DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.043 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.043
赵建玲, 代豫杰, 曹萍, 等. 盐池县荒漠化时空动态变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2026,33(6):168-177,188.
Zhao Jianling, Dai Yujie, Cao Ping, et al. Spatiotemporal dynamics of desertification and its influencing factors in Yanchi County[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):168-177,188.

盐池县荒漠化时空动态变化及影响因素

赵建玲[1], 代豫杰[1], 曹 萍[1], 文 琦[1], 何莹莹[2]
(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021)

摘 要:[**目的**]揭示毛乌素沙地南缘盐池县土地荒漠化时空动态变化及影响因素,为有效防治当地荒漠化提供科学支撑。[**方法**]基于2000—2024年Landsat TM/OLI遥感影像,综合运用归一化植被指数(NDVI)、地表反照率(Albedo)与荒漠化差值指数(DDI),结合GIS空间分析等方法,剖析了土地荒漠化的时空演变规律。[**结果**](1)盐池县土地利用格局呈三阶段变化。初期耕地面积缩减伴随沙地面积波动扩张,中期林草地面积显著增长推动沙地面积持续萎缩,后期林草地与耕地面积动态平衡且沙地面积进一步减少。(2)县域荒漠化程度总体呈波动式缓解态势,空间格局由"北重南轻"向"南北皆轻"演变。极重度荒漠化土地面积在2004—2020年减少明显,于2020—2024年出现反弹。虽轻度、非荒漠化向极重度荒漠化的跨越式转变较少,但表明县域仍存在明显的极端退化风险。(3)自然因素中,气温升高、降水年际波动大及高潜在蒸散发奠定荒漠化发生基础,人为因素中生态工程主导荒漠化逆转,畜牧业与工业开发诱发局地反弹。[**结论**]盐池县荒漠化治理成效显著,土地利用格局优化,荒漠化总体缓解但存在反弹风险,自然与人为因素的综合作用主导了这一变化过程。

关键词:荒漠化变化; 时空动态; 荒漠化差值指数; 归一化植被指数; 地表反照率
中图分类号:P931.3; TP79; X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0168-10

Spatiotemporal dynamics of desertification and its influencing factors in Yanchi County

Zhao Jianling[1], Dai Yujie[1], Cao Ping[1], Wen Qi[1], He Yingying[2]
(1.*School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*;
2.*School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to reveal the spatiotemporal dynamics and influencing factors of land desertification in Yanchi County along the southern edge of the Mu Us Sandy Land, and to provide scientific support for the effective prevention and control of regional desertification. [**Methods**] Based on Landsat TM/OLI imagery acquired from 2000 to 2024, this study integrated the normalized difference vegetation index (NDVI), surface albedo (Albedo), and the desertification difference index (DDI) with GIS spatial analysis to analyze the spatiotemporal evolution patterns of land desertification. [**Results**] (1) The land use pattern of Yanchi County showed a three-stage variation. In the initial stage, the cultivated land area shrank with the fluctuating expansion of sandy land area. In the middle stage, the significant growth of forest and grassland area drove the continuous shrinkage of sandy land area. In the later stage, the forest and grassland area and cultivated land area maintained a dynamic balance, and the sandy land area further decreased. (2) The overall desertification degree of the county showed a fluctuating mitigation trend, and its spatial pattern evolved from "severe in the north and mild in the south" to "mild in both the north and south". The area of extremely severe desertified land decreased significantly

收稿日期:2025-12-30 **修回日期:**2026-02-04 **接受日期:**2026-03-29
资助项目:宁夏自然科学基金(2024AAC05026);国家自然科学基金(32401666)
第一作者:赵建玲(2003—),女,宁夏银川人,硕士研究生,研究方向为综合自然地理、水土保持与荒漠化防治等。E-mail:12024131374@stu.nxu.edu.cn
通信作者:代豫杰(1992—),男,宁夏银川人,讲师,博士,研究方向为综合自然地理、水土保持与荒漠化防治等。E-mail:daiyj_sdau@163.com

from 2004 to 2020, but rebounded during 2020—2024. Although leapfrog transformation from mild and non-desertified land to extremely severe desertified land was rare, it indicated that the county still faced significant risks of extreme degradation. (3) Among natural factors, rising temperature, large interannual fluctuations in precipitation, and high potential evapotranspiration provided the foundation for the occurrence of desertification. Among anthropogenic factors, ecological projects dominated the reversal of desertification, while animal husbandry and industrial development induced local rebound of desertification. [**Conclusion**] Yanchi County has achieved remarkable results in desertification governance, with an optimized land use pattern and an overall mitigation of desertification, although the risk of rebound still exists. The combined effects of natural and anthropogenic factors have dominated this process of change.

Keywords: desertification changes; spatiotemporal dynamics; desertification difference index; normalized difference vegetation index; surface albedo

土地荒漠化是全球持续面临的最为严重的环境问题之一,其演变过程既深刻体现了气候系统与人类活动的复杂交互作用,又明确反映了当下突出的不协调人地关系[1]。毛乌素沙地南缘的盐池县因地处我国干旱风沙区与黄土丘陵交错带,土地荒漠化特征明显且生态系统敏感性高,成为探究荒漠化空间动态演变过程的关键区域[2]。尤其在气候变化与人类活动双因素驱动下,盐池县土地荒漠化格局与利用结构呈现显著时段性波动[3]。准确解析较长时间序列下盐池县土地荒漠化时空动态变化及影响因素,对清晰掌握毛乌素沙地及西北干旱区生态安全现状具有重要科学价值[4]。

2000—2020年我国西北地区荒漠化状况虽整体改善,但荒漠化演变仍显示出时空上的显著异质性、不确定性与非持续性[5]。毛乌素沙地近30年来各类沙漠化土地重心在空间上定向迁移,土地荒漠化程度自西向东递减,表明荒漠化是包含扩张、逆转与分异的复杂时空动态过程[6-7]。鉴于植被覆盖度与荒漠化过程的紧密关联,归一化植被指数-地表反照率(NDVI-Albedo)特征空间模型被广泛应用于干旱区土地荒漠化监测领域,该模型不仅可评估荒漠化的整体逆转趋势,还能刻画不同荒漠化等级土地之间的空间转换关系。然而,以往使用该模型的研究忽略了一个要点[8-10],即气候因素明显影响了植被生长状况及时空分布,而这一因素是理解荒漠化动态变化的关键。其中降水对NDVI变化的解释力最强(q=0.502),是导致NDVI与荒漠化波动的重要影响因素[11]。此外,人类活动的影响力(约70%)已显著超过气候因素(约30%),成为驱动毛乌素沙地植被变化与荒漠化空间格局重组的主导力量[5]。区域植被状况变化及荒漠化动态演化可借助荒漠化差值指数(Desertification Difference Index, DDI)有效反映[12],柴达木盆地DDI与降水、湿度显著正相关,与荒漠化面积负相关[8]。同时,DDI与植被状况(以NDVI为核心指标)正相关,植被状况改善会推动DDI升高,反映土地荒漠化程度逐渐减轻[8,12]。

