

甘肃省土地荒漠化时空演变及驱动力分析

刘进军^{1,2}, 高原雪², 姚琴风^{1,2}, 陈胜华^{1,2}

(1.山西工程技术学院 矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省

重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045000; 2.山西工程技术学院 地球科学与工程系, 山西 阳泉 045000)

摘要: [目的] 对甘肃省的荒漠化状况及驱动因素进行分析, 为该地区荒漠化综合防治及“三北”防护林等生态工程的推进提供科学依据。[方法] 基于植被指数及地表反照率构建了荒漠化差值指数, 使用趋势分析、空间自相关分析等方法分析了甘肃省 2000—2022 年 23 a 间的荒漠化时空分布特征, 并利用地理时空加权回归法对其影响因素进行了分析。[结果] ① 甘肃省荒漠化整体呈现出“西北荒东南绿”的特点, 西北区域同时受风蚀荒漠化和盐渍化影响, 荒漠化最严重, 向东南方向荒漠化程度逐渐减轻, 中部地区受水土流失影响荒漠化程度较严重, 南部区域荒漠化程度较轻; 时间上, 23 a 间, 甘肃省荒漠化程度逐渐改善, 且南部区域改善程度强于北部区域; ② 从空间自相关看, 甘肃省荒漠化主要表现出聚集特性, 即荒漠化程度表现出明显的空间正相关性; ③ 降雨对缓解荒漠化最有益处, 且对西北的影响大于东南, 风速和人口会加剧荒漠化的发生, 西南部气温升高荒漠化程度会加重, 其余区域则相反。[结论] 2000—2022 年甘肃省荒漠化整体呈改善趋势, 西北部荒漠化仍较严重, 甘肃省荒漠化的驱动因素存在较明显的时空异质性, 最主要的因素为降雨。

关键词: 荒漠化; 荒漠化差值指数; 时空特征; 地理时空加权回归; 甘肃省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0354-10

中图分类号: X87, X171.1

文献参数: 刘进军, 高原雪, 姚琴风, 等. 甘肃省土地荒漠化时空演变及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 354-363. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240321.001; Liu Jinjun, Gao Yuanxue, Yao Qinfeng, et al. Analysis of spatiotemporal evolution and driving forces of land desertification in Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 354-363.

Analysis of Spatiotemporal Evolution and Driving Forces of Land Desertification in Gansu Province

Liu Jinjun^{1,2}, Gao Yuanxue², Yao Qinfeng^{1,2}, Chen Shenghua^{1,2}

(1. The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China;

2. Department of Earth Science and Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China)

Abstract: [Objective] The desertification status and its driving factors in Gansu Province were analyzed in order to provide a scientific basis for the comprehensive prevention and control of desertification and the promotion of ecological projects such as the “Three Norths” shelterbelt program. [Methods] Trend analysis and spatial autocorrelation analysis were used to characterize the spatial and temporal distribution of desertification in Gansu Province from 2000 to 2022, and geographically and temporally weighted regression was used to analyze the influencing factors. [Results] ① The overall desertification in Gansu Province was characterized as “desertification in the northwest and green in the southeast”. The northwest region was affected by both wind erosion and salinization, and exhibited the most serious desertification, which gradually decreased towards the southeast. The central region was affected by soil and water loss, and had a serious degree of desertification, while the south region had a less serious degree of desertification. The

收稿日期: 2024-01-27

修回日期: 2024-02-17

资助项目: 山西省地质勘查建设与发展专项资金项目“遥感与 GIS 支持下的山西矿山生态环境监测与评价技术研究”(2023-011); 山西省自然科学基金项目“含双重孔隙网络的山西煤层气储层二维核磁共振测井解释评价研究”(202203021211288); 山西省高等学校教学改革创新项目“新工科背景下基于虚拟仿真技术的《摄影测量学》课程教学改革”(J20221244)

第一作者: 刘进军(1990—), 男(汉族), 山西省吕梁市人, 硕士, 讲师, 主要从事生态环境遥感研究。Email: rsjinjunliu@163.com。

通信作者: 陈胜华(1971—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 博士, 教授, 主要从事矿区生态修复研究。Email: 379646483@qq.com。

degree of desertification in Gansu Province gradually decreased during the 23-year study period, and the amount of decrease was greater in the southern region than in the northern region. ② In terms of spatial autocorrelation, desertification in Gansu Province was mainly characterized by aggregation, i. e., the degree of desertification showed obvious positive spatial correlation. ③ Increased precipitation was most beneficial in mitigating desertification and had a greater impact in the northwest than in the southeast, while wind speed and population exacerbated desertification. Desertification was exacerbated by warmer temperatures in the southwest and vice versa in the rest of the region. [Conclusion] From 2000 to 2022, desertification in Gansu Province showed an improving trend, while desertification in the northwestern part of the province was still serious. There was obvious spatial and temporal heterogeneity in the drivers of desertification in Gansu Province, and the most important factor affecting desertification was precipitation.

Keywords: desertification; desertification difference index; spatiotemporal characteristics; geographically and temporally weighted regression; Gansu Province

荒漠化是指由气候变化和人类活动等因素造成的土地退化,即土地生物或经济生产力的复杂性下降或丧失^[1]。荒漠化不仅会增加生态环境的脆弱性,而且会影响当地经济发展及居民生活^[2-3],现已成为世界上最严重的生态环境问题之一^[4-5]。准确进行荒漠化动态监测对于荒漠化防治至关重要^[6]。

早期的荒漠化监测主要是通过统计调查与模型模拟,遥感技术由于其数据获取便利的优势已被广泛应用于荒漠化监测中^[7]。闫峰等^[8]采用 1977—2010 年 Landsat 数据进行了毛乌素沙地土地利用分类,在此基础上分析了荒漠化特征,发现毛乌素沙地荒漠化程度逐渐减轻,降水是影响荒漠化过程的重要因素;张华等^[9]采用线性光谱混合模型,对民勤绿洲 1992—2017 年荒漠化土地进行分类,进而对荒漠化治理效果进行评价,发现荒漠化总体趋于改善,局部地区在加剧。由于植被长势可以较好地表征荒漠化程度,学者们使用各类植被参数进行荒漠化研究,Lian 等^[10]基于 MODIS NDVI 数据监测了内蒙古部分区域的荒漠化恢复过程,发现多数区域植被逐渐恢复;基于植被指数计算得到的植被覆盖度也可表征荒漠化程度,赵文博等^[11]利用 2000—2017 年的 MODIS NDVI 数据计算了植被覆盖度,在此基础上进行了河北省的荒漠化监测,发现 18 a 间河北省荒漠化呈减少趋势,气温的升高和降雨的减少对荒漠化起到推动作用;然而,单一使用植被覆盖度法进行荒漠化监测容易在低覆盖度和高覆盖度区域产生异常^[12],针对此,学者们开始结合植被指数与相关指标建立荒漠化综合指数,张博等^[13]结合了植被指数与植被降水利用率来进行荒漠化监测,发现 1999—2018 年青海省的土地退化先减少后增加,影响土地退化的主要因素有日照、风速、温度和人类活动;杨超等^[14]使用土地利用、复合植被指数、水土流失、土地沙化和土壤含水率 5 种指标分析了抚仙湖流域土地荒漠化特征,发现 41 a

