

# 阿克苏地区荒漠化变化趋势及其驱动因素

郑佳翔<sup>1</sup>, 孙桂丽<sup>1,2</sup>, 苏香玲<sup>3</sup>, 冉亚军<sup>1</sup>, 郑旭<sup>1</sup>

(1.新疆农业大学 林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.干旱区林业生态与产业技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3.新疆维吾尔自治区林业规划院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** [目的] 对2009—2019年阿克苏地区荒漠化变化趋势及其驱动因素进行分析,为该区生态修复、因地制宜制定荒漠化防治政策提供科学依据。[方法] 基于《全国第六次荒漠化监测细则》构建荒漠化评价指标体系,在ArcGIS和IDRISI软件的支持下,对2009—2019年阿克苏地区荒漠化变化趋势进行评价,分析荒漠化驱动因素并做出预测。[结果] ①2009—2019年阿克苏地区荒漠化面积逐年降低,荒漠化呈现逆转态势。阿克苏地区荒漠化呈现较强的空间异质性,极重度荒漠化区域位于研究区南部与塔克拉玛干沙漠接壤地带,极重度荒漠化所占比例最大。②2009—2019年阿克苏地区荒漠化单一驱动因素分析结果显示,土地利用类型是阿克苏地区荒漠化最重要的影响因子,多驱动力因子交互作用对荒漠化演化的解释力比单因子更强,作用方式与强度表现为增强与非线性增强。③CA-Markov模型预测结果显示,在驱动因素不改变时,2019—2024年阿克苏地区荒漠化程度持续逆转,整体表现为极重度荒漠化转化为重度荒漠化,部分地区荒漠化面积扩张。[结论] 研究时段内,研究区荒漠化面积减少,荒漠化程度呈逆转态势,影响荒漠化主要因素为土地利用类型。在荒漠化的治理与防治过程中,应当结合荒漠化驱动因素,合理有效地实施荒漠化防治以及生态修复工程。

**关键词:** 荒漠化; 驱动因素; 预测; 阿克苏地区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)04-0278-08

**中图分类号:** X171.1

**文献参数:** 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.035; 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.

## Trends of Desertification Change and Its Driving Factors in Aksu Region

Zheng Jiexiang<sup>1</sup>, Sun Guili<sup>1,2</sup>, Su Xiangling<sup>3</sup>, Ran Yajun<sup>1</sup>, Zheng Xu<sup>1</sup>

(1.College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 2.Key Laboratory of Forestry Ecology and Industrial Technology in Arid Areas, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3.Xinjiang Uygur Autonomous Region Forestry Planning Institute, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** [Objective] The trend and driving factors of desertification change in the Aksu region from 2009 to 2019 were studied in order to provide a scientific basis for ecological restoration in the region and for formulating desertification control policies according to local conditions. [Methods] A desertification evaluation index system was constructed based on the Sixth National Rules for Monitoring Desertification. The trend in desertification change in the Aksu region from 2009 to 2019 was evaluated with ArcGIS and IDRISI software, and the driving factors of desertification were analyzed and the predictions were made. [Results] ① The desertification area in the Aksu region decreased over time from 2009 to 2019, and desertification declined. Desertification in the Aksu region showed strong spatial heterogeneity, and the area of extremely severe desertification was located in the southern part of the study area bordering the Taklamakan Desert. The extremely severe desertification area accounted for the largest proportion of the desertification area. ② The results of the single driver analysis of desertification in the Aksu region from 2009 to 2019 showed that land

收稿日期:2022-02-16

修回日期:2022-03-11

资助项目:新疆维吾尔自治区2021“三区人才”项目“乌什县荒漠资源调查、治理与修复”(2221-LYE1);国家自然科学基金项目(41861046)

第一作者:郑佳翔(1996—),男(汉族),新疆维吾尔自治区昌吉市人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。Email:826025438@qq.com。

通讯作者:孙桂丽(1979—),女(汉族),河南省兰考县人,教授,主要从事生态风险评估与荒漠化防治方面的研究。Email:sxfgl@126.com。

use type was the most important factor influencing desertification in the Aksu region, and the interaction of multiple drivers had stronger explanatory power on desertification evolution than any single factor. The mode and intensity of action showed enhancement and non-linear enhancement, respectively. ③ The prediction results from the CA-Markov model showed that if the driving factors did not change, the degree of desertification in the Aksu region would continue to reverse during 2019—2024, and the overall change for the area would be from extremely severe desertification to severe desertification. The desertification area would expand in some regions. [Conclusion] The desertification area in the study area decreased during the study period, and the desertification degree declined. The main factor affecting desertification was land use type. Desertification control as well as ecological restoration projects should be carried out to reasonably and effectively control and prevent desertification by focusing on combinations of the desertification driving factors.

