雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征分析与归因识别

吕振豫，王鹏翔，董义阳，梁犁丽，翟 然，杨 恒，刘 琨
（中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院，北京 101199）

摘　要：［目的］对雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征与归因进行分析和识别，为该区生态修复与保护、促进生态系统良性循环提供科学支撑。［方法］本研究采用改进的基于植被—地表反射率—土壤湿度（NDVI-Albedo-Wet）三维空间的荒漠化差值指数方法，开展雅鲁藏布江中上游流域 1990—2020 年土地沙化时空演变的监测分析，在此基础上，分别采用主成分分析方法和地理探测器方法，从时序变化和空间分异两个方面进行土地沙化的归因识别。［结果］雅鲁藏布江中上游流域沙化土地总面积由 1990 年的 3.48×10^4 km^2减少至 2020 年的 1.67×10^4 km^2，但部分区域沙化程度增强，集中在研究区西部的萨嘎县、吉隆县片区和东南部的康马县、琼结县等；空间分布上，研究区沙化土地呈现出“自西向东”沿干流河道带状分布的特点，且集中在微坡、缓坡地形以及草地和未利用地上。1990—2020 年研究区土地沙化逆转主要受人类活动因子的影响，主成分因子贡献率约 59.1%；而沙化土地的空间分异则从 1990 年的与高程和风速等自然地理要素相依性为主，转变为 2020 年的受自然及社会经济因素等多驱动因子的协同，且各驱动因子对沙化土地空间分布的影响力呈双因子增强和非线性增强。［结论］雅鲁藏布江中上游流域土地沙化总体缓解的同时局部仍有加剧，建议进一步加强雅鲁藏布江源区生态修复与保护、加强河道左右岸 10 km 范围的沙源治理和植被培育。

关键词：雅鲁藏布江；土地沙化；遥感解译；驱动因子

文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0105-09　　**中图分类号：**P931.3，X171.1

文献参数：吕振豫，王鹏翔，董义阳，等.雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征分析与归因识别［J］.水土保持通报，2025，45(1)：105-113. Lü Zhenyu，Wang Pengxiang，Dong Yiyang，et al. Spatiotemporal evolution analysis and attribute identification of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River［J］. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：105-113. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.012；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.012.

Spatiotemporal evolution analysis and attribute identification of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River

Lü Zhenyu，Wang Pengxiang，Dong Yiyang，Liang Lili，Zhai Ran，Yang Heng，Liu Kun
（*Science and Technology Research Institute of China Three Gorges Corporation*，*Beijing* 101199，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal evolution characteristics and attributes of land desertification in the middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River were analyzed and identified to provide scientific support for ecological restoration and protection and promote a virtuous cycle of the ecosystem in this region.［Methods］An improved desertification difference index method based on the three-dimensional space of vegetation，surface reflectance，and soil moisture（NDVI-Albedo-Wet）were employed to analyze the spatiotemporal evolution of land desertification in the research area during 1990—2020. On this basis，

收稿日期：2024-07-05　　**修回日期：**2024-10-21　　**采用日期：**2024-10-22
资助项目：国家重点研发计划青年科学家项目“雅江下游水电开发的水生态环境影响评估与调控”（2022YFC3205100）；中国长江电力股份有限公司科研项目（NBZZ202300162）
第一作者：吕振豫（1993—），男（汉族），河南省新乡市人，博士，工程师，主要从事水土保持、生态保护等方面的研究。Email：lv_zhenyu@ctg.com.cn。
通信作者：王鹏翔（1992—），男（汉族），河南省安阳市人，博士，工程师，主要从事水文模拟、生态修复等方面的研究。Email：wang_pengxiang1@ctg.com.cn。