间抚仙湖流域土地退化面积先增加后减少再增加,2012 年退化面积达到最小值;李志鹏等^[15]使用植被覆盖度、陆地表面温度、温度植被旱情指数、改进型土壤调整植被指数联合分析了 2001—2017 年中国荒漠化特征,并利用了第四次中国荒漠化土地监测结果进行精度验证,吻合度达 92% 以上;荒漠化不仅会使植被覆盖减少,而且会使生物量下降,表面粗糙度增加,在遥感影像上表现为地表反照率增加^[16-17]。由地表反照率和植被指数联合构建的荒漠化指数可以较好地表征荒漠化程度,岳辉等^[18]基于 2000—2016 年的 MODIS 数据进行了陕西省的荒漠化监测,发现陕西省 17 a 间荒漠化逐渐减轻,降水与气温并非陕西省荒漠化的主导因素;李玉等^[19]利用 Landsat 数据监测了 1989—2020 年康平县荒漠化动态变化,发现 32 a 间康平县荒漠化程度逐渐减轻,气候、人类活动和生态工程是其主要原因。

甘肃省地处西北腹地,气候干旱,地形地貌复杂、生态环境脆弱,是中国西北地区荒漠化最严重的地区之一,准确进行荒漠化监测对于甘肃省荒漠化治理乃至全国的生态恢复至关重要。然而,对甘肃省全省的荒漠化状况进行监测的研究并不多,且研究周期较短,基于此,本文基于 MODIS NDVI 及地表反照率数据,构建荒漠化指数,分析甘肃省 2000—2022 年土地荒漠化特征及其影响因素,以为甘肃省荒漠化治理提供科学参考。

1 研究区域与研究数据

1.1 研究区概况

甘肃省位于中国西北地区,地处黄土高原、青藏高原、内蒙古高原的交汇地带,地理位置处于北纬 32°11′—42°57′、东经 92°13′—108°46′ 之间,总面积约 4.26×10^5 km²,境内地貌复杂多样,高山、盆地、平原、沙漠和戈壁等兼而有之,气候上主要分为干旱区、半

干旱区和亚湿润区,年平均气温 0~15 ℃,大部分地区气候干燥,干旱、半干旱区占总面积的 75%。全省平均年降水量为 36.6~734.9 mm,总体上呈自东南地区向西北地区逐渐减小的趋势。乌鞘岭以西地区降水量较小,而陇南地区及祁连山东部地区降水量较多,降水主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 50%~70%。甘肃省境内分布着腾格里、巴丹吉林和库姆塔格三大沙漠,荒漠化土地面积较大,约占全省土地总面积的 45%,是国家加强荒漠化综合防治的重点省份之一,在保障国家生态安全中具有举足轻重的地位和作用。

1.2 数据来源

本研究使用的数据包括植被数据、地表反照率(Albedo)数据、气象数据和人口数据,数据均来自于 Google Earth Engine(GEE)平台。

植被数据选用的是 MODIS MOD13A2 NDVI 产品;地表反照率数据选用的是 MODIS MCD43A3 晴空地表短波反照率数据;气象数据包括月降水总量、月均气温、月均风速,选用的是欧洲中期天气预报中心生产的 ERA5 数据集;人口数据选用的是 LandScan 全球人口动态数据,以上数据选取时间范围均为 2000—2022 年,数据的预处理均在 GEE 平台

完成,包括年度数据合成、分区统计等。

2 研究方法

2.1 荒漠化监测方法

参照已有文献^[16-19]的研究结果,本文将 2000—2022 年每年度 NDVI-Albedo 特征空间中的“干边散点”(各 NDVI 值所对应的 Albedo 最大值点)进行线性拟合,得到 Albedo 与 NDVI 的线性关系模型,基于此,构建荒漠化差值指数(desertification difference index, DDI),计算公式为

$$\text{Albedo}_{\max} = k \times \text{NDVI} + b \quad (1)$$

$$\text{DDI} = -\frac{1}{k} \times \text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (2)$$

式中:Albedo 为地表反照率;Albedo_{max} 为干边散点的地表反照率;NDVI 为归一化植被指数, k, b 分别为线性拟合的斜率及截距,各年度拟合结果如表 1 所示。最后,对各年度 DDI 分别进行归一化处理,计算公式为:

$$\text{DDI}_{\text{norm}} = \frac{\text{DDI} - \text{DDI}_{\min}}{\text{DDI}_{\max} - \text{DDI}_{\min}} \quad (3)$$

式中:DDI_{max}, DDI_{min}, DDI_{norm} 分别为各年度的 DDI 最大、最小及归一化后的值。

表 1 各年度“干边散点”拟合模型及 DDI 计算公式

Table 1 “Dry edge scatter point” fitting model and DDI calculation formula for each year