上述研究从遥感指标构建、驱动因素分析等方面为揭示毛乌素沙地荒漠化的演变特征与驱动机制提供了重要参考,但对盐池县“扩张—逆转—反弹”完整演化周期的系统性探究尚不足[8,10]。同时,现有荒漠化评估模型多基于单一风沙或黄土地貌区构建,在风沙区与黄土地貌交错带的适用性仍面临一定挑战[4-5,11]。此外,气候因素、人类活动对盐池县土地荒漠化演变的影响仍待明确[3]。基于此,本研究以2000—2024年为时间窗口,利用Landsat TM/OLI遥感数据及空间分析技术,结合NDVI,Albedo及DDI指数,系统探究盐池县土地荒漠化的时空动态变化及影响因素。科学意义体现在:(1)通过较长时间序列的数据分析,揭示盐池县荒漠化动态变化,补充当地生态系统对气候-人类活动响应的机理认知;(2)构建NDVI-Albedo特征空间模型,量化气候因素与荒漠化程度的耦合关系,揭示当地生态修复的气候关键阈值效应;(3)解析气候因素与三北防护林、工业开发等人类活动的交互作用机制,为有效防治当地荒漠化提供科学支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

盐池县位于毛乌素沙地南缘(图1),是以风沙地貌为主并伴生黄土地貌的典型区域[3]。县区北部和中部主要为风沙区,沙丘绵延;南部为黄土丘陵区,沟壑发育、梁洼相间。县域内土地利用类型主要为耕地、林草地及沙地。林草地以沙生植被草场为主,广泛分布于北部的鄂尔多斯缓坡丘陵地。沙地以固

定、半固定为主，历经30余年治理，实现从“沙进人退”到“绿进沙退”的历史性逆转。盐池县气候季节变化显著[3]，冬季寒冷漫长，夏季炎热短暂，年平均气温8.1 ℃。年均降水量250～350 mm，主要集中在5—9月，且7—9月占全年降雨的六成以上，年蒸发量高达2 200 mm。盛行风为西风和西北风，年平均风速为2.8 m/s，春季气候干旱叠加大风频发，明显影响土地荒漠化演变。

1.2 数据来源

以2000—2024年（每隔4 a一组数据，共7组）LandsatTM/OLI影像为数据源（表1），每组数据基于单景遥感影像。数据获取自地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/）。选取归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）与地表反照率（Albedo）作为关键参量，依托ENVI5.3软件完成Landsat数据的辐射定标、大气校正、几何精校正及感兴趣区裁剪等流程。影像筛选遵循双重科学原则：一是优先选取植被生长旺盛期的夏秋季节（4—8月）影像，以捕捉典型植被光谱特征；二是严格控制影像云覆盖度低于2.0%（表1）。经质量评估，所选影像的云覆盖度与光谱质量均能满足本研究的精度要求，为后续时空动态分析奠定数据基础。研究中使用的盐池县年平均气温、年平均风速和年平均降水量等数据来源于生态气象云服务平台（https://em.cams.cma.cn/），盐池县耕地种植面积、人口数、牲畜数据、工业数据来源于宁夏回族自治区人民政府统计年鉴（https://tj.nx.gov.cn/）。

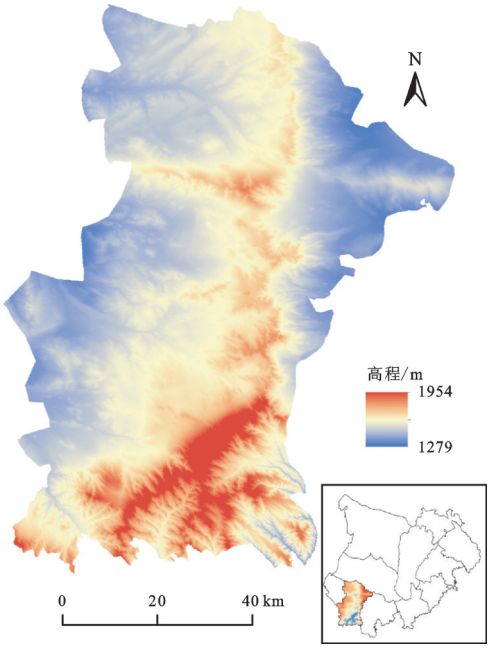


图1 毛乌素沙地及盐池县行政范围

Fig. 1 Mu Us Sandy Land and administrative extent of Yanchi County

表1 遥感数据基本信息

Table 1 Basic information on remote sensing data

	影像编号	传感器类型	行	列	成像时间	云量/%
1	LT51290342000107BJC00	Landsat5 TM	129	034	2000-04-16	0
2	LT51290342004118BJC00	Landsat5 TM	129	034	2004-04-27	0
3	LT51290342008177BJC00	Landsat5 TM	129	034	2008-06-25	1.0
4	LE71290342012228PFS00	Landsat7 ETM	129	034	2012-08-15	0.0
5	LC81290342016119LGN00	Landsat8 OLI	129	034	2016-04-28	0.1
6	LC08_L2 SP_129034_20200813_20200919_02_T1	Landsat8-9 OLI/TIRS	129	034	2020-08-13	1.9
7	LC09_L2 SP_129034_20240512_20240513_02_T1	Landsat8-9 OLI/TIRS	129	034	2024-05-12	0.1

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化 对遥感影像进行辐射定标、大气校正和几何精校正，按国家标准将土地利用类型分为耕地、林草地、水域、沙地、建设用地5类。基于高分辨率影像目视解译采集训练样本，确保样本覆盖所有类型且空间分布均衡。采用支持向量机（Support Vector Machine，SVM）分类，用ROI分离度验证精度，依据误差优化样本，总体精度稳定在90%。结合GIS分析土地利用变化面积、转移矩阵及驱动因素，揭示空间格局与演变机制。

1.3.2 NDVI-Albedo特征空间模型 归一化植被指数（NDVI）和反照率（Albedo）计算公式如下：

$$NDVI=\left[\text{float}(a_1-a_2)/(a_1+a_2)\right] \quad (1)$$

式中：a_1为近红外波段；a_2为红波段。

$$\begin{aligned}\text{Albedo(TM)}=&0.356\times B_{blue}+0.130\times B_{red}+\\&0.373\times B_{nir}+0.085\times B_{swir1}+\\&0.072\times B_{swir2}-0.0018\end{aligned} \quad (2)$$

式中：B_{blue}为蓝波段；B_{red}为红波段；B_{nir}为近红外波段；B_{swir1}为短波红外波段；B_{swir2}为远红外波段。

由于NDVI和Albedo量纲不一致,若要将两者建立线性关系,需先归一化处理,公式如下:

$$NDVI_1=(NDVI-NDVI_{min})/(NDVI_{max}+NDVI_{min}) \quad (3)$$

$$Albedo_1=(Albedo-Albedo_{min})/(Albedo_{max}+Albedo_{min}) \quad (4)$$

式中:$NDVI_1$和$Albedo_1$分别为归一化的NDVI和Albedo;$NDVI_{max}$和$NDVI_{min}$表示NDVI的最大值和最小值;$Albedo_{max}$和$Albedo_{min}$表示Albedo的最大值和最小值[10]。