**Keywords:** desertification; driving factors; forecast; Aksu region

因自然和人为因素导致干旱、半干旱和具有干旱灾害的半湿润地区发生土地退化的现象为荒漠化<sup>[1]</sup>。荒漠化是当今人类面临的最具威胁的区域性环境问题之一<sup>[2]</sup>,有“地球癌症”之称<sup>[3-4]</sup>,其发生常伴随着生产力下降<sup>[5]</sup>、土地资源丧失以及生物多样性丧失等<sup>[6]</sup>生态环境退化问题,土壤固碳能力下降,最终沦为难以利用的土地。为制定荒漠化防治措施,应当了解荒漠化驱动因素以及未来发展趋势。国内外研究发现荒漠化成因普遍与气候变化、人类过度干扰活动等直接相关<sup>[7]</sup>。气候只是荒漠化发展的一个基本因素<sup>[8]</sup>,而强大的人类干扰和利用给自然生态系统带来了深刻影响,导致生态环境退化,表现为生物多样性减少、荒漠化、生产力下降、土壤及养分流失、水体污染等<sup>[9]</sup>。近年来已有大量学者针对荒漠化驱动因素做出研究。郑伟<sup>[10]</sup>从草地荒漠化过程及其与其他生态系统的相互关系入手,探讨自然因素和人为因素对草地荒漠化的影响;张希彪<sup>[11]</sup>以农牧交错带南部的甘肃省环县为研究对象,采用主成分分析法,对引起土地荒漠化的自然因子与人为因子进行了定量分析;范泽孟<sup>[12]</sup>在 GEE(google earth engine)云平台上,实现 Thornthwaite Memorial 模型的算法设计,进而求解 PNPP(potential net primary productivity)和 HANPP(human appropriation of net primary productivity),结合降水和气温数据的空间数据,在 GEE 平台上构建并实现了中蒙俄经济走廊荒漠化驱动机理综合分析模型;另一方面国内学者在变化机制和变化预测方面研究较少,宋冬梅<sup>[13]</sup>利用 ArcObjects 模块结合地理元胞自动机理论构造荒漠化动态模拟模型,对 2012 年该区土地利用状况做出预测,进而对荒漠化的发展趋势进行预测分析;于辉<sup>[14]</sup>将人工神经网络 ANN(artificial neural network)应用至元胞自动机构建 ANN-CA(artificial neural network cellular automaton)模型预测精河县荒漠化演化趋势。未来应在土地荒漠化研究中注重各学科的交叉,加强对荒漠化的预

测研究,提前做出应对措施<sup>[15]</sup>。鉴于此,本研究以 2009 和 2014 年荒漠化监测数据,2019 年阿克苏地区影像数据和地面调查数据为基础,重点分析阿克苏地区荒漠化空间分布特征、驱动因素及模拟预测,为进一步推进区域荒漠化联防联控和生态恢复提供科学依据<sup>[16]</sup>。

## 1 研究区概况

阿克苏地区总面积  $1.33 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,地处新疆维吾尔自治区天山南麓,与巴音郭楞蒙古自治州、喀什地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州接壤,临近塔里木盆地北部和塔克拉玛干沙漠。阿克苏地区具有气候干燥,降雨少,日照长的特点,属典型暖温带大陆性气候,年日照时数为 2 750~3 029 h,太阳总辐射量为 5 340~6 220 MJ/m<sup>2</sup>,是全国太阳辐射量较多的地区之一,光热资源十分丰富,昼夜温差大,无霜期长,全年为 183~227 d,年平均气温在 9.9~11.5 °C,年降水量 42.4~94.4 mm,具有冬季干冷和夏季干热的气候特点。

## 2 数据来源与预处理

(1) 荒漠化监测数据。本文 2009 和 2014 年荒漠化监测数据来源于新疆维吾尔自治区林业规划院第 4,5 次全疆荒漠化监测数据和汇总报告,由于坐标系分别为 WGS(world geodetic system)1984 与西安 1980,需在 ArcGIS 里转换坐标系,本文坐标系统统一使用 CGCS(china geodetic coordinate system)2000,像元大小为(0.012 781 003,0.012 781 003)。实习期间对阿克苏地区 2019 年遥感影像对其进行图斑区划、目视解译与实地调查,获取植被覆盖度、土壤质地、砾石含量等评价标准所需数据,结合前期数据完成本期荒漠化类型、程度的评判,在 ArcGIS 完成图斑赋值,并进行数据检测。

(2) 驱动因子数据。研究区所选总降雨量、人口密度、人均 GDP (gross domestic product)、浮尘日数、日照时数、来自于 2010, 2015, 2020 年阿克苏地区统计年鉴, 在 ArcGIS 中将数据使用反距离权重法, 投影转换为与荒漠化数据相同坐标系、像元、范围的栅格数据; 植被覆盖度通过计算植被归一化指数获得; 所选坡度数据来自云地理监测平台 (<http://www.dsac.cn/>), 基于 Landsat 遥感影像经过校准得到的 2009—2019 年 30 m 精确度 DEM (digital elevation model) 数据, 在 ArcGIS 中使用 3D Analyst 工具提取坡度; 平均风速、平均气温来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 在 ArcGIS 中进行空间差值处理。

表 1 元胞实体属性

荒漠化程度	空值	非荒漠化	轻度荒漠化	中度荒漠化	重度荒漠化	极重度荒漠化
属性化数值	0	1	2	3	4	5

### 3 研究方法

#### 3.1 荒漠化分级

根据荒漠化已有研究成果, 结合新疆维吾尔自治区荒漠化实际情况, 本文从气候、植被、土壤三方面对荒漠化评价指标进行了确定, 在确定荒漠化类型和土地利用类型后通过调查多个因子的定量值或定性值, 确定各因子的评分标准, 用各因子的评分标准之和确定是否为荒漠化土地。本文将阿克苏地区荒漠化土地划分为 5 个等级, 即非荒漠化、轻度荒漠化、中度荒漠化、重度荒漠化、极重度荒漠化。