年份	“干边散点”拟合模型	R ²	DDI 计算公式
2000	$\text{Albedo}_{\max} = -0.195 \times \text{NDVI} + 0.326$	0.849	$\text{DDI} = 5.128 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2001	$\text{Albedo}_{\max} = -0.197 \times \text{NDVI} + 0.326$	0.783	$\text{DDI} = 5.076 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2002	$\text{Albedo}_{\max} = -0.21 \times \text{NDVI} + 0.336$	0.839	$\text{DDI} = 4.762 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2003	$\text{Albedo}_{\max} = -0.21 \times \text{NDVI} + 0.333$	0.823	$\text{DDI} = 4.762 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2004	$\text{Albedo}_{\max} = -0.193 \times \text{NDVI} + 0.327$	0.79	$\text{DDI} = 5.181 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2005	$\text{Albedo}_{\max} = -0.192 \times \text{NDVI} + 0.322$	0.743	$\text{DDI} = 5.208 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2006	$\text{Albedo}_{\max} = -0.175 \times \text{NDVI} + 0.32$	0.795	$\text{DDI} = 5.714 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2007	$\text{Albedo}_{\max} = -0.189 \times \text{NDVI} + 0.326$	0.763	$\text{DDI} = 5.291 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2008	$\text{Albedo}_{\max} = -0.225 \times \text{NDVI} + 0.346$	0.773	$\text{DDI} = 4.444 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2009	$\text{Albedo}_{\max} = -0.195 \times \text{NDVI} + 0.328$	0.785	$\text{DDI} = 5.128 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2010	$\text{Albedo}_{\max} = -0.179 \times \text{NDVI} + 0.324$	0.736	$\text{DDI} = 5.587 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2011	$\text{Albedo}_{\max} = -0.223 \times \text{NDVI} + 0.343$	0.795	$\text{DDI} = 4.484 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2012	$\text{Albedo}_{\max} = -0.203 \times \text{NDVI} + 0.336$	0.758	$\text{DDI} = 4.926 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2013	$\text{Albedo}_{\max} = -0.185 \times \text{NDVI} + 0.32$	0.787	$\text{DDI} = 5.405 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2014	$\text{Albedo}_{\max} = -0.183 \times \text{NDVI} + 0.319$	0.812	$\text{DDI} = 5.464 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2015	$\text{Albedo}_{\max} = -0.19 \times \text{NDVI} + 0.328$	0.86	$\text{DDI} = 5.263 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2016	$\text{Albedo}_{\max} = -0.187 \times \text{NDVI} + 0.325$	0.829	$\text{DDI} = 5.348 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2017	$\text{Albedo}_{\max} = -0.202 \times \text{NDVI} + 0.331$	0.816	$\text{DDI} = 4.95 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2018	$\text{Albedo}_{\max} = -0.18 \times \text{NDVI} + 0.324$	0.781	$\text{DDI} = 5.556 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2019	$\text{Albedo}_{\max} = -0.184 \times \text{NDVI} + 0.33$	0.696	$\text{DDI} = 5.435 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2020	$\text{Albedo}_{\max} = -0.184 \times \text{NDVI} + 0.326$	0.776	$\text{DDI} = 5.435 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2021	$\text{Albedo}_{\max} = -0.153 \times \text{NDVI} + 0.31$	0.761	$\text{DDI} = 6.536 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$
2022	$\text{Albedo}_{\max} = -0.175 \times \text{NDVI} + 0.316$	0.74	$\text{DDI} = 5.714 \times \text{NDVI} - \text{Albedo}$

2.2 趋势分析

在得到 2000—2022 年荒漠化差值指数分布图后,可借助一元线性回归模型对甘肃省荒漠化的变化趋势进行计算,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{DDI}_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{DDI}_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中:Slope 为 DDI 的变化趋势; n 是所研究的年份数(本文中为 23); i 代表年序号(以 2000 年为 1 a); DDI_i 为第 i 年的 DDI 值。如果 Slope 的值为正值,说明 DDI 值在 2000—2022 年基本呈增长趋势,反之亦然。

2.3 空间自相关分析

空间自相关用于描述同一区域内变量属性值的相互依赖关系和集聚特征。一般可用全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数进行度量,本文以像元为单位,计算甘肃省 DDI 的自相关参数,具体计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$I_i = \frac{n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中: I 为全局 Moran's I 指数; I_i 为局部 Moran's I 指数; n 为甘肃省像元总数; i, j 为像元计数; x_i, x_j 分别为其 DDI 值; \bar{x} 为甘肃省 DDI 均值; w_{ij} 为空间权重矩阵,本文取像元间距离倒数。依据局部 Moran's I 指数,可将研究区分为高高聚集、低低聚集、高低异常、低高异常、不显著 5 类。

2.4 地理时空加权回归

地理时空加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)是在普通最小二乘回归的基础上,通过构建时空依赖的局部模型对时空非平稳关系建模而得^[20],其数学模型为

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i, t_i) + \sum_{j=1}^m \beta_j(\mu_i, v_i, t_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中: y_i 为第 i 点的 DDI 值; i 为样本点计数; x_{ij} 为荒漠化的第 j 个影响因素在第 i 点的值; j 为影响因素计数; ε_i 为第 i 点的 DDI 拟合残差; $\beta_j(\mu_i, v_i, t_i)$ 为坐标为 (μ_i, v_i, t_i) 的样本点的第 j 个回归系数; $\beta_0(\mu_i, v_i, t_i)$ 为坐标为 (μ_i, v_i, t_i) 的样本点的常数项。

当 GTWR 模型中不考虑空间非平稳性时,模型即退化为时间加权回归(temporally weighted regression, TWR)模型;当不考虑时间非平稳性时,

模型退化为地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型;时空非平稳性均不考虑时,GTWR 模型便退化为普通最小二乘回归(ordinary least squares, OLS)模型。

3 结果与分析

3.1 甘肃省荒漠化时空演变特征

为了直观地了解甘肃省荒漠化分布差异,将甘肃省 DDI 分成 5 个等级,即极重度荒漠化(<0.28),重度荒漠化($0.28 \sim 0.43$),中度荒漠化($0.43 \sim 0.60$),轻度荒漠化($0.60 \sim 0.77$)和未荒漠化(>0.77) (图 1)。可以看出,甘肃省整体表现为西北荒东南绿,荒漠化程度呈现明显的圈层分布,即西北的酒泉、嘉峪关及张掖、金昌、武威地区东北部具有明显的极重度荒漠化连片特征;张掖、金昌、武威中部表现为重度荒漠化,主要是受极重度荒漠化区域包围所致;张掖、金昌、武威西部祁连山一线也表现为重度荒漠化;以极重度荒漠化区域为中心向东南方向延伸依次分布着重度、中度、轻度和未荒漠化区域;重度荒漠化区域主要分布于白银、兰州、定西地区,中度荒漠化区域主要分布在庆阳、平凉、临夏及定西地区西部、天水中西部;轻度及未荒漠化区域主要分布于甘肃省南部的甘南、陇南、天水东部及祁连山东部区域。

时间上看(图 2—3),23 a 间甘肃省荒漠化状况逐渐好转,南部的重度荒漠化地区大幅改善,改善程度由北向南逐渐加强,改善较为明显的区域主要分布于南部的陇南、天水、定西、平凉、庆阳、临夏、甘南等地,这些区域也是省内发生荒漠化程度较轻的区域,表现为“绿者恒绿”的特点,中部的重度荒漠化区有了一定的改善,也反映出“三北”治理的成效,酒泉市北部荒漠化程度在 23 a 间几乎没有变化,表明其治理的难度,少部分地区存在荒漠化加剧现象。定量来看(表 2),23 a 间荒漠化显著减轻区域面积比例 38.73%,轻微减轻面积比例 35.045,二者合计比例达 73.775%,基本不变面积比例 26.223%,轻微加重面积比例不足 1%,可见甘肃省 23 a 间荒漠化程度有了很大程度的改善。