NDVI-Albedo特征空间分布图一般呈梯形或三角形,不同地物对应的NDVI和Albedo具有很强的线性负相关性[12],一般利用研究区特征空间干边的散点进行线性拟合,即可得到NDVI-Albedo特征方程:

$$Albedo=k\cdot NDVI+d \quad (5)$$

式中:k为Albedo与NDVI拟合方程的斜率;d为参数。随着土地荒漠化程度的加剧,NDVI值逐渐减小,而Albedo逐渐增大。

1.3.3　荒漠化差值指数　荒漠化差值指数(Desertification Difference Index,DDI)是以指数形式量化荒漠化进程的空间分异与时间演变,可捕捉"荒漠化—恢复"的双向动态变化,为早期荒漠化预警提供科学依据,提升荒漠化防治的精准度[12]。在构建NDVI-Albedo特征空间的基础上,可用DDI指示、评价和监测荒漠化程度,公式如下:

$$DDI=-\frac{1}{k}\cdot NDVI-Albedo \quad (6)$$

式中:k为Albedo与NDVI拟合方程的斜率。DDI越大,土地荒漠化程度越轻;反之,土地荒漠化程度越重。

1.3.4　各荒漠化程度转移矩阵　自然裂点法是根据数据中自然的聚集点和断裂点划分数据等级,并非机械地平均划分数值范围或单纯的数值对比,因此能够依据DDI值很好地识别出荒漠化程度变化剧烈的地带,从而客观地划分土地荒漠化程度[13]。经划分后,盐池县荒漠化土地面积转移矩阵呈现荒漠化等级的动态演变关系。

2　结果与分析

2.1　土地利用演变格局与阶段特征

通过比对各时段不同土地利用类型的面积变化方向与幅度,可发现耕地、沙地、林草地3类核心用地间存在显著的此消彼长的关联特征(图2)。第一阶段(2000—2008年),耕地呈现持续性大幅萎缩态势,同期沙地面积演变呈现先缩后扩的波动特征,2000—2004年小幅缩减,而2004—2008年则在中北部、东部出现斑块式扩张;林草地同步呈现先增后减趋势,2000—2004年快速增长,2004—2008年则小幅回落。第二阶段(2008—2016年),林草地以扩张为核心特征,从南部向中北部、东部持续渗透,逐步替代沙地与残留耕地;同期沙地呈现向西北、东部边缘碎片化退缩;耕地由减转增,2008—2012年持续减少,而2012年后于中南部出现点状复苏。第三阶段(2016—2024年),土地利用演变呈现明显的阶段分化特征:2016—2020年耕地减少,林草地稳步增长,沙地小幅反弹;2020—2024年耕地在中北部、东部呈集中式扩张,林草地在北部小幅回调,沙地进入萎缩阶段。

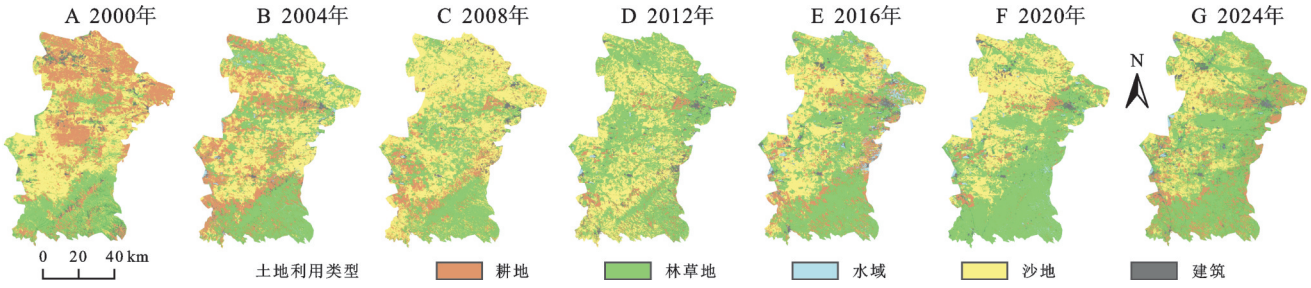


图2　2000—2024年盐池县各土地利用类型变化

Fig. 2　Changes in land use types in Yanchi County (2000—2024)

2.2　NDVI-Albedo特征空间

在研究区遥感影像中采用空间随机采样法布设2 000个样点,经数据质量筛检剔除异常值后,基于分层抽样原则提取有效样本,构建2000—2024年盐池县NDVI-Albedo特征空间散点图并拟合约束方程(图3A-G)。各时期干边拟合方程均为线性函数,比例系数均为负,决定系数R^2均超过0.6。表明盐池县多期遥感数据中NDVI与Albedo参量间存在显著的负制约关系,该结果为后续荒漠化过程(荒漠化差值指数DDI)的定量分析提供基础(图3)。

2.3　荒漠化时空变化

基于NDVI与Albedo的耦合关系,DDI揭示了盐池县荒漠化"扩张—逆转—反弹"的动态特征(图3,图4)。利用自然裂点法[13]将盐池县土地荒漠化程度划分为非荒漠化、轻度、中度、重度和极重度荒漠化5个等级,以反映荒漠化程度变化(表2)。

盐池县土地荒漠化程度整体呈先加重后减轻再加重的复杂变化趋势，各等级荒漠化土地面积变化幅度较大；空间分布上，极重度、重度、中度荒漠化土地呈全域分散格局，轻度与非荒漠化土地则集中于县域南北两部，其中极重度与重度荒漠化土地面积还呈现出协同波动的特征（图 4）。