#### 3.2 驱动力分析

3.2.1 驱动因子选取 为了定量研究各驱动因子对荒漠化演化发育的影响并探讨土地荒漠化的成因机制, 根据荒漠化的发育过程与演化特征, 依据阿克苏地形地貌类型特点以及荒漠化的分布范围, 既考虑各单一因子的影响, 又考虑各因子的综合影响, 结合数据的可得性与可靠性, 分别从经济发展水平、人口因素、空间距离、自然环境因子、农业生产活动等因素指标, 建立荒漠化驱动因子指标体系, 具体驱动因子详见表 2。

3.2.2 地理探测器模型 传统的相关分析和空间分析等方法未能量化地揭示各驱动因素对荒漠化的作用程度。而采用地理探测器的方法, 可基于地理现象的空间异质性原理来揭示影响荒漠化发育演化内在的驱动力<sup>[17]</sup>。地理探测器包括因子探测、生态探测、风险探测和交互探测 4 个部分。

(1) 因子探测模型。主要分析荒漠化受到来自各变量的影响力大小。其模型定义为:

(3) 荒漠化预测。①元胞及元胞空间。在荒漠化研究中, 将荒漠化栅格数据视为元胞。荒漠化栅格化后的图斑合集为元胞空间, 每个栅格图斑对应一个元胞。首先将 ArcGIS 软件所有数据栅格化, 统一所有栅格数据像元大小、投影坐标系及范围再将栅格数据转为 IDRISI 可识别的元胞格式 (arc.), 最后通过 IDRISI 软件将 ASCII (American standard code for information interchange) 格式的数据转为该软件可识别的数据格式。②元胞状态。本文将荒漠化程度确定为元胞状态指标, 在预测过程中需先对荒漠化程度进行分类与赋值 (表 1), 在自身状态、邻居图斑状态、转移概率的综合作用下, 荒漠化程度超过某个阈值即发生改变。

$$q = 1 - \frac{\sum_{k=1}^L N_k \sigma_k^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中:  $L$  为驱动因素划分后等级;  $N_k$  和  $\sigma_k^2$  分别为层  $k$  的单元数和方差;  $N$  和  $\sigma^2$  分别为研究区域整体单元数和方差。  $q$  值的范围为  $[0 \sim 1]$ , 值越大表示因子对荒漠化空间分异的解释力越强, 反之则越弱。如果影响因子完全控制因变量的分布, 则  $q=1$ ; 反之, 则  $q=0$ 。

表 2 阿克苏地区驱动因子指标选取

维度	分层指标	编号	分层方案	层数
经济发展水平	GDP	$X_1$	自然断裂点分级法	5
	土地利用类型	$X_2$	自然断裂点分级法	7
人口因子	人口密度	$X_3$	自然断裂点分级法	5
	降水	$X_4$	自然断裂点分级法	5
	气温	$X_5$	自然断裂点分级法	5
自然环境因子	风速	$X_6$	自然断裂点分级法	5
	日照	$X_7$	自然断裂点分级法	5
	坡度	$X_8$	自然断裂点分级法	5
	浮尘日数	$X_9$	自然断裂点分级法	5
	植被盖度	$X_{10}$	自然断裂点分级法	5

(2) 生态探测模型。通过 F 统计量分析是否驱动因子在影响荒漠化过程中存在显著性差异, 如果存在显著性差异, 记为“Y”, 否则记为“N”, 进一步判断哪一种因子对荒漠化更具有影响力。

(3) 风险探测模型。运用 T 统计量判断某一影响因子在不同子区域因变量荒漠化的平均值是否存在显著差异, 具体计算公式为:

$$t_{y_{h=1} - \bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[ \frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=1})}{n_{k=1}} + \frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=2})}{n_{k=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中: $\bar{y}_k$  是研究区的子区间  $k$  内的因变量均值; $n_k$  是研究区的子区间  $k$  内样本数量, $\text{var}(\bar{y}_{k=1}), \text{var}(\bar{y}_{k=2})$  表示  $\bar{y}_{k=1}$  与  $\bar{y}_{k=2}$  的方差,其中自由度的计算公式为:

$$df = \frac{\frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=1})}{n_{k=1}} + \frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=2})}{n_{k=2}}}{\frac{1}{n_{k=1}-1} \left[ \frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=1})}{n_{k=1}} \right]^2 + \frac{1}{n_{k=2}-1} \left[ \frac{\text{var}(\bar{Y}_{k=2})}{n_{k=2}} \right]^2} \quad (3)$$

零假设  $H_0: \bar{Y}_{k=1} = \bar{Y}_{k=2}$ , 如果在置信水平  $\alpha$  下拒绝零假设  $H_0$ , 则表示两个子区间的荒漠化均值存在显著性差异。