表 2 2000—2022 年甘肃省 DDI 变化趋势面积统计
Table 2 Area statistics of DDI change trends in Gansu Province from 2000 to 2022

变化程度	分级标准	面积比例/%
轻微加重	< -0.005	0.002
基本不变	$-0.005 \sim 0.005$	26.223
轻微减轻	$0.005 \sim 0.015$	35.045
显著减轻	> 0.015	38.730

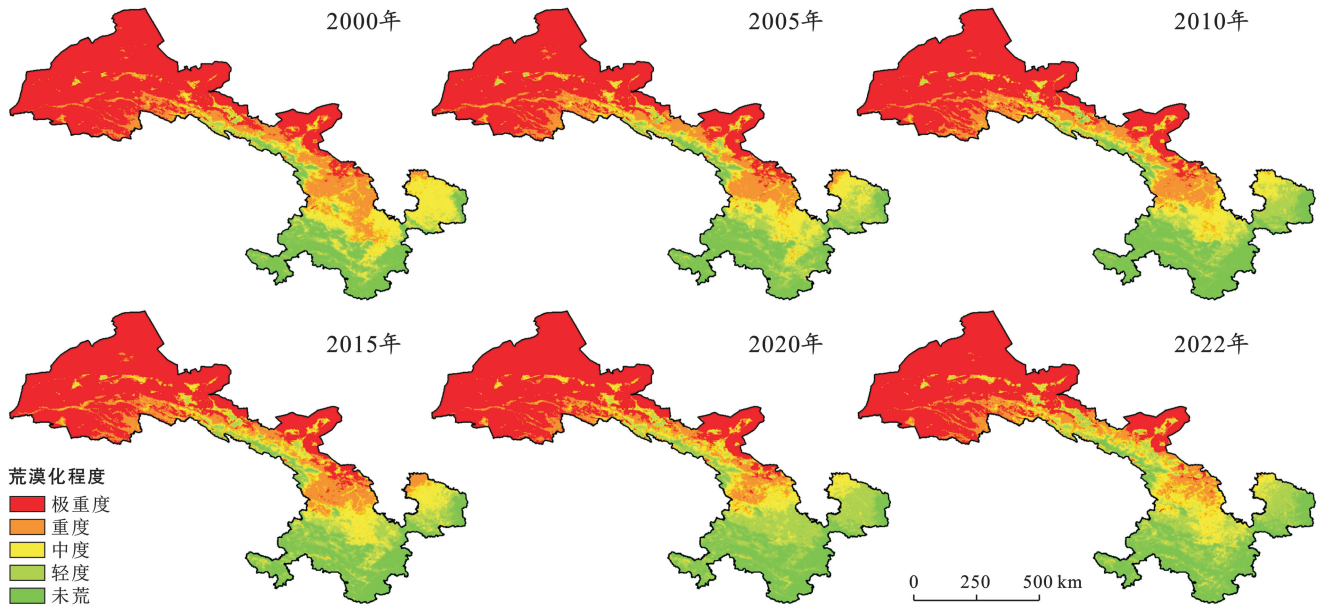


图 1 2000—2022 年甘肃省荒漠化空间分布

Fig.1 Spatial distribution of desertification in Gansu Province from 2000 to 2022

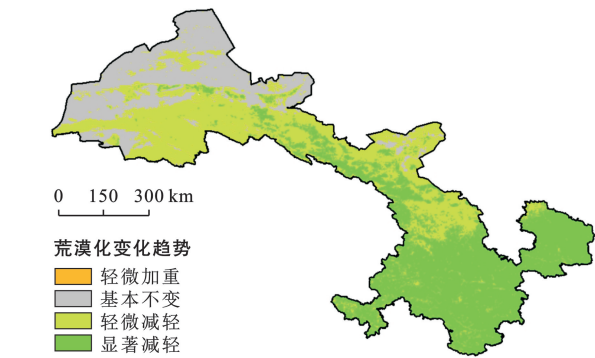


图 2 甘肃省荒漠化变化趋势

Fig.2 Trends of desertification change in Gansu Province

为进一步探索甘肃省荒漠化的时空分布特征, 本文对甘肃省 2000—2022 年 DDI 数据进行时间序列聚类分析^[21], 每一类区均在 2000—2022 年时间段内具有最相似的 DDI 值, 聚类结果如图 3 所示, 各类型的时间序列均值如图 4 所示, 极重度荒漠化区 DDI 最小, 2000—2022 年均值为 0.22, 重度荒漠化区、中度荒漠化区、轻度荒漠化区、非荒漠化区均值分别达到 0.35, 0.51, 0.66, 0.84。从 DDI 时间序列数据看, 表现出一定的周期波动向上的特征, 而不是单边的上涨, 表明甘肃省荒漠化程度在逐渐改善, 但荒漠化受到降雨、气温、风速等气象条件的影响, 表现出一定的波动特征, 分类对比看, 荒漠化改善速度表现出“中间快、两边慢”的特征, 即中度荒漠化区 DDI 年均增长率高于其他 4 种类型。

3.2 荒漠化空间自相关特征

将 2000—2022 年甘肃省 DDI 进行全局自相关分析, 得到各年份的自相关参数(如表 3 所示)。从表 3 可以看出, 甘肃省 2000—2022 年 DDI 全局 Moran's

I 指数在 0.96 左右, 说明甘肃省荒漠化呈现出非常强的聚集特征。为了更好地了解荒漠化集聚特征, 通过局部 Moran's *I* 指数对 2000—2022 年甘肃省 DDI 进行进一步分析。