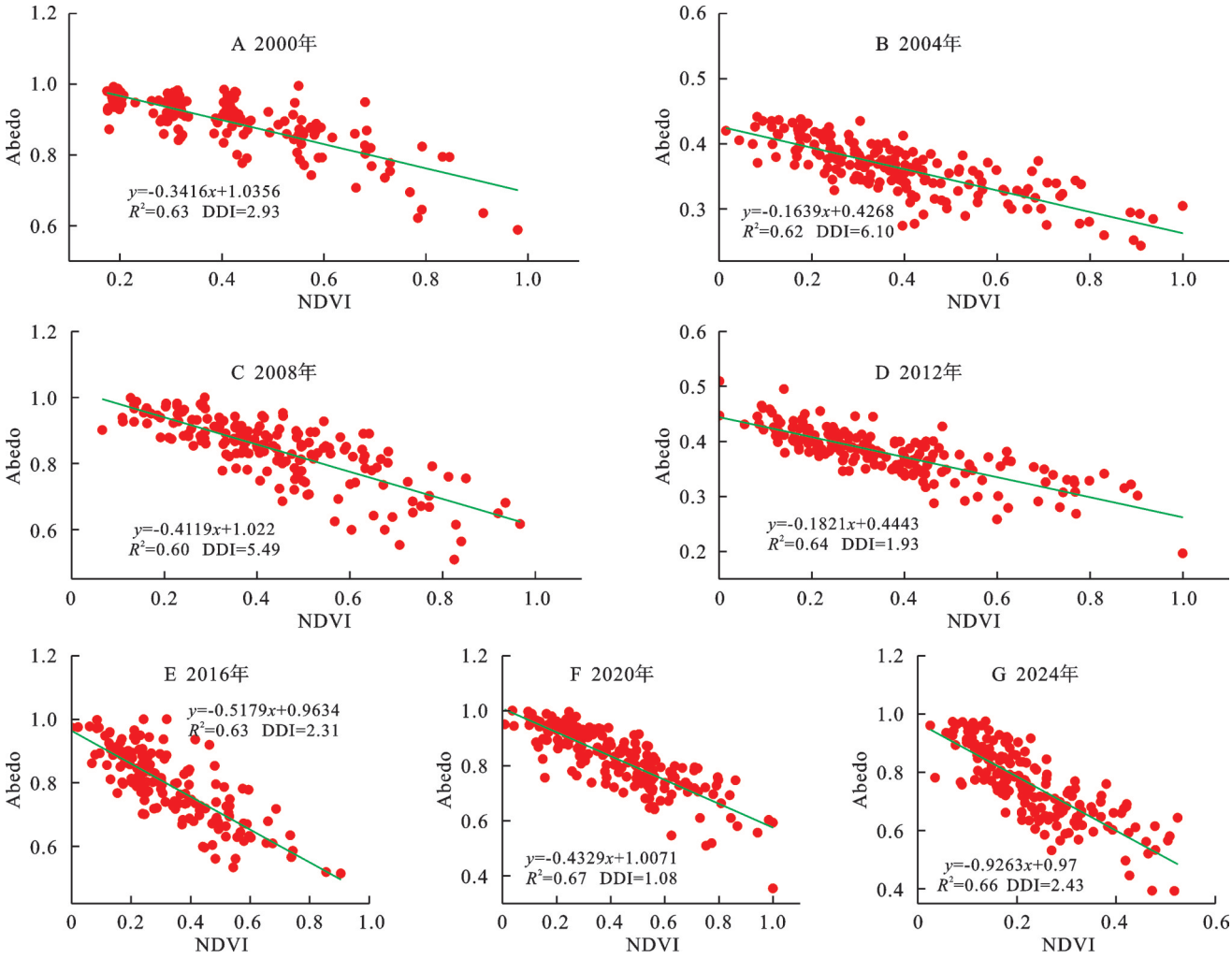


图 3 2000—2024 盐池县 NDVI-Albedo 特征方程

Fig. 3 NDVI-Albedo characteristic equations in Yanchi County (2000—2024)

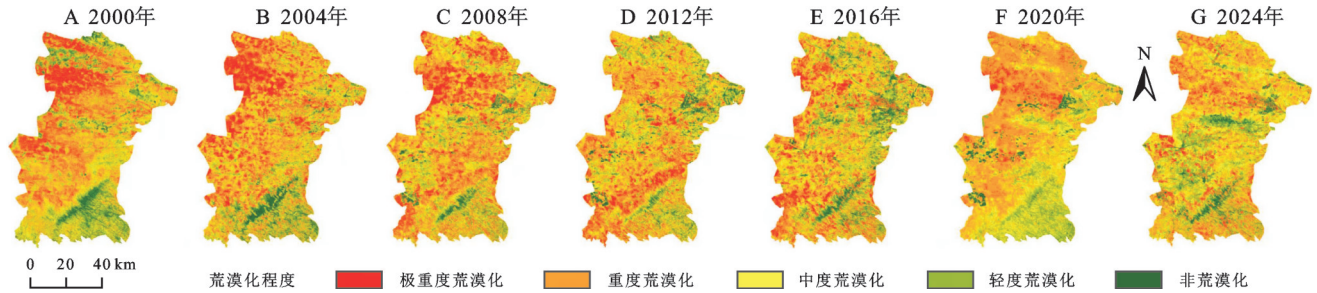


图 4 2000—2024 年盐池县荒漠化程度变化

Fig. 4 Changes in desertification degree in Yanchi County (2000—2024)

2000—2004 年荒漠化程度呈现“北重南轻”的格局，北部极重度、重度荒漠化呈增加态势，印证该阶段区域土地退化加剧的整体趋势，南部及东部区域仅零星分布轻度荒漠化与非荒漠化土地（图 4A）；2004—2008 年极重度荒漠化面积减少，但轻、中、重度荒漠化面积均有所增加，表明区域荒漠化治理初步显现局部成效，但整体退化态势尚未得到根本扭转，中等及以下等级荒漠化扩张风险凸显（图 4B）；2008—2012 年南部非荒漠化区域向中部扩展，北部极重度荒漠化显著减少，荒漠化程度整体向轻度和非荒漠化转化，空间上过渡为“南北皆轻”格局，反映生态治理措施开始发挥系统性成效（图 4C）；2012—2016 年极重度和重度荒漠化占比进一步降低，轻度与非荒漠化范围持续拓展（图 4D）；2016—2024 年非

荒漠化和轻度荒漠化区域由东部和南部逐步向北、西部蔓延,但重度荒漠化面积出现明显反弹,且重度、中度荒漠化在西北部形成集中分布区。2020—2024 年重度荒漠化面积大幅回落,但极重度荒漠化在南部出现反弹,同时中部非荒漠化区域仍保持增益态势,呈现“局部反弹、整体向好”的复杂特征(图 4E—G)。

表 2　荒漠化程度与 DDI 值的关系

Table 2　Relationship between desertification degrees and DDI values

年份	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
2000	≥1.448	0.734～1.448	0.195～0.734	−0.300～0.195	≤−0.300
2004	≥4.305	2.795～4.305	1.697～2.795	0.708～1.697	≤−0.708
2008	≥3.348	1.956～3.348	0.987～1.956	0.093～0.987	≤−0.093
2012	≥0.690	0.204～0.690	−0.166～0.204	−0.525～−0.166	≤−0.525
2016	≥1.090	0.531～1.090	0.075～0.531	−0.418～0.075	≤−0.418
2020	≥0.033	−0.313～0.033	−0.547～−0.313	−0.910～−0.547	≤−0.910
2024	≥1.103	0.527～1.103	0.072～0.527	−0.624～0.072	≤−0.624