(4) 交互探测模型。用于识别两个影响因子共同作用时是否将会减弱或增强对因变量的解释力, 或两个影响因子对因变量的影响彼此独立, 其交互作用类型详见表 3。

表 3 交互作用类型判断依据

判断依据	交互作用类型
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立

注:  $\cap$  是  $X_1$  和  $X_2$  两个影响因素的叠加运算。

### 3.3 荒漠化演化模拟

通过 IDRISI 软件, 基于研究区荒漠化驱动因素分析, 构建阿克苏地区荒漠化 CA-Markov 模型。模型构建主要分为两个过程: ①采用 2009—2014 年阿克苏地区荒漠化数据构建荒漠化转换矩阵模型并以此模拟 2019 年荒漠化发展状况; ②将模拟结果与 2019 年实际调查荒漠化数据进行 kappa 验证。若通过验证则对 2024 年阿克苏地区荒漠化进行预测<sup>[18]</sup>。

在研究地理空间演化机制的基础上, 将状态演化信息类属性项的值引入 CA 的局部演化规则, 确定各元胞状态的演化规则。在实际元胞状态演化中, 中心元胞其演化规则可由下式表示:

$$f: S_i^{t+1} = f(A_i^t, S_i^t, S_N^t, A_N^t) \quad (4)$$

即在演化规则 ( $f$ ) 下中心元胞下一刻状态值 ( $S_i^{t+1}$ ) 决定因素为上一时刻的状态值 ( $S_i^t$ )、邻居的状态组合 ( $S_N^t, A_N^t$ ) 及控制因素层 ( $A_i^t$ )。

式中:  $S_N^t, S_i^{t+1}, S_i^t$  为同一类型;  $A_N^t, A_i^t$  为同一类型;

在本研究中, 控制因素为影响阿克苏地区荒漠化的驱动因子(表 2)。

## 4 结果与分析

### 4.1 阿克苏地区荒漠化趋势

通过对比研究区 3 个时期荒漠化土地空间分布(图 2, 表 4), 可以看出研究区荒漠化面积约占全区总面积的 78%, 极重度荒漠化土地面积最广, 极重度荒漠化分布范围  $3.56 \times 10^6 \sim 3.76 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占研究区总面积的 28.42%~29.96%。极重度荒漠化土地主要分布在阿瓦提县、阿克苏市和沙雅县 3 个县市的南部与塔克拉玛干沙漠接壤的地带。此外, 乌什县和柯坪县接壤的山脉区也分布有面积较大的极重度荒漠化土地。轻度荒漠化土地集中在研究区绿洲区附近, 中度荒漠化在研究区北部与西部存在大面积分布, 重度荒漠化主要分布在沙雅县北部以及新和县、拜城县等东部县市。

表 4 阿克苏地区 2009—2019 年荒漠化面积统计

荒漠化程度	2009 年		2014 年		2019 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
轻度	$1.34 \times 10^6$	10.75	$1.13 \times 10^6$	9.01	$1.08 \times 10^6$	8.66
中度	$2.58 \times 10^6$	20.62	$2.83 \times 10^6$	22.56	$2.87 \times 10^6$	22.86
重度	$2.53 \times 10^6$	20.16	$2.39 \times 10^6$	19.00	$2.24 \times 10^6$	17.85
极重度	$3.76 \times 10^6$	29.96	$3.70 \times 10^6$	29.53	$3.56 \times 10^6$	28.42
总计	$1.02 \times 10^7$	81.49	$1.00 \times 10^7$	80.16	$9.76 \times 10^6$	77.79

2009—2019 年阿克苏地区土地荒漠化现象突出, 荒漠化土地面积仍然在增加, 其中 2009—2014 年温宿县北部土地荒漠化程度由中度荒漠化转变为极重度荒漠化。但整体荒漠化土地呈现逆转趋势, 新和

县中部已由极重度荒漠化土地转变为重度荒漠化土地。说明研究期间受自然和人为共同作用, 荒漠化程度发生了较大规模的逆转, 即阿克苏地区荒漠化治理力度较大, 荒漠化防治工作取得了显著成效。