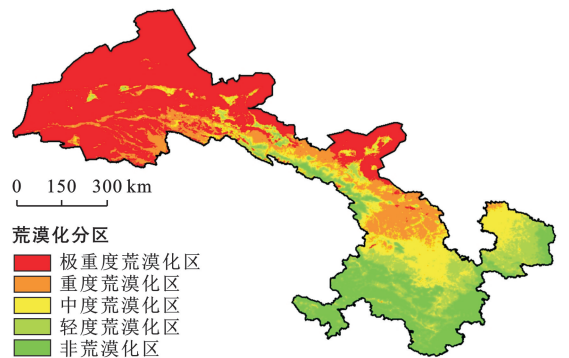


图 3 甘肃省荒漠化时间序列数据聚类结果

Fig.3 Clustering results of desertification time series data in Gansu Province

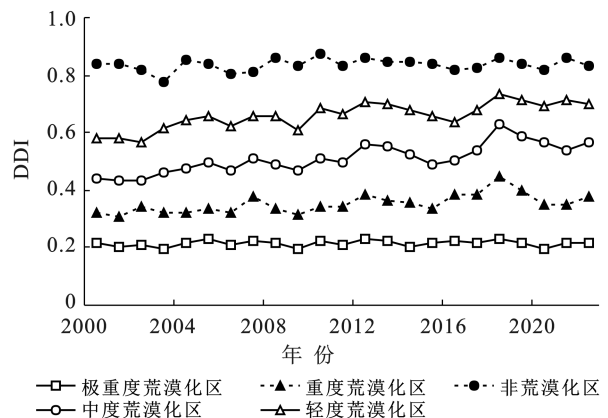


图 4 2000—2022 年甘肃省各类型荒漠化区时间序列特征
Fig.4 Time series characteristics of various types of desertification areas in Gansu Province from 2000 to 2022

表 3 甘肃省 2000—2022 年 DDI 全局自相关参数
Table 3 Global autocorrelation parameters of DDI in Gansu Province from 2000 to 2022

年份	Moran's <i>I</i> 指数	<i>z</i> 得分	<i>p</i> 值
2000 年	0.965	2 965.820	0
2005 年	0.972	1 903.805	0
2010 年	0.979	1 638.397	0
2015 年	0.965	2 276.046	0
2020 年	0.961	3 539.181	0
2022 年	0.95	3 343.937	0

由图 5 可知,甘肃省 DDI 空间聚集类型主要为低低聚集、高高聚集,不显著有一定比例但逐渐减少,低高异常和高低异常比例最低,几乎不存在,这说明了荒漠化程度存在明显的空间正相关性;从空间分布看,高高聚集主要分布于甘肃省北部区域,低低聚集

主要分布于甘肃省南部及祁连山东部区域,不显著主要位于两类区域过渡地带。

3.3 甘肃省荒漠化影响因素分析

为探索荒漠化的影响因素,本文参考已有的研究^[22-24],结合甘肃省的实际情况,选取了人口数量、气温、风速、降雨 4 个潜在的影响因素进行分析。考虑到研究区的范围及荒漠化的空间尺度特征,本文在研究区提取各乡镇的 DDI 及其影响因子的均值,将各影响因子归一化处理,使用 OLS 模型进行分析,分析结果如表 4 所示。从模型变量看,4 个因子均通过了 1% 显著假设检验。从变量系数看,风速和人口与 DDI 值呈现负相关,而降雨和气温与 DDI 呈现正相关。对比系数的绝对值可发现降雨与 DDI 相关性最强,风速和人口次之,气温与 DDI 的相关性最弱。

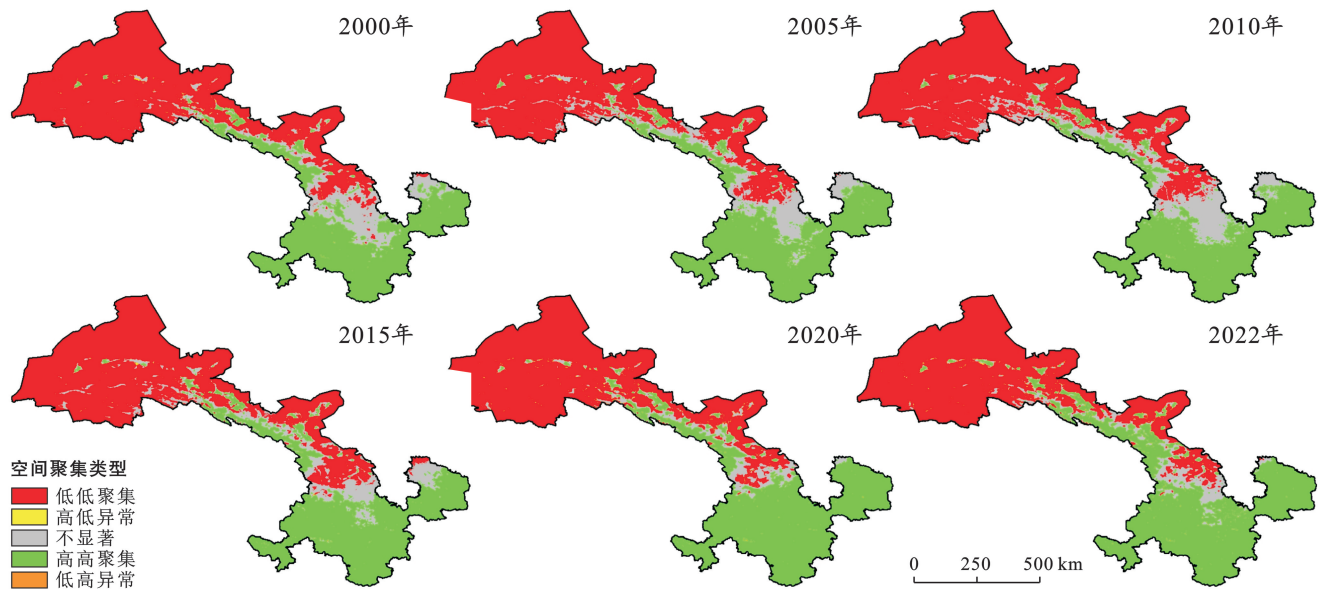


图 5 2000—2022 年甘肃省 DDI 聚集图

Fig.5 Cluster map of DDI in Gansu Province from 2000 to 2022

表 4 甘肃省 DDI 的最小二乘回归模型参数

Table 4 DDI ordinary least squares model parameters in Gansu Province

变量	系数	标准误差	<i>p</i> 值	稳健 <i>p</i> 值	VIF
截距	0.341 627	0.007 003	0.000 *	0.000 *	—
人口	-0.144 049	0.013 362	0.000 *	0.000 *	1.044 529
气温	0.064 542	0.007 394	0.000 *	0.000 *	1.087 599
风速	-0.245 331	0.009 549	0.000 *	0.000 *	1.182 390
降雨	0.804 077	0.007 530	0.000 *	0.000 *	1.235 533

为了探究 DDI 影响因素的时空异质性,本文在 OLS 回归的基础上,进行了 GTWR 系列模型分析,分析结果如表 5 所示,TWR,GWR 模型比 OLS 模型拟合度提高约 5%,GTWR 模型比 OLS 拟合度提高约 10%,表明甘肃省荒漠化的影响因子具有一定的