attribute analysis of land desertification was conducted from the perspectives of temporal changes and spatial differentiation using principal component analysis and geographical detector methods, respectively. [Results] The total area of land desertification decreased from 3.48×10^4 km^2 in 1990 to 1.67×10^4 km^2 in 2020; however, the degree of land desertification increased in certain areas, particularly in the western part of the study area, such as Saga and Jilong, and the southeastern parts, such as Kangma and Qiongjie County. The spatial distribution of land desertification exhibited a strip-like pattern along the main river channel from west to east, being concentrated on gentle slopes, moderate slopes, grasslands, and unused land. During 1990—2020, the reversal of land desertification in the study area was primarily influenced by human activities, with the principal contributing factors accounting for 59.1% of the total reversal. The spatial differentiation of land desertification shifted from dependence on natural geographical factors, such as elevation and wind speed, in 1990, to the synergistic influence of multiple factors, including natural and socioeconomic factors, in 2020, with the impact of various driving factors on the spatial distribution of land desertification exhibiting dual-factor enhancement and non-linear increase. [Conclusion] The degree of land desertification in the middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River basin was alleviated between 1988 and 2020; however, local exacerbations persisted. Hence, further strengthening the ecological restoration of the source area and enhancing sand source management and vegetation cultivation within a 10 km radius of both the left and right banks of the river is necessary.

Keywords: Yarlung Zangbo River; land desertification; remote sensing interpretation; driving factors

土地沙化是中国面临的最严重的生态问题之一，制约经济社会的可持续发展，精准的土地沙化监测识别与归因分析是支撑区域生态修复的重要抓手，也是支撑国家生态安全屏障建设的关键[1-2]。国家林业局第6次全国荒漠化和沙化调查结果显示[3]，中国沙化土地面积为1.69×10^6 km^2，占国土面积的17.58%；其中，西藏自治区沙化土地面积为2.10×10^5 km^2，占全区国土面积的17.43%，占全国沙化土地总面积的12.42%，主要集中在那曲、阿里等无人区和雅鲁藏布江及其支流河谷地带。

雅鲁藏布江(简称“雅江”)被誉为“藏族人的母亲河”，是西藏生态安全屏障建设的核心区域。流域内宽阔的河谷地带，加之地表沙物质丰富、土壤结构破碎、气候干冷多风、植被稀疏低矮等多因素的综合作用，成为中国河谷风沙地貌发育最严重的地区之一[4]。加之流域内气候条件高寒干旱，生态系统脆弱敏感，发生沙化后修复难度大。近年来，以增温为主要特征的气候变化改变了流域天然水循环及其伴生过程，生态环境脆弱性增强；另一方面，人口急剧增长和经济社会的快速发展，导致流域内土地开发利用强度升级，挤占生态环境用地；二者综合，造成部分区域土地沙化扩展、生态环境退化[5]。2021年，国家发改委等多部门印发《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》对雅江流域生态保护和修复提出重大要求和安排部署。基于此，迫切需要开展雅江流域土地沙化时空演变特征研究，并进行土地沙化的归因识别。

国内外关于土地沙化的研究，目前主要聚焦于沙化土地的监测识别和土地沙化的归因分析两个方面[6-8]。针对沙化土地的监测识别，主流的方法是通过地面样点调查结合遥感目视解译、阈值分割以及计算机自动分类等进行地类的划分，确定沙化土地区域，常用的如决策树方法、最近邻分类器方法和基于NDVI-Albedo特征空间的沙化土地划分方法等。其中，决策树分类器方法通过树形的判别规则区分地物类别[9]，虽然结构直观、简单易懂，但阈值确定需要基于大量样本数据，且难以区分具有相似光谱的地物类型[10]；最临近分类器方法能够实现模糊分类，可以有效区分具有相似光谱的地物，但分类过程中过多的种类信息会影响分类结果精度[11]；基于NDVI-Albedo特征空间荒漠化差值指数的沙化土地遥感解译主要利用植被指数(NDVI)和地表反照率(Albedo)的组合信息，通过构建反映土地沙化程度的合理指数(DDI)将不同沙化土地进行有效区分，可实现沙化土地时空分布和动态变化的定量监测[12]，但这类方法存在“干、湿边”和数据运算量及匹配度问题。针对上述问题，李作成等[13]通过对土地沙化相关遥感参量进行梳理，进行对比试验，增加土壤湿度指数(Wet)构建三维数据空间替代传统NDVI-Albedo特征空间，并利用Google Earth Engine平台遥感数据处理方面的便捷性，提高了青藏高原沙化模拟监测的精度和计算速度。针对土地沙化的归因分析，相关研究从过去的定性分析土地政策的作用影响为主，逐渐发展到目前的采用主成分分析、回归分析方法结合遥感技