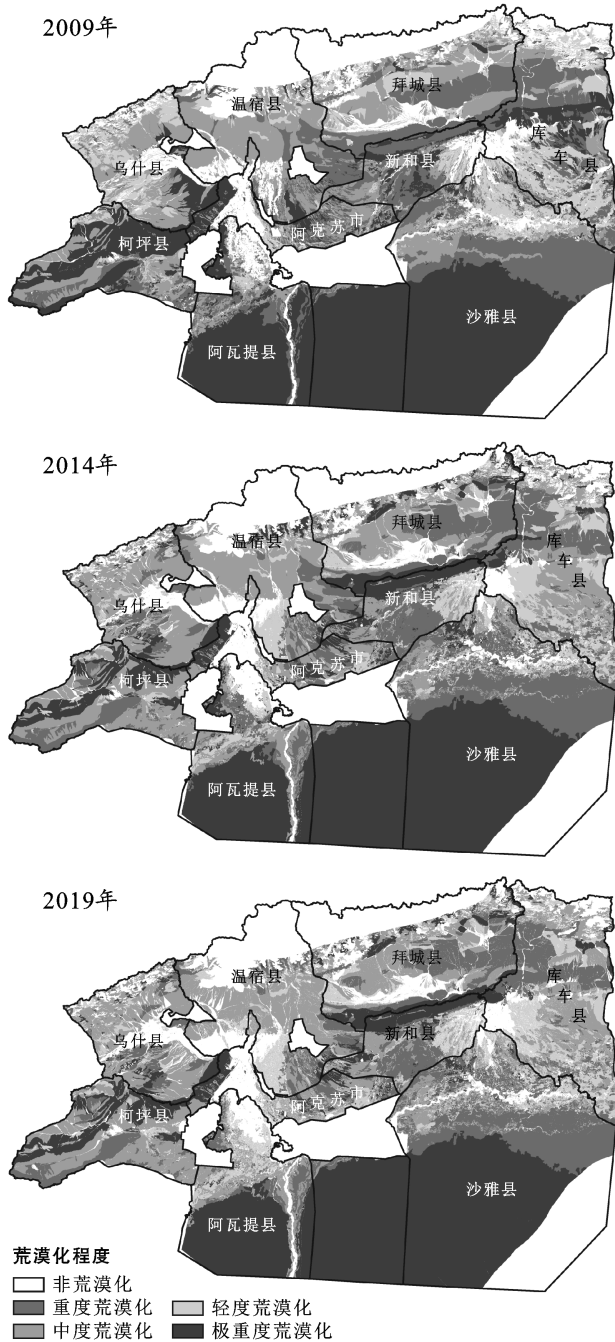


图 1 阿克苏地区 2009—2019 年荒漠化土地分布图

## 4.2 阿克苏地区土地荒漠化驱动因子分析

4.2.1 荒漠化单一驱动因素分析 通过对驱动因子的处理和分类,运用地理探测器模型对荒漠化进行因子探测,计算各因子对荒漠化的影响力大小,结果显

示所选驱动因子对荒漠化具有显著影响(表 5)。不同因子对荒漠化影响程度排序为:土地利用类型(0.785)>平均气温(0.547)>植被覆盖度(0.409)>浮尘日数(0.378)>年总降雨量(0.22)>日照时数(0.188)>平均风速(0.126)>人均 GDP(0.103)>人口密度(0.064)>坡度(0.033)。从各因子对荒漠化的解释力来看,社会经济因素中的土地利用类型是阿克苏地区荒漠化最重要的影响因子;自然因素中对荒漠化驱动力影响作用依次为平均气温、植被覆盖度、浮尘日数、年总降雨量、日照时数、平均风速,由于坡度仅对水蚀荒漠化产生影响,因此影响程度最低。

进一步利用生态探测器探究不同驱动因子在影响荒漠化的空间分布方面,是否具有显著性的差异,哪种因子对荒漠化的空间分布更具有控制性。表 6 为生态探测器结果。给出了每两个影响因素相互作用对荒漠化的显著性差异结果。根据检验结果可得,人均 GDP 与人口密度对荒漠化的影响不存在显著性差异,平均风速仅对日照时数无显著作用;坡度、土地利用类型两因素对年总降雨量、植被盖度、浮尘日数、日照时数具有显著性差异;年总降雨量与日照时数、浮尘日数与植被盖度相互作用无显著作用,因此可以进一步看出,自然因素中植被盖度、年总降雨量与浮尘日数对荒漠化影响力大于其余自然因素相互作用对荒漠化空间分布影响力。

4.2.2 荒漠化驱动因素综合分析 借助地理探测器的交互式探测模块,以评价自变量因子  $X_1$  和  $X_2$  的交互作用 ( $X_1 \cap X_2$ ) 是否会增强或减弱对因变量  $Y$  的解释力,其  $q$  值越大,表明自变量因子交互作用比单一驱动因子对因变量  $Y$  具有更强的解释力。驱动因子的交互作用对荒漠化演化的解释力比单因子更强(表 7),阿克苏地区荒漠化的发育演化受多因子共同影响。通过对解释力较大的驱动因子比较并排序,得到影响阿克苏地区荒漠化发生发展的交互式驱动模式:是以土地利用类型起主导作用与自然因素相结合的模式,分别为:平均气温  $\cap$  土地利用类型(0.911)、土地利用类型  $\cap$  日照时数(0.907)、平均风速  $\cap$  土地利用类型(0.906)。

表 5 阿克苏地区各因子探测  $q$  值统计

影响因素	人均 GDP	人口密度	平均风速	平均气温	坡度	土地利用类型	年总降雨量	浮尘日数	日照时数	植被盖度
$q$ 值	0.103	0.064	0.126	0.547	0.033	0.785	0.224	0.378	0.188	0.409
$p$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$q$ 值排序	8	9	7	2	10	1	5	4	6	3

注: $q$  值表示因子解释力,范围为[0~1],值越大,解释力越强。 $p < 0.05$  表示影响显著。

表 6 阿克苏地区各驱动因子生态监测结果

驱动因子	人均 GDP	人口密度	平均风速	平均气温	坡度	土地利用类型	年总降雨量	浮尘日数	日照时数	植被盖度
人均 GDP										
人口密度	N									
平均风速	N	N								
平均气温	Y	Y	Y							
坡度	N	N	Y	Y						
土地利用类型	Y	Y	Y	Y	Y					
年总降雨量	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
浮尘日数	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y			
日照时数	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Y		
植被盖度	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	