时空异质性。

为了进一步探索各变量的影响,得到 GTWR 模型 2022 年各变量回归系数图(图 6)。从图中可以看出降雨与 DDI 的回归系数均为正值,说明了降雨对甘肃省所有区域的荒漠化改善均有益处;人口对荒漠

化的影响整体为负向,即人口的增加会加重荒漠化的程度,但西北部少数区域人口与 DDI 呈现正相关;风速会明显加重荒漠化,且对西北部的影响大于东南部;气温对荒漠化的影响具有两面性,西南的区域气温升高会加重荒漠化的发生,其余区域气温与 DDI 正相关。综合以上分析,降雨对缓解荒漠化最有益处,人口和风速会显著加重荒漠化的发生,气温升高会造成西南区域荒漠化程度加重,其余区域会减轻。

表 5 甘肃省 DDI 地理时空加权回归系列模型拟合结果
Table 5 Fitting results of DDI geographically and temporally weighted regression models in Gansu Province

模型	R^2	$R^2_{Adjusted}$	AICc
OLS	0.672	0.672	-14 434
TWR	0.723	0.723	-15 820
GWR	0.72	0.72	-15 736
GTWR	0.767	0.767	-17 193

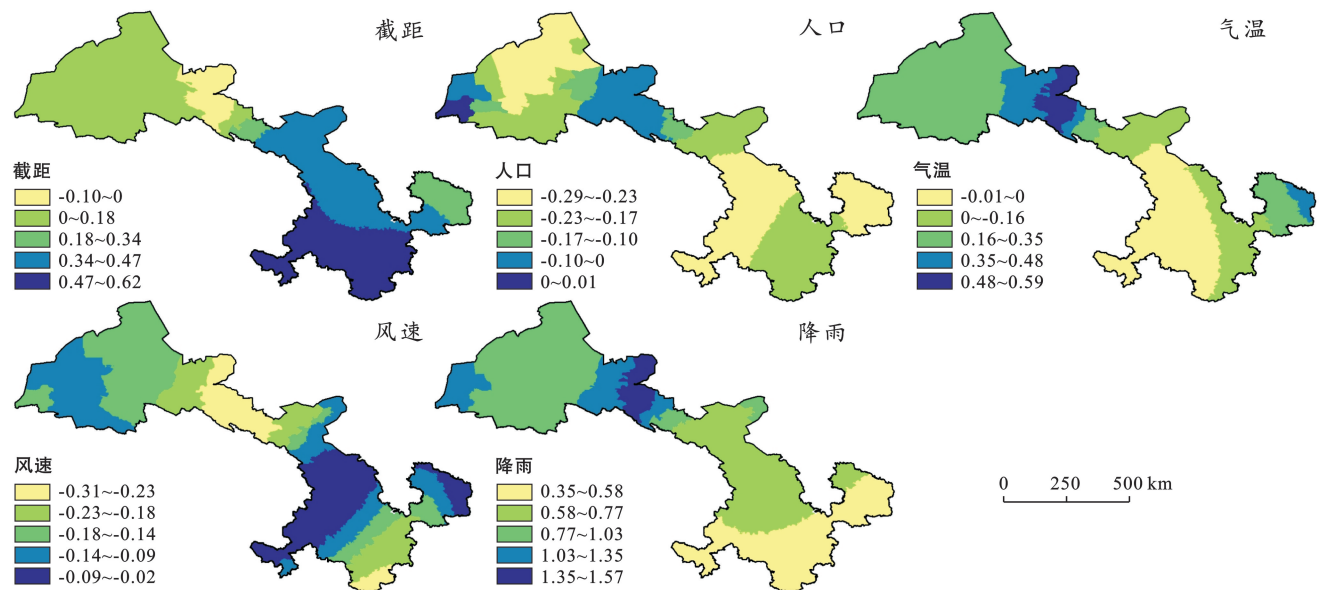


图 6 甘肃省地理时空加权回归模型各参数系数

Fig.6 Geographically and temporally weighted regression model parameter coefficients in Gansu Province

从模型拟合残差分布来看(图 7),从 OLS 到 GTWR 模型,残差逐渐减小,说明了人口、气温、风速、降雨 4 大因素对荒漠化有较好的解释度。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文基于 NDVI-Albedo 特征空间构建了荒漠化差值指数,在此基础上分析了甘肃省 2000—2022 年荒漠化时空变化特征及影响因素。荒漠化分布及变化趋势与现有研究成果^[25-26]基本一致。整体来看,甘肃省荒漠化表现为西北重于中部,东南最轻,造成这一现象的原因主要是由于甘肃省受到多种类型的荒漠化影响,西北地区与库姆塔格、腾格里、巴丹吉林 3 大沙漠接壤,受沙漠风蚀作用影响,同时这些地区干旱少雨,蒸降比较高,易发生土壤盐渍化,从而加剧了荒漠化,祁连山一线叠加季节、昼夜温差较大引发的冻融荒漠化^[27];中部的黄土高原地区受水土流失影响,荒漠化也较为严重;23 a 间甘肃省荒漠化程度有了很大的改善,反映出“三北”治理的成效,酒泉市北

部荒漠化程度在 23 a 间几乎没有变化,表明其治理的难度。

甘肃省荒漠化的驱动因素中,风速会明显加重荒漠化程度,且对西北部的影响大于东南部,这是由于风蚀荒漠化是甘肃省主要的荒漠化类型,其中,尤以西北最甚,而风是荒漠化的自然动力,会改变地表形态,使植被覆盖度降低,从而加剧荒漠化^[28];多数地区人口增加,荒漠化程度会加重,这是由于人口的增长带来对土地资源的压力及不合理的经营活动造成的^[29],但西北部少数区域人口与 DDI 呈现正相关,这可能是人口增加带来的生态保护项目缓解荒漠化的缘故^[30];降雨与 DDI 正相关,且回归系数较大,说明降雨对减轻荒漠化效果显著,这主要是由于降雨量增加会使植被长势变好,同时降雨的增加也可以减弱风蚀作用的影响,值得注意的是东南部降雨与 DDI 的回归系数小于西北,这是由于降雨同时会加重黄土高原水土流失的缘故^[31]。

