等.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J].*生态学报*, 2017, 37(22):7418-7426.
- [30] 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, 67(7):960-970.
- [31] 徐建华.计量地理学[M].北京:高等教育出版社, 2014.
- [32] 王涛,赵元真,王慧,等.基于GIMMS NDVI的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J].*冰川冻土*, 2020, 42(2):641-652.
- [33] 孙洪艳.河北省坝上土地荒漠化机制及生态环境评价[D].北京:中国地质大学(北京), 2005.
- [34] 杨晓勤,于景金.河北省荒漠化土地特点及防治建议[J].*河北林果研究*, 2008(2):146-149.
- [35] 吕国旭,陈艳梅,邹长新,等.京津冀植被退化的空间格局及人为驱动因素分析[J].*生态与农村环境学报*, 2017, 33(5):417-425.
- [36] 王静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响[J].*生态学报*, 2017, 37(21):7019-7029.
- [37] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J].*水土保持通报*, 2020, 40(4):303-311, 345.
- [38] 王彦芳,刘敏,郭英,等.河北省生态环境支撑区生态系统服务价值评估[J].*水土保持通报*, 2019, 39(2):309-316.
- [39] Xue Zhanjin, Qin Zuodong, Li Hongjian, et al. Evaluation of aeolian desertification from 1975 to 2010 and its causes in Northwest Shanxi Province, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 107:102-108.
- [40] Han Jinjun, Wang Jianping, Chen Liang, et al. Driving factors of desertification in Caidam Basin, China: An 18-year analysis using the geographic detector model [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124:107404.