注:如果两个驱动因子对荒漠化的影响存在明显差异(通过 95%显著性水平),则记为“Y”,如果两个影响因素的影响差异不显著,则记为“N”。

表 7 阿克苏地区各因子交互式探测结果

驱动因子	人均 GDP	人口密度	平均风速	平均气温	坡度	土地利用类型	年总降雨量	浮尘日数	日照时数	植被盖度
人均 GDP	0.103									
人口密度	0.476	0.064								
平均风速	0.573	0.505	0.126							
平均气温	0.595	0.671	0.771	0.547						
坡度	0.150	0.132	0.210	0.572	0.033					
土地利用类型	0.853	0.830	0.906	0.911	0.792	0.785				
年总降雨量	0.430	0.394	0.472	0.640	0.256	0.835	0.224			
浮尘日数	0.556	0.498	0.579	0.634	0.393	0.798	0.554	0.378		
日照时数	0.512	0.334	0.516	0.607	0.233	0.907	0.486	0.631	0.188	
植被盖度	0.504	0.469	0.522	0.844	0.443	0.808	0.611	0.694	0.641	0.409

因子探测器与交互作用探测器的结合能更精准地刻画荒漠化影响因子的作用方式和强度,结果表明多因子两两交互作用后对荒漠化影响效果增加。各驱动力因子的交互探测结果(表 8)中表现为增强或非线性增强,表明阿克苏地区荒漠化是多种因子复杂的交互作用共同构成,其中非线性增强结果中社会经济因素占大多数,例如人口密度交互值大多处于 0.3~0.6,人均 GDP 交互值大多处于 0.4~0.5,说明社会经济因素的交互作用是阿克苏地区荒漠化驱动的次

要因素;在双因子增强效果中,土地利用类型与各因素交互值范围为 0.8~0.92,对荒漠化演绎起到了主导作用,其次为平均气温(0.5~0.9)、平均风速(0.5~0.9)。综上所述,土地利用类型对阿克苏地区荒漠化具有极为重要影响,建设用地与耕地不断扩张,导致植被盖度减少,加重了研究区生态压力。若想对阿克苏地区荒漠化发育做到遏制,首先应当做到合理规划土地利用类型,禁止随意扩张耕地,根据当地气候条件提高植被盖度,制定合适荒漠化防治措施。

表 8 阿克苏地区各因子交互作用类型

双因子非线性增强				双因子线性增强			
交互类型	交互值	交互类型	交互值	交互类型	交互值	交互类型	交互值
GDP∩人口	0.48	人口∩浮尘	0.50	GDP∩气温	0.60	气温∩植被	0.84
GDP∩风速	0.57	人口∩日照	0.33	GDP∩地类	0.85	坡度∩地类	0.79
GDP∩坡度	0.15	风速∩气温	0.77	GDP∩植被	0.50	坡度∩降雨	0.26
GDP∩地类	0.85	风速∩坡度	0.21	人口∩地类	0.83	坡度∩浮尘	0.39
GDP∩降雨	0.43	风速∩降雨	0.47	人口∩植被	0.47	坡度∩植被	0.44
GDP∩浮尘	0.56	风速∩浮尘	0.58	风速∩地类	0.91	地类∩降雨	0.84
GDP∩日照	0.51	风速∩日照	0.52	风速∩植被	0.52	地类∩浮尘	0.80
人口∩风速	0.51	坡度∩日照	0.23	气温∩坡度	0.57	地类∩日照	0.91
人口∩气温	0.67	降雨∩日照	0.49	气温∩地类	0.91	地类∩植被	0.81
人口∩坡度	0.13	浮尘∩日照	0.63	气温∩降雨	0.64	降雨∩浮尘	0.55
人口∩降雨	0.39	日照∩植被	0.64	气温∩浮尘	0.63	降雨∩植被	0.61
				气温∩日照	0.61	浮尘∩植被	0.69

### 4.3 阿克苏地区荒漠化变化趋势预测

通过 IDRISI 软件构建阿克苏地区荒漠化 CA-Markov 预测模型,模拟 2019 年阿克苏地区荒漠化演化发展状况并与 2019 年荒漠化实际监测数据进行模型 kappa 验证。验证结果显示 kappa 系数为 0.791 1,

处于 0.6~0.8,模拟精度较高,认为本次构建的模型适用于阿克苏地区荒漠化的预测研究。基于 2009—2019 年荒漠化数据与荒漠化驱动限制因素通过 CA-Markov 预测模型模拟 2024 年研究区荒漠化演化趋势,结果如图 2 和表 9 所示。