2.4　荒漠化变化趋势分析

基于 2000 年盐池县土地荒漠化程度,采用栅格数据时序差值法分析了不同时期县域土地荒漠化动态变化(图 5)。2000—2004 年县土地荒漠化空间格局呈明显破碎化特征(图 5A),县北部为土地荒漠化程度集中恶化区,而稳定区在整体零星散布的基础上呈南部长条状及北部块状分布,逆转区则以小斑块形式在全县零散分布。随后 4 年间县域土地荒漠化动态变化的空间分异格局演变为“西退南扩”模式(图 5B),恶化区向中南部拓展并形成连片分布区,西部因生态修复使逆转区面积明显增加,空间分布呈现由西向东的梯度变化特征。随后 4 年间(2008—2012)生态修复成效在空间上表现为北部与东部逆转区呈连片扩张态势,恶化区则收缩至南部区域(图 5C)。4 年后,县土地荒漠化逆转趋势进一步强化,中北部地区形成大面积连续逆转区,恶化区集中在南部地区(图 5D)。而后 4 年间(2016—2020),该县土地荒漠化空间格局出现结构性调整,在逆转区向北推进的同时,中、北部局部区域出现恶化区面积反弹现象,而南部恶化区面积较上一时期呈现缩减趋势(图 5E)。最后 4 年间,区域生态系统呈现明显修复态势,逆转区占据县域主体空间,恶化区主要集中于东南部区域(图 5F)。

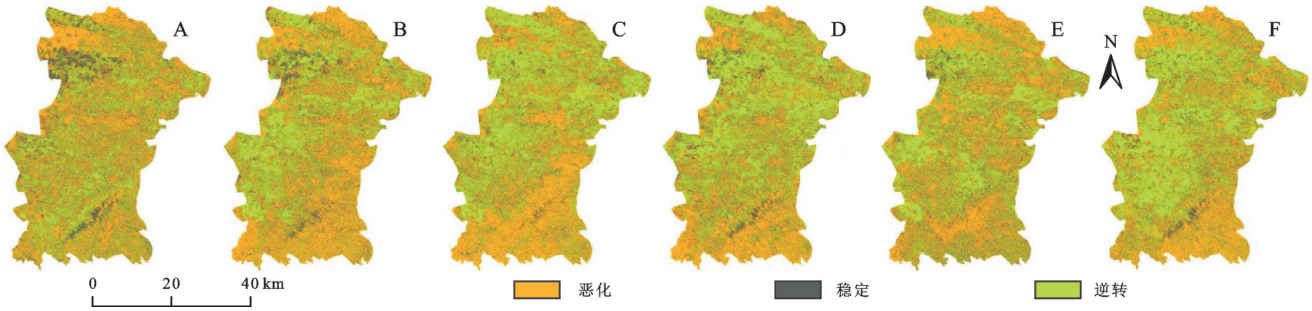


图 5　2000—2024 年盐池县土地荒漠化逆转趋势变化图

Fig. 5　Trends of desertification reversal in Yanchi County (2000—2024)

对应于图 5,极重度荒漠化斑块面积在 2000—2024 年呈极端净退出特征,转出总量达 1 226.86 km^2(表 3),是维持量(231.88 km^2)的 5.3 倍,大规模的转出推动极重度荒漠化区域整体呈缩减态势。这一特征改变了极重度荒漠化高维持率、低净降级的固有退化惯性,印证了区域生态工程的实施已取得显著成效,有效遏制了极重度荒漠化的扩张态势。其中,转入类型中存在显著的极端跨越转化特征。轻度荒漠化向极重度荒漠化的转入面积为 70.87 km^2,非荒漠化向极重度荒漠化的转入面积为 20.39 km^2(表 3)。虽合计占极重度总转入面积相对较低,但直接跳过中间荒漠化等级完成极端退化,体现局部区域生态系统的破坏极具突发性与不可逆性,是区域荒漠化防治中需重点警惕和管控的风险点。

表 3　2000—2024 年盐池县各荒漠化程度转移矩阵

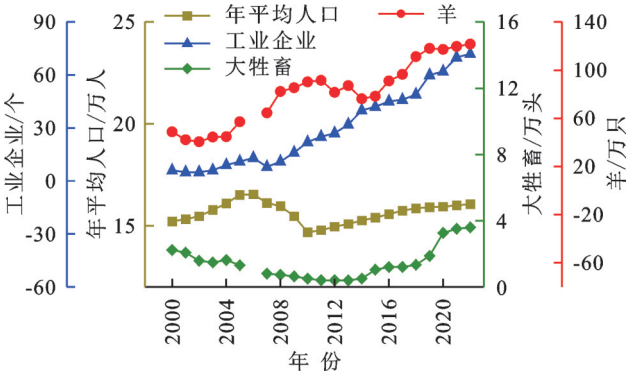
Table 3　Desertification degree transition matrix of Yanchi County (2000—2024)　km^2

荒漠化程度		2000 年				
		极重度荒漠化	重度荒漠化	中度荒漠化	轻度荒漠化	非荒漠化
2024 年	极重度荒漠化	231.88	567.73	416.61	197.76	47.76
	重度荒漠化	180.81	518.80	499.23	271.36	67.30
	中度荒漠化	166.57	601.08	646.29	377.49	103.89
	轻度荒漠化	70.87	344.39	373.40	251.94	104.56
	非荒漠化	20.39	114.93	132.83	121.33	120.08