术、地理信息技术等进行气候变化和人类活动对土地沙化时空演变影响的定量识别[14-17]。

雅江中上游集中了雅江流域的重要支流,是西藏自治区重要的河谷农业区和商品粮基地,承担着西藏经济社会发展的重任。受气候变化、高海拔、人类活动等多因素的影响,雅江中上游土地沙化仍严重,时空演变及其驱动因素尚不清晰,生态保护与修复任务艰巨且迫切。基于此,本研究以 GEE 平台为支撑,利用改进的 NDVI-Albedo-Wet 特征空间荒漠化差值指数方法开展雅江中上游流域不同程度土地沙化时空演变特征的监测识别;在此基础上,通过广泛的经济社会、气候变化等数据收集与分析,基于主成分分析和地理探测器方法,深入研究区土地沙化时空变化的归因识别,旨在摸清流域内沙化土地规模和分布格局,掌握风沙活动特征和演变趋势,理清沙化的影响机制及其驱动因子,为开展雅江中上游流域生态修复与保护、破解流域内土地沙化约束下的发展瓶颈提供科学支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究以沙化土地广泛分布的雅江中上游流域为研究对象,研究区西起阿里地区的普兰县和革吉县,东至林芝市的米林市附近,经纬度范围在 28°00′—31°16′N,82°00′—94°55′E 之间,流域总面积 1.92×10^5 km^2,覆盖阿里地区、日喀则市、拉萨市、那曲市、山南市和林芝市等辖区的 46 个县(区),总人口约 237.9 万人,农林牧渔业产值约为 148.2 亿元,工业总产值为 255.3 亿元。研究区属于亚热带季风气候区,干、雨季分明,多年平均降水量在 246.2～539.7 mm 之间,年内分配不均,主要集中在 7—9 月,多年平均气温在 4.0～5.3 ℃。雅江中上游流域属于山原湖盆谷地貌,地形四周高,中间河谷低,高程分布在 2 830～7 312 m,流域河谷及盆地堆积着广泛分布有不同厚度的第四纪松散沉积物,通过长期的地球内外力作用形成现今的砂质地表,这些砂质地表含有大量细砂与极细砂为主的沙物质,是土地沙化发生和发展的物质来源。流域土壤类型包括 11 个土岗,22 个土类。从土岗来说,以高山土分布最广,约占流域总面积的 89%;就土类而言,以草毡土为主,占流域总面积的 37%。流域土地利用主要为草地,占流域总面积的 69%。

1.2　数据来源

本研究雅江中上游流域沙化土地遥感反演主要利用 Google Earth Engine (GEE)平台 Landsat 5/7 卫星 Collection 2 Level 2 Tier 1 数据集,筛选 1988—2020 年生长季(6—8 月)低云影像,以 3 a 为 1 期,融合解译获得 11 期沙化分布数据。同时,选取国家气象信息中心提供的研究区域 1988—2020 年 18 个气象站点降水、气温等监测数据,利用泰森多边形插值为与遥感数据相同空间分辨率,作为气候变化的表征;选取西藏自治区统计局提供的市县 1988—2020 年人口密度、GDP 密度统计数据,空间插值后作为经济社会发展的表征;以中国科学院资源环境科学数据中心下载获得的数字高程(DEM)、土壤类型、土地利用、植被指数(NDVI)等空间数据经格式化处理(重采样、统一投影)后作为地形地貌要素的表征;开展土地沙化时空演变的归因识别。数据来源详见表 1。

表 1　数据来源统计

Table 1　Statistics of data source

数据类型	名 称	时间跨度	分辨率/m	来 源
遥感数据	Landsat 5/7 卫星数据集	1988—2020 年	30	GEE 平台
	土壤湿度	1988—2020 年	30	Landsat 5/7 卫星数据集
	沙化土地分布	1988—2020 年	30	Landsat 5/7 卫星数据集
气象数据	降水、气温、风速日均值	1988—2020 年	—	国家气象信息中心
经济社会数据	人口、GDP 值、三产分布年统计值	1988—2020 年	—	西藏自治区统计局
地形地貌数据	DEM	—	30	中国科学院资源环境科学数据中心
	土壤类型	—	1 000	
	土地利用	1980—2020 年	30	
	NDVI	1988—2020 年	30	地理科学生态网