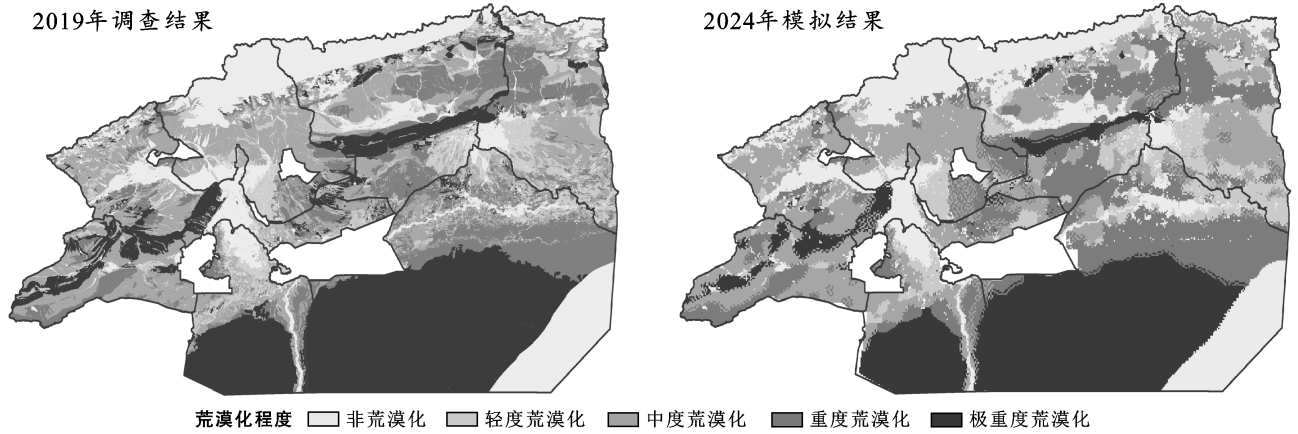


图 2 阿克苏地区 2019 年实际荒漠化监测结果与 2024 荒漠化预测结果

根据面积变化表(表 9)可知,2019—2024 年轻度、中度、重度荒漠化面积增加,非荒漠化与极重度荒漠化面积减少;极重度荒漠化面积减少  $6.05 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,面积占比增加 4.87%,几乎为轻度、中度、重度增加面积之和,结合对比图可知面积变化区域位于新和县却勒塔格山区与柯坪县等地;非荒漠化变化最小,面积减少区域位于乌什县与温宿县北部,减少面积为  $9.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;在面积发生增加的荒漠化土地中,重度荒漠化占比最高,增加面积  $4.30 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,大于轻度与中度增加面积之和,变化最为明显区域为阿瓦提县与塔克拉玛干沙漠接壤地带;轻度与中度荒漠化面积分别增加  $1.60 \times 10^5 \text{ hm}^2$  与  $1.09 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,变化区域大多发生在重度荒漠化周边。由此可以看出 2024 年研究区内各地荒漠化面积与程度均发生变化。荒漠化恶化状况得到遏制,主要表现为极重度荒漠化逆转为重度荒漠化,未来研究区荒漠化演化呈现好转态势。但若驱动因素仍维持当下现状,部分非荒漠化土地则转变成荒漠化土地,因此政府应根据当地社会、自然条件制定适宜政策防止荒漠化扩张。

表 9 阿克苏地区 2019 年荒漠化面积与 2024 年荒漠化预测面积

荒漠化程度	2019 年		2024 年		净变化/ hm <sup>2</sup>
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	
非荒漠化	$2.61 \times 10^6$	21.06	$2.52 \times 10^6$	20.32	$-9.36 \times 10^4$
轻度	$1.06 \times 10^6$	8.55	$1.17 \times 10^6$	9.42	$1.09 \times 10^5$
中度	$2.93 \times 10^6$	23.58	$3.09 \times 10^6$	24.87	$1.60 \times 10^5$
重度	$2.24 \times 10^6$	18.02	$2.66 \times 10^6$	21.47	$4.30 \times 10^5$
极重度	$3.57 \times 10^6$	28.79	$2.97 \times 10^6$	23.92	$-6.05 \times 10^5$

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

本文以荒漠化监测数据为数据源,从荒漠化现状、驱动因素、演化预测 3 个方面对阿克苏地区荒漠化驱动因素及变化趋势进行分析。整体来看,2009—2019 年研究区内荒漠化整体呈改善状况,主要表现为极重度荒漠化面积下降,与奥布力·塔力普<sup>[19]</sup>、潘存军等<sup>[20]</sup>对荒漠化面积及空间分布的研究成果基本一致。探寻不同因子对阿克苏地区荒漠化的影响效果,本文从经济发展、人口、自然 3 个方面选取荒漠化驱动因子探寻不同因子对阿克苏地区荒漠化的影响程度,结果表明单一因子驱动作用分析中,土地利用类型为阿克苏地区荒漠化发育的主要影响因子。近年来阿克苏地区未利用地面积大幅度减少,建设用地、耕地面积不断上升。在时间尺度上,只有草地的分布不均衡程度有所减弱,耕地、园地、林地、城镇村及工矿用地、交通运输用地、未利用地都有所增加,受此影响,研究区生态系统服务总价值呈波动下降态势<sup>[21]</sup>。荒漠化是由多种因子复杂的交互作用共同构成,多因子交互作用对荒漠化驱动效果强于单因子驱动效果。荒漠化发育演化的物质基础与脆弱的生态地质环境背景有着紧密的联系,而不合理的人类活动对荒漠化发育演化过程的影响也起着十分重要的作用,更与国家在不同时期内的社会经济发展状况、主导政策以及生态文明建设的大背景息息相关<sup>[22]</sup>。另一方面,模拟演化结果显示未来阿克苏地区荒漠化程