3 讨 论

3.1 人为因素在盐池县土地荒漠化演变中的作用

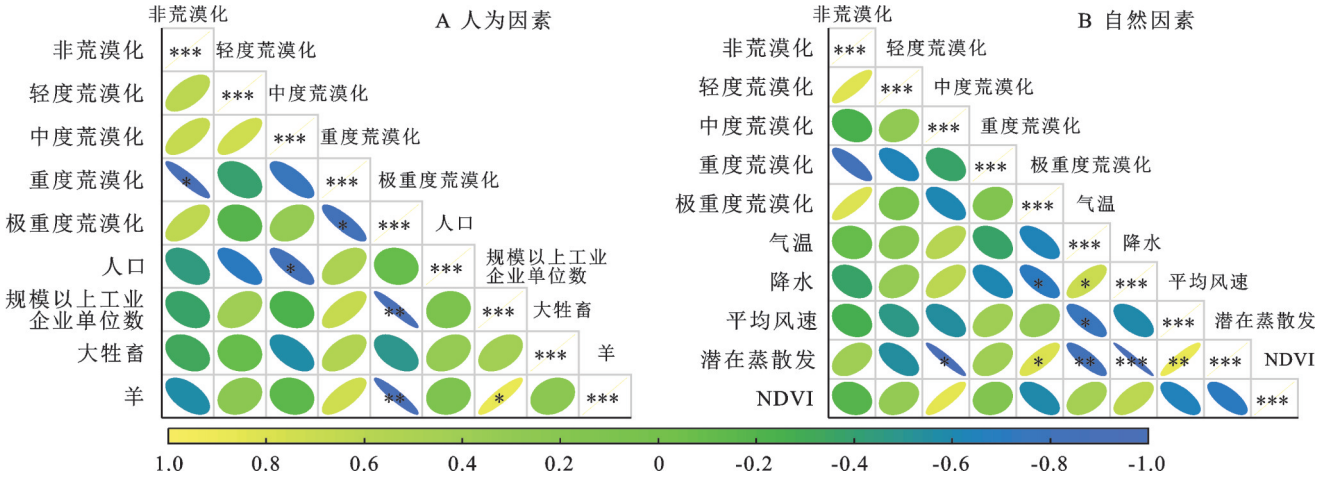
盐池县2000—2024年荒漠化土地面积变化受人为与自然因素协同调控[3,14]。人为活动对盐池县荒漠化的影响具有明显的“双向性”,既推动了整体逆转,也诱发了局部反弹[14]。2000—2012年是盐池县荒漠化治理的关键阶段,核心驱动力是生态工程的实施。这一时期,林草地大面积增加,从南部向中北部、东部持续扩张(图2)。地表植被覆盖度的提升,通过植被固沙、减弱风蚀等作用,有效抑制了沙地扩张;2016年后,局部区域出现荒漠化反弹,主要源于工业开发和畜牧业规模调整的负面影响,这与沙地面积小幅增加、重度荒漠化集中分布的结果一致(图2,图4E-G)。规模以上工业企业数从2000年的6家激增至2022年的72家(图6),工业用地扩张直接占用草地、林地等区域[14-15],还导致地下水水位下降,植被因缺水生长状况不佳,最终提升了土地荒漠化风险[15]。定量结果进一步表明,极重度荒漠化与规模以上工业企业单位数呈强线性负相关(图8A),即工业扩张通过资源开发、生态扰动加剧了极重度荒漠化的发展[16];另外,畜牧业向高繁殖、高耗草、短周期的经济动物倾斜,羊群数量随之攀升[16],羊啃食深、践踏重,远甚于牛等大牲畜。在干旱半干旱区,过度放牧降低了植被盖度,从而加速沙化过程[17]。羊存栏量与极重度、重度荒漠化等级呈显著协同关系(图7A、图8B),进一步印证了放牧压力是诱发荒漠化反弹的关键因素。与之不同的是,极重度荒漠化等级与人口呈弱权衡关系,在一定程度上反映出人类活动对极端荒漠区的干扰阈值效应[18](图7A),中度荒漠化面积与人口呈显著权衡关系($p\leqslant0.05$,图7A,图8C),表明人类活动并非单纯的生态压力源,人口集聚反而可能通过集聚效应形成生态治理合力,为荒漠化治理提供人力、技术与组织基础[19]。后续研究仍需进一步系统量化人为因素和气候因素的边际贡献,更为稳健地刻画荒漠化演变的复杂轨迹。



注:2006年大牲畜和羊的数据缺失

图6 2000—2022年盐池县各人为因素指标变化情况

Fig. 6 Changes in anthropogenic factors in Yanchi County (2000—2022)



注:*表示$p\leqslant0.05$;**表示$p\leqslant0.01$;***表示$p\leqslant0.001$。

图7 荒漠化程度与人为和自然因素的协同权衡关系

Fig. 7 Synergy and trade-off relationships between desertification degree and natural and anthropogenic factors

3.2 自然因素对盐池县土地荒漠化演变的影响

自然因素作为盐池县土地荒漠化的基础驱动力,通过土壤、气候与植被的协同作用决定其程度与空间格局。县域土壤以灰钙土及风沙土为主,土壤颗粒间孔隙较大,水分容易渗漏、蒸发[3],且在当地大风频发的气候背景下,更易于发生风蚀[20-21],为荒漠化的发生提供了物质基础并加速其发展。2000—2024年气象数据显示(图9),该县年平均气温以0.04 ℃/a上升,潜在年均蒸发量达1 120 mm,年降水量均值虽为324.30 mm,但年际变异系数高达20.0%,2005年极端干旱年份降水量仅180.27 mm,较均值下降44.4%。凸显气候波动剧烈[20],这使得2008年NDVI-Albedo特征空间干边斜率较2000年增加20.6%(图3A,C),导致该时段内干旱对土地荒漠化的胁迫程度加剧。

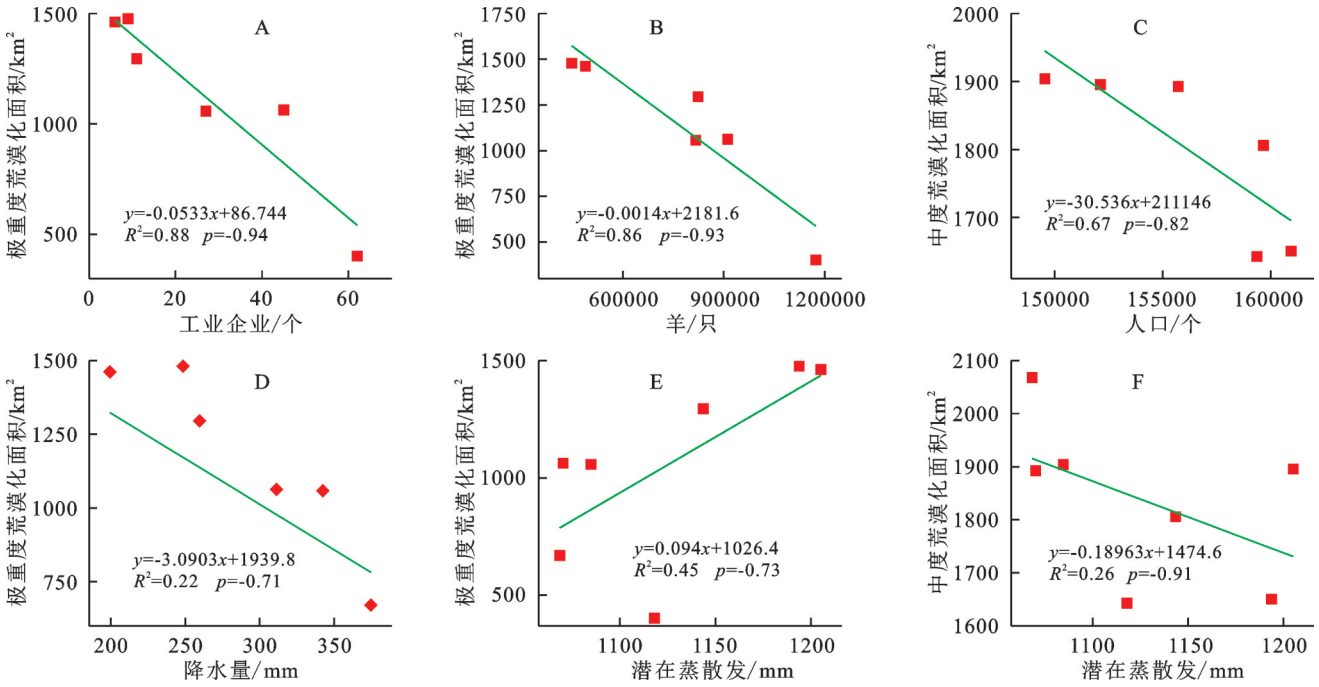


图 8　荒漠化程度与自然和人为因素的拟合关系

Fig. 8　Fitting relationship of desertification degree with natural and anthropogenic factors