气温对荒漠化的影响具有两面性,气温升高会导致蒸发进一步加强,造成土壤持水能力下降,从而引

发荒漠化^[32],但气温升高也会引起植被长势变好^[33],从而减轻荒漠化。本文使用的 GTWR 模型拟合的模型可以探测荒漠化的影响因素,但中部区域残差较

大,这可能是由于存在其他因素影响荒漠化,需要进一步研究,此外,适应不同荒漠化类型的其他指标也值得进一步探讨。

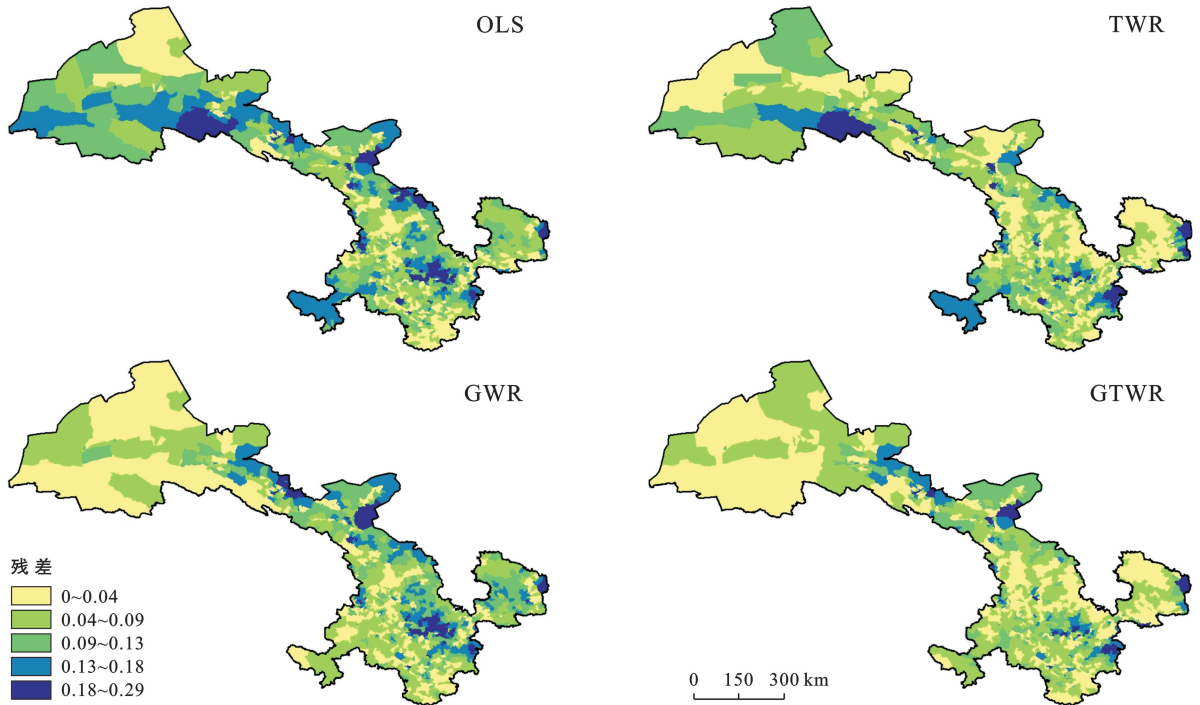


图 7 甘肃省 DDI 地理时空加权回归系列模型拟合残差绝对值分布图

Fig.7 Distribution of absolute residual values of DDI geographically and temporally weighted regression models in Gansu Province

4.2 结论

(1) NDVI-Albedo 特征空间中“干边散点”的 NDVI 与 Albedo 具有较强的相关性,故由此构建的荒漠化差值指数可以表征荒漠化程度。

(2) 甘肃省荒漠化整体呈现出“西北荒东南绿”的特点,荒漠化程度呈现明显的圈层分布,西北区域同时受风蚀荒漠化和盐渍化影响,荒漠化最严重,向东南方向荒漠化程度逐渐减轻,中部地区受水土流失影响荒漠化程度仍较严重,南部区域荒漠化程度较轻;此外,甘肃省荒漠化呈现出明显的空间正相关性,即空间集聚特征主要表现为高高聚集和低低聚集。时间上,23 a 间,甘肃省荒漠化程度逐渐改善,且南部区域改善程度强于北部区域,

(3) 甘肃省 DDI 与人口、气温、风速、降雨密切相关,且相关系数表现出较明显的时空异质性,降雨与 DDI 呈现正相关,且对西北部的影响大于东南部;风速和人口会加剧荒漠化的发生,西南区域气温升高荒漠化程度会加重,其余区域则相反。

参考文献 (References)

[1] Kassas M. Desertification: A general review [J]. Journal of Arid Environments, 1995,30(2):115-128.

[2] Rivera-Marin D, Dash J, Ogutu B. The use of remote sensing for desertification studies: A review [J]. Journal of Arid Environments, 2022,206:104829.

[3] Liu Qingfu, Zhang Qing, Yan Yongzhi, et al. Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,268:122241. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122241.

[4] 敏玉芳,张耀南,康建芳,等.基于 MODIS 影像的中巴经济走廊荒漠化程度时空动态监测研究[J].遥感技术与应用,2021,36(4):827-837.

Min Yufang, Zhang Yaonan, Kang Jianfang, et al. Study on spatial-temporal dynamic monitoring of degree of desertification in CPEC based on MODIS image [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021,36(4):827-837.

[5] 王旭,刁兆岩,郑志荣,等.中蒙毗邻草原区荒漠化时空动态研究[J].环境科学研究,2021,34(12):2935-2944.

Wang Xu, Diao Zhaoyan, Zheng Zhirong, et al. Temporal and spatial dynamics of desertification in adjacent steppe of China and Mongolia [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(12):2935-2944.

[6] Higginbottom T P, Symeonakis E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data;