度将持续改善。多年来,新疆阿克苏地区高度重视生态文明建设,积极践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念,优先生态,强化空间用途管制,逐步实现了从戈壁到绿洲,阿克苏地区坚持打造生态治理示范区战略定位,加强生态环境保护与修复,实施综合治沙工程,使绿洲生态安全得到巩固,形成人与自然和谐发展新格局<sup>[23]</sup>。

## 5.2 结论

(1) 2009—2019年阿克苏地区荒漠化动态变化现象显著,研究期间荒漠化面积呈下降趋势,荒漠化程度处于逆转态势,重度、极重度荒漠化土地面积减少,中度荒漠化土地面积增加,变化区域主要位于不同荒漠化程度相接地区;研究期间研究区荒漠化防治工作取得成效。

(2) 2009—2019年土地利用类型对阿克苏地区荒漠化发育演化解释力最强,阿克苏地区土地荒漠化受社会因素影响较为显著;土地利用类型、平均气温、年总降雨量与其他驱动因子相互作用下对荒漠化的影响存在明显差异。

(3) 阿克苏地区荒漠化的发生发展过程受单一驱动因子的影响较小,而受多种驱动因素交互作用的影响较大;驱动因素间交互作用主要为双因子非线性增强和线性增强两种,其中:土地利用类型与日照时数、平均气温、平均风速的交互作用最为显著。

(4) 2024年研究区土地荒漠化整体得到遏制,荒漠化程度保持逆转态势,主要表现为塔克拉玛干沙漠与绿洲区接壤地带的极重度荒漠化转化为重度荒漠化;但模拟演化结果表明在研究区内驱动因素不发生改变的状况下,会发生非荒漠化转化为荒漠化的现象,当地有关部门应当在未来荒漠化防治中针对研究区荒漠化驱动因素制定措施防止土地荒漠化现象的发生。

## [参 考 文 献]

[1] 韩刚.基于多尺度遥感数据的荒漠化草原土壤含水率监测研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.

[2] 赛亚热·赛都拉,毛东雷,徐佳瑞,等.库姆塔格沙漠西缘风况特征及沙丘运移规律[J].水土保持学报,2021,35(6):62-68.

[3] 王涛,朱震达.我国沙漠化研究的若干问题(I):沙漠化的概念及其内涵[J].中国沙漠,2003,23(3):3-8.

[4] 朱震达.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,1998(2):145-155.

[5] 贾根锁.IPCC《气候变化与土地特别报告》对陆气相互作用的新认知[J].气候变化研究进展,2020,16(1):9-16.

[6] Zhu Yakun, Zhang Jutao, Zhang Yuqing, et al. Responses of vegetation to climatic variations in the desert region of Northern China [J]. Catena, 2019,175:27-36.

[7] UNCCD. The United Nations Convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa [J]. International Legal Materials, 1994,33(5):1328-1382.

[8] 贺伟,布仁仓,熊在平,胡远满.1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.

[9] 吕一河,张立伟,王江磊.生态系统及其服务保护评估:指标与方法[J].应用生态学报,2013,24(5):1237-1243.

[10] 郑伟,朱进忠.新疆草地荒漠化过程及驱动因素分析[J].草业科学,2012,29(9):1340-1351.

[11] 张希彪,王东.陇东黄土高原农牧交错带土地荒漠化驱动因子的定量分析[J].土壤通报,2013,44(2):296-301.

[12] 范泽孟,李赛博.中蒙俄经济走廊荒漠化时空格局变化及其驱动因子[J].生态学报,2020,40(13):4252-4263.

[13] 宋冬梅,吴远龙,张志诚,等.基于元胞自动机民勤绿洲湖区荒漠化演化预测[J].中国沙漠,2009,29(5):802-807.

[14] 于辉.精河县土地荒漠化模型模拟[D].新疆乌鲁木齐:新疆师范大学,2019.

[15] 赵晓.艾比湖流域精河绿洲土地荒漠化动态演变分析与模拟[D].新疆乌鲁木齐:新疆师范大学,2015.

[16] 王旭,刁兆岩,郑志荣,靳三玲,马普,吕世海.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.

[17] 陈晨.基于流域尺度的中国干旱时空演变特征与驱动力分析[D].陕西西安:西安理工大学,2021.

[18] 毛雨景.基于CA模型的小江流域水蚀荒漠化变化趋势研究[D].云南昆明:云南大学,2013.

[19] 奥布力·塔力普,阿里木江·卡斯木.南疆地区经济发展对荒漠化程度的影响研究[J].冰川冻土,2017,39(1):220-228.

[20] 潘存军,杨健,牛树奎.塔里木河流域土地荒漠化现状分析[J].干旱区研究,2007,24(5):637-640.

[21] 安明珠,高敏华.基于信息熵与空间洛伦茨曲线的土地利用结构变化:以阿克苏地区为例[J].水土保持研究,2015,22(6):307-311.

[22] 李曼,李园园,刘焕才.阿克苏河流域中下游生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2020,41(3):33-37.

[23] 蔡运济.塔里木河三源流水库群优化调度[D].陕西西安:西安理工大学,2021.