进一步结合植被覆盖度变化来看,NDVI值的变化反映了植被覆盖度的动态变化及其对荒漠化的响应(图 2,图 4)。2000—2024 年盐池县 NDVI 值整体呈现波动上升趋势。2000 年 NDVI 值为 0.2,2004 年增加到 0.3,沙地面积降幅达 7.7%(图 2)。自 2008 年之后,NDVI值几乎都超过 0.3 且进一步提高,对应荒漠化程度明显减轻(图 4),沙地面积进一步减少(图 2)。表明植被覆盖度突破这一关键阈值后,生态系统自我修复能力显著增强[22],2024 年沙地面积较 2000 年降幅约 35.4%,进一步验证了本文 NDVI 阈值的有效性[22],植被覆盖度突破阈值后生态系统自我修复能力显著提升[23]。

自然因素与荒漠化程度的量化关系表明,不同土地荒漠化程度与气温、降水、平均风速、潜在蒸散发、NDVI的协同和权衡关系呈现显著方向性与尺度差异(图 7B,图 8D,E,F)。轻度及中度土地荒漠化与气温、降水、NDVI 呈协同关系,重度及极重度土地荒漠化主要与平均风速、潜在蒸散发呈协同关系,且潜在蒸散发的协同效应显著($p \leqslant 0.05$)。气温升高、蒸散发增强及风速增大可通过加剧地表蒸发、土壤水分流失及风力侵蚀,与土地荒漠化扩展形成同增同减的正向驱动效应[24]。轻度及中度土地荒漠化与平均风速、潜在蒸散发呈权衡关系,重度及极重度土地荒漠化主要与气温、降水、NDVI 呈权衡关系,且降水的权衡效应显著($p \leqslant 0.05$)。揭示降水增加可显著提升土壤含水量从而增加植被覆盖度并最终增强植被固沙功能,与土地荒漠化形成此消彼长的反向调控关系[25]。为进一步揭示气候—植被耦合在荒漠化分异过程中的驱动机制,基于图 7 分别分析了中度、极重度荒漠化土地面积与显著影响因素的拟合关系(图 8)。极重度荒漠化土地面积与降水量呈线性负相关(图 8D),与潜在蒸散发的线性正相关更为密切(图 8E),揭示极端蒸散发可通过线性关系放大能量—水分压力,将局部重度荒漠化斑块推向极重度荒漠化[26]。相比之下,中度荒漠化土地面积与潜在蒸散发呈负相关(图 8F),表明当潜在蒸散发突破临界值后,水分极端匮乏迫使植被退化[27],中度荒漠化斑块因向极重度荒漠化转化,反而呈现出随蒸散发升高而收缩的趋势[28]。

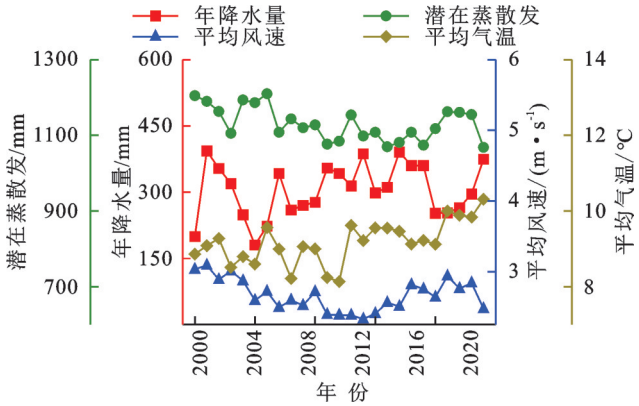


图 9　2000—2024 年盐池县各自然因素变化情况

Fig. 9　Changes in natural factors in Yanchi County (2000—2024)

3.3　不足与展望

本文通过对盐池县荒漠化时空动态变化及其驱动机制的系统分析,较为清晰地揭示了风沙区向黄土

地貌过渡带的土地荒漠化程度是在自然和人为因素共同作用下的复杂演变过程,但后续研究中方法仍可进一步完善。首先,仍需突出气候因素及NDVI的交互影响对盐池县不同荒漠化程度土地面积的权衡或协同作用[29](图7,图8)。NDVI提升、地表蒸散下降、降水再分配具有互馈效应[29],而充分考虑交互作用及多要素拟合,可更全面准确地揭示土地荒漠化的驱动机制并提升研究结果可靠性[4]。其次,仍需强化考虑现有转移矩阵运算中的生态过程时间延迟问题,如2016—2020年重度荒漠化反弹中,该县南部区域土地荒漠化趋势曾在2012年经历恶化(图5,表3),这种"历史干扰—当前响应"的时间滞后难题,尚需恰当引入状态空间模型量化生态记忆效应以克服[30]。

综上,未来研究可从三方面提升:(1)引入地理探测器、结构方程模型等方法,突破线性与独立性假设,耦合CLM-DGVM模型,模拟气候变化(升温0.5 ℃/降水±10%)与人类活动(放牧强度±20%)对荒漠化的交互影响,通过路径系数量化各因素贡献率;(2)聚焦2020年后荒漠化反弹区,通过定点观测揭示工业开发扰动与极端气候叠加的效应机制;(3)基于景观生态学理论研究土地利用阈值,准确识别"林草-沙地"转换的临界NDVI值,更好实现科学研究—政策应用的高效衔接。

4 结 论

(1)盐池县土地利用结构呈现显著阶段性调整。2000—2024年林草地面积持续扩张至峰值后趋于稳定,是生态工程成效的核心表征;耕地面积经历"锐减—恢复"波动的核心驱动力为生态退耕与农业政策调控;沙地面积先增后减,与耕地、林地面积动态适配,印证了土地利用优化对荒漠化防治的支撑作用。

(2)盐池县荒漠化时空演变呈现复杂动态特征。2000—2024荒漠化空间分布从"北重南轻"向"南北皆轻"转变,2024年非荒漠化区域在县中部扩张,极重度荒漠化虽总体缩减,但在县南缘再度反弹;DDI指数变化表明,荒漠化程度与NDVI-Albedo特征空间干边斜率呈显著相关性,2008年干边斜率较2000年增加20.6%,印证干旱化加剧土地荒漠化趋势。

(3)自然-人为双重驱动机制显著。2000—2024年区域气温呈上升态势,降水集中夏秋且年际变率大,潜在蒸散发量长期居高,叠加效应加速地表失水与土壤干旱,为荒漠化提供持续驱动。生态工程使2000—2012年林草地扩张,沙地年缩减2.3%,但2016—2020年工业开发等因素导致荒漠化反弹。

(4)盐池县荒漠化等级转化存在阈值效应。NDVI存在关键生态阈值,低于该值时极重度荒漠化占比高;非荒漠化区域向荒漠化转化量为维持量的3.2倍,中度荒漠化"高维持—高退化"特征凸显生态修复临界状态,需关注轻度荒漠化易退化性与非荒漠化区域退化风险。

参考文献(References):

[1] Wei Y B, Tao H, Kundzewicz Z W, et al. Natural and anthropogenic contributions to desertification in Central Asia[J]. Catena, 2025,257:109154.