1.3　研究方法

本研究采用改进的考虑湿度指数的 NDVI-Albedo-Wet 特征空间荒漠化差值指数方法开展沙化土地的遥感解译,以 kappa 系数为评价指标量化解译数据的准确性;在此基础上,利用主成分分析方法,压缩自然和人为因子变量为综合指标,定量评价雅江中上游流域沙化土地时间变化的驱动因子贡献率;基于地理探测器方法,分析雅江中上游流域沙化土地的空间分异

性，量化各驱动因子对沙化土地空间分布的影响力大小。

1.3.1 沙化土地遥感解译 传统基于 NDVI-Albedo 特征空间的荒漠化差值指数方法，主要通过建立 NDVI与 Albedo 之间的线性回归关系，通过回归线表征沙化变化趋势，基于沙化程度划分标准，在回归线上作垂线，对 NDVI-Albedo 特征空间进行切割，将不同程度的沙化土地有效划分出来。李作成等[13]在传统 NDVI-Albedo 特征空间方法的基础上，添加具有物理意义的土壤湿度指数（Wet），通过构建三维数据空间〔公式(1)〕，开展沙化土地遥感解译，并以青藏高原 855 个有效调研点位信息，统计 GEE 平台模拟得到的荒漠化差值指数（DDI），参照高寒区沙化土地综合治理技术标准[18]对各调研点土地沙化程度进行分级（表 2），根据调查点位的沙化等级情况，划分不同程度土地沙化对应的 DDI 区间。证明了该方法在青藏高原土地沙化模拟评估应用中较传统 NDVI-Albedo 方法具有更高的精度，不同程度土地沙化反演制图精度在 71.5%～94.5%，kappa 系数为 0.77。本研究沙化土地数据来源于上述论文成果，并利用雅鲁藏布江中上游流域矢量边界切割获得。

$$DDI=2.02\times NDVI+1.32\times Wet-Albedo \quad (1)$$

式中：DDI 为荒漠化差值指数；NDVI 植被归一化指数；Wet 为土壤湿度指数；Albedo 为地表反照率。

表 2 土地沙化调查的程度划分及其分级指标

Table 2 Classification and grading indicators for land desertification investigation

沙漠化程度	植被盖度/%	景观特征描述	特 性
轻度沙化	≥50%	基本无风沙活动，偶有小流沙点或落沙地分布。主要指示物种有矮生蒿草、羊茅、莓叶委陵菜、高山唐松草	沙化面积随时间变化不明显
中度沙化	25%～50%	风沙流活动不明显，有斑点状流沙地、露沙地。主要指示物种有羊茅、波发早熟禾、火绒草、垂穗披碱草、沙生苔草、狼毒	沙化面积随时间呈线性增加
重(极重)度沙化	≤25%(<10%)	风沙流活动频繁，流动沙丘密集分布，裸沙土地占相当比例。主要指示物种有西伯利亚蓼、防风、赖草、沙生苔草、黄帚橐吾、粗壮嵩草	沙化面积随时间呈指数形式增加

1.3.2 主成分分析方法 主成分分析是一种统计方法，借助正交变换，将一组可能分量相关的原随机向量转化成其分量不相关的新随机向量，构成新的主成分综合指标[19]，即用较少的几个综合指标代替原来较多的变量指标，而且使这些较少的综合指标既能尽量多地反映原来较多变量指标所反映的信息，同时它们之间又是彼此独立的。

$$\begin{cases} z_1=l_{11}x_1+l_{12}x_2+\cdots+l_{1p}x_p \\ z_2=l_{21}x_1+l_{22}x_2+\cdots+l_{2p}x_p \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ z_m=l_{m1}x_1+l_{m2}x_2+\cdots+l_{mp}x_p \end{cases} \quad (2)$$