- Current frameworks and future directions [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10):9552-9575.
- [7] Lamqadem A A, Saber H, Pradhan B. Quantitative assessment of desertification in an arid oasis using remote sensing data and spectral index techniques [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12):1862.
- [8] 闫峰, 吴波. 近 40 a 毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(6):987-996.
- Yan Feng, Wu Bo. Desertification progress in Mu Us Sandy Land over the past 40 years [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(6):987-996.
- [9] 张华, 陈蕾. 基于线性光谱混合模型(LSMM)的民勤绿洲荒漠化治理效果评价[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3):145-154.
- Zhang Hua, Chen Lei. Evaluation of desertification control effect in the Minqin Oasis in Gansu, China, based on LSMM [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(3):145-154.
- [10] Lian Jie, Zhao Xueyong, Li Xin, et al. Detecting sustainability of desertification reversion: Vegetation trend analysis in part of the agro-pastoral transitional zone in Inner Mongolia, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(2):211.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 王树祥, 韩留生, 杨骥, 等. 一种改进的融合多指标荒漠化等级分类方法[J]. *测绘通报*, 2021(4):8-12.
- Wang Shuxiang, Han Liusheng, Yang Ji, et al. An improved method of combining multi-indicator desertification classification [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(4):8-12.
- [13] 张博, 周伟, 张福存. 1999—2018 年青海省土地退化遥感监测及其驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2):120-128, 325.
- Zhang Bo, Zhou Wei, Zhang Fucun. Remote sensing monitoring and driving force analysis of land degradation in Qinghai Province from 1999 to 2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2):120-128, 325.
- [14] 杨超, 王金亮, 李石华, 等. 抚仙湖流域土地退化动态遥感监测研究[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2):388-396.
- Yang Chao, Wang Jinliang, Li Shihua, et al. Land degradation dynamic remote sensing monitoring of Fuxian Lake basin [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2):388-396.
- [15] 李志鹏, 曹晓明, 丁杰, 等. MODIS 卫星影像显示的 2001—2017 年中国荒漠化年度状况[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6):135-140.
- Li Zhipeng, Cao Xiaoming, Ding Jie, et al. Annual Desertification during 2001—2017 in China Based on MODIS Satellite Images [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6):135-140.
- [16] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. *地理科学*, 2006, 26(1):75-81.
- Zeng Yongnian, Xiang Nanping, Feng Zhaodong, et al. Albedo-NDVI space and remote sensing synthesis index models for desertification monitoring [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1):75-81.
- [17] Feng Yuanyuan, Wang Shihang, Zhao Mingsong, et al. Monitoring of land desertification changes in urut front banner from 2010 to 2020 based on remote sensing data [J]. *Water*, 2022, 14(11):1777.
- [18] 岳辉, 刘英. 基于 NDVI-Albedo 特征空间的陕西省干旱与荒漠化遥感监测[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1):198-205.
- Yue Hui, Liu Ying. Monitoring of drought and desertification in Shaanxi Province based on NDVI-Albedo space [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1):198-205.
- [19] 李玉, 陶从辉, 赵泉华. 基于 EVI-Albedo 特征空间的土地荒漠化遥感分类方法[J]. *遥感信息*, 2022, 37(5):8-14.
- Li Yu, Tao Conghui, Zhao Quanhua. A remote sensing classification method of land desertification based on EVI-Albedo space [J]. *Remote Sensing Information*, 2022, 37(5):8-14.
- [20] Huang Bo, Wu Bo, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3):383-401.
- [21] Montero P, Vilar J A. TSclust: An R package for time series clustering [J]. *Journal of Statistical Software*, 2014, 62(1):1-43.
- [22] 郑佳翔, 孙桂丽, 苏香玲, 等. 阿克苏地区荒漠化变化趋势及其驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4):278-285.
- Zheng Jiexiang, Sun Guili, Su Xiangling, et al. Trends of desertification change and its driving factors in Aksu Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4):278-285.
- [23] 孙枝星, 钟成, 何宏伟, 等. 2000—2015 年中国土地荒漠化连续遥感监测及其变化[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(3):87-92.

- Sun Jixing, Zhong Cheng, He Hongwei, et al. Continuous remote sensing monitoring and changes of land desertification in China from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(3): 87-92.
- [24] 宁立波, 杨俊仓. 民勤县土地荒漠化遥感分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2): 115-119.
Ning Libo, Yang Juncang. The remote sensing analysis of land desertification dynamic changes in Minqin [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 28(2): 115-119.
- [25] 魏伟, 俞啸, 张梦真, 等. 1995—2018 年石羊河流域下游荒漠化动态变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2098-2106.
Wei Wei, Yu Xiao, Zhang Mengzhen, et al. Dynamics of desertification in the lower reaches of Shiyang River Basin, Northwest China during 1995-2018 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2098-2106.
- [26] Han Lanying, Zhang Zhengcai, Zhang Qiang, et al. Desertification assessments in the Hexi corridor of Northern China's Gansu Province by remote sensing [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2715-2731.
- [27] 薛华柱, 金磊, 董国涛, 等. 河西走廊近 40 年地表土壤冻融状态变化特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 65-73, 82.
Xue Huazhu, Jin Lei, Dong Guotao, et al. Analysis of spatiotemporal variations of freeze-thaw state of surface soil in Hexi corridor in recent 40 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 65-73, 82.
- [28] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 41-49.
Liu Yuzhang, Dong Guangrong, Li Changzhi. Study on some factors influencing soil erosion by wind tunnel experiment [J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(4): 41-49.
- [29] 朱震达, 崔书红. 中国荒漠化土地分布地域特征及其治理措施的评估[J]. *中国环境科学*, 1996(5): 328-334.
Zhu Zhenda, Cui Shuhong. Features of distribution and assessment for control measures of desertification in China [J]. *China Environmental Science*, 1996(5): 328-334.
- [30] 汪震, 姜勇彪, 岳兵. 江西吉泰盆地荒漠化时空变化特征及影响因素分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(2): 150-155.
Wang Zhen, Jiang Yongbiao, Yue Bing. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of land desertification in Jitai Basin, Jiangxi Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(2): 150-155.
- [31] 李伯祥, 陈晓勇, 徐爱婷. 基于 DEM 校正 TVDI 的华北地区旱情监测分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(3): 266-273.
Li Boxiang, Chen Xiaoyong, Xu Wenting. Drought monitoring analysis in North China based on DEM correction TVDI [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(3): 266-273.
- [32] 何鹏杰, 张恒嘉, 王玉才, 等. 河西地区临泽县土地荒漠化影响因素分析[J]. *环境工程*, 2016, 34(增刊 1): 1111-1116.
He Pengjie, Zhang Hengjia, Wang Yucai, et al. Analysis of influencing factors of land desertification of Hexi corridor of Linze County [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(Suppl.1): 1111-1116.
- [33] 马龙, 王静茹, 刘廷玺, 等. 2000—2012 年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 162-172.
Ma Long, Wang Jingru, Liu Tingxi, et al. Response relationship between vegetation and climate factors in Horqin sandy land from 2000 to 2012 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 162-172.
- Wang Zhao, Li Dengke. Spatial-temporal distribution of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2015 in Shaanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [37] 吴艳艳, 吴志峰, 余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2535-2544.
Wu Yanyan, Wu Zhifeng, Yu Shixiao. Quantitative assessment of the impacts of human activities on net primary productivity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2535-2544.

(上接第 353 页)

- [35] 盛叶子, 曾蒙秀, 林德根, 等. 2000—2014 年人类活动对贵州省植被净初级生产力的影响[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 62-70.
Sheng Yezi, Zeng Mengxiu, Lin Degen, et al. Impacts of human activities on net primary productivity of vegetation in Guizhou Province from 2000 to 2014 [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 62-70.
- [36] 王钊, 李登科. 2000-2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1876-1884.