[2] 杜庆,李美君,边振,等.不同土地利用方式下草地植被动态变化特征:以宁夏盐池县为例[J].干旱区研究,2016,33(3):569-576.
Du Q, Li M J, Bian Z, et al. Dynamic change of vegetation under different land use patterns: a case study in Yanchi County, Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3):569-576.

[3] 袁洪艺,杜灵通,乔成龙,等.人工灌丛总初级生产力和蒸散对气候变化的响应模拟:以宁夏盐池县荒漠草原区为例[J].生态学报,2024,44(8):3515-3524.
Yuan H Y, Du L T, Qiao C L, et al. Simulation of GPP and ET response to climate change for the planted shrub ecosystem in desert steppe area of Yanchi county, Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(8):3515-3524.

[4] 李长龙,王燕,高志海,等.2000—2020年中国荒漠化潜在发生范围区林草覆被时空变化特征[J].地理学报,2022,77(11):2803-2816.
Li C L, Wang Y, Gao Z H, et al. Spatial and temporal characteristics of forest and grass cover in the potential range of desertification in China from 2000 to 2020[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(11):2803-2816.

[5] Chao Y, Zhu Y H, Wang X H, et al. Dynamic evolution of the NDVI and driving factors in the Mu Us Sandy Land of China from 2002 to 2021[J]. Journal of Arid Land, 2025,17(5):605-623.

[6] 韩雪莹,杨光,秦富仓,等.毛乌素沙地近30年沙漠化土地时空动态演变格局[J].水土保持研究,2019,26(5):144-150,157.
Han X Y, Yang G, Qin F C, et al. Spatial and temporal dynamic patterns of sandy land in Mu Us in the last 30 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(5):144-150,157.

[7] 修晓敏,吴波,费兵强,等.基于Meta分析的毛乌素沙地荒漠化动态研究[J].干旱区地理,2024,47(12):2051-2063.
Xiu X M, Wu B, Fei B Q, et al. A meta-analysis of desertification dynamics in the Mu Us sandy land[J]. Arid Land Geography, 2024,47(12):2051-2063.

[8] 孙树娇,曹晓云,肖建设,等.基于NDVI-Albedo特征空间的柴达木盆地荒漠化监测研究[J].干旱气象,2023,41(4):560-569.
Sun S J, Cao X Y, Xiao J S, et al. Desertification moni-

toring in the Qaidam Basin based on NDVI-Albedo feature space[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4):560-569.

[9] 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 X, Diao Z Y, Zheng Z R, 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.

[10] 李状,刘宏伟,白耀楠,等.基于Albedo-NDVI特征空间的张家口康保县荒漠化时空动态监测[J].地球学报,2025,46(2):409-418.
Li Z, Liu H W, Bai Y N, et al. Spatiotemporal dynamic monitoring of desertification in Kangbao County of Zhangjiakou City based on albedo-NDVI feature space [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2025,46(2):409-418.

[11] Ke H C, Liang L, Tian M H, et al. Assessing vegetation dynamics and influencing factors in Northwest China's Arid Regions: a spatiotemporal analysis using NDVI (2000—2020)[J]. Acta Geophysica, 2025, 73(4):3405-3424.

[12] Zhou Z L, Zhang C L, Zou X Y, et al. Estimating lateral cover of vegetation and gravel using NDVI and albedo[J]. Catena, 2024,239:107899.

[13] 顾亚,张亚,段海川,等.基于OSAVI-Albedo特征空间的香格里拉市土地荒漠化时空动态监测[J].生态学报,2025,45(13):6524-6543.
Gu Y, Zhang Y, Duan H C, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring of land desertification in Shangri-La city based on OSAVI-Albedo feature space[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(13):6524-6543.

[14] 程静,王鹏,陈红翔,等.半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测:以宁夏盐池县为例[J].干旱区地理,2022,45(5):1637-1648.
Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: a case of Yanchi County in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022,45(5):1637-1648.

[15] 邓铭江.中国西北"水三线"空间格局与水资源配置方略[J].地理学报,2018,73(7):1189-1203.
Deng M J. "Three Water Lines" strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(7):1189-1203.

[16] 刘小峰,彭扬帆,徐晓军.选优扶强:老少边区特色农业"一县一业"格局何以形成:盐池滩羊的纵向案例研究[J].管理世界,2023,39(7):46-63.
Liu X F, Peng Y F, Xu X J. Selecting the best, supporting the strong: How to form the characteristic agricultural pattern of the "one county, one industry" in underdeveloped areas: a longitudinal case study of the Yanchi Tan sheep project[J]. Journal of Management World, 2023,39(7):46-63.

[17] Dai Y J, Guo J Y, Li Y Q, et al. Soil physical and chemical properties affected by long-term grazing on the desert steppe of Inner Mongolia, China[J]. Catena, 2022,211:105996.

[18] 邓铭江,龙爱华,李江,等.西北内陆河流域"自然—社会—贸易"三元水循环模式解析[J].地理学报,2020(7):1333-1345.
Deng M J, Long A H, Li J, et al. Theoretical analysis of "natural-social-trading" ternary water cycle mode in the inland river basin of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020(7):1333-1345.

[19] Feng L L, Jia Z Q, Li Q X. The dynamic monitoring of aeolian desertification land distribution and its response to climate change in northern China[J]. Scientific Reports, 2016,6:39563.

[20] 展秀丽,董智今,韩磊.宁夏盐池县防沙治沙区土壤粒度、SOC及TN的空间异质性[J].东北林业大学学报,2021,49(1):101-105,124.
Zhan X L, Dong Z J, Han L. Spatial heterogeneity of grain size, SOC and TN in areas of desertification combating of Yanchi in Ningxia[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021,49(1):101-105,124.

[21] Li J H, Wang Y, Shi G, et al. Ecological security pattern construction using landscape ecological quality: a case study of Yanchi County, northern China[J]. Journal of Arid Land, 2025,17(1):19-42.

[22] Dai X J. Temporal and spatial changes of NDVI and soil erosion in Ningxia grassland before and after grazing ban [J]. Scientific and Social Research, 2025,7(1):71-76.

[23] Osman N, Dorairaj D, Halim A, et al. Dynamics of plant ecology and soil conservation: Implications for cut-slope protection[J]. Acta Oecologica, 2021,111:103744.

[24] 杨晓楠,李晶,秦克玉,等.关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系[J].地理学报,2015,70(11):1762-1773.
Yang X N, Li J, Qin K Y, et al. Trade-offs between ecosystem services in Guanzhong-Tianshui economic region[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1762-1773.

[25] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].地理研究,2021,40(3):821-838.
Fang L L, Xu D H, Wang L C, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2021,40(3):821-838.

(下转第 188 页)