式中：x_1，$x_2\cdots x_p$ 为原变量指标，z_1，$z_2\cdots z_m$（$m<p$）为新变量指标。

本研究沙化土地时序变化驱动因子主成分分析选取降水（P_1）、气温（P_2）、风速（P_3）、日照（P_4）、相对湿度（P_5）、NDVI（P_6）等自然因素和常住人口（P_7）、生产总值（P_8）、农林牧渔产值（P_9）、耕地面积（P_{10}）、畜牧头数（P_{11}）、造林面积（P_{12}）、伐木量（P_{13}）等人为因素为特征变量。

1.3.3 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统计学方法[20]。其假设：如果某个自变量对因变量有重要影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。利用地理探测器进行雅江中上游流域土地沙化驱动因子影响力计算，主要筛选人口密度、产值密度等 4 个经济社会因素为人类活动驱动力的表征；高程、坡度等 4 个因子为地形地貌驱动力的表征；降水、气温等 6 个要素为气候变化驱动力的表征。除土地利用和土壤类型按标准分类外，其余各驱动因子均采用自然断点方法进行类型划分，结果详见表 3。

表 3 土地沙化的驱动因子及其离散化方法

Table 3 Driving factors and their discretization methods of land desertification

类 别	驱动因子名称	离散方法	分类数量
人类活动	X_1人口密度/(人·km^{-2})	自然断点法	8
	X_2第一产业产值密度/(10^4 元·km^{-2})	自然断点法	8
	X_3第二产业产值密度/(10^4 元·km^{-2})	自然断点法	8
	X_4土地利用	标准分类	6
地形地貌	X_5NDVI	自然断点法	8
	X_6土壤类型	标准分类	12
	X_7坡度/(°)	自然断点法	8
	X_8高程/m	自然断点法	8
气候变化	X_9土壤湿度/(m^3·m^{-3})	自然断点法	8
	X_{10}年均降水量/mm	自然断点法	8
	X_{11}日照时数/h	自然断点法	8
	X_{12}年均气温/℃	自然断点法	8
	X_{13}相对湿度/%	自然断点法	8
	X_{14}年均风速/(m·s^{-1})	自然断点法	8

2　结果与分析

2.1　雅江中上游沙化土地时序变化

基于 1990—2020 年 11 期沙化土地遥感解译结果,统计雅江中上游流域不同程度沙化的时序变化(图 1)。由图 1 分析可知,研究区沙化土地总面积由 1990 年期的 3.48×10⁴ km²,减少至 2020 年期的 1.67×10⁴ km²,未沙化地增长率在 1 300 km²/3 a 左右。其中,重度沙化土地面积减速最快,变化率约 600 km²/3 a,由 1990 年期的 1.13×10⁴ km²,减少至 2020 年期的 4 900 km²,占沙化土地总面积的比例由 32.5%减少至 29.3%;中度和轻度沙化土地面积亦呈减小趋势,占流域沙化土地总面积的比例分别由 1990 年期的 17.7%和 8.7%减小至 2020 年期的11.7%和4.7%;需要指出的是,极重度沙化土地面积虽然由 1990 年期的 1.43×10⁴ km²,减少至 2020 年期的 9 100 km²,但占沙化土地总面积比例却由41.1%上升至 54.5%。

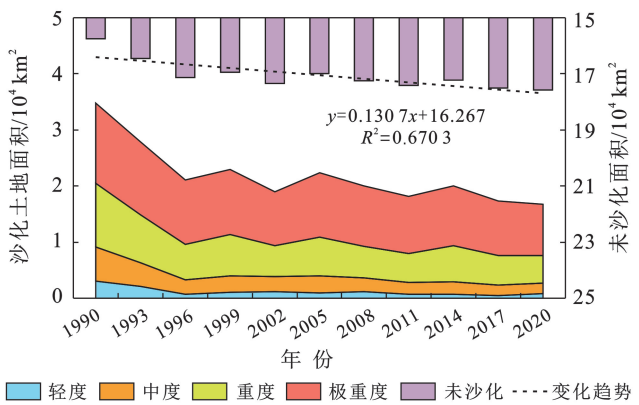

图 1　雅江中上游流域 1990—2020 年沙化土地时序变化

Fig.1　Temporal changes of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River basin from 1990 to 2020

2.2　雅江中上游沙化土地空间变化

以年份为自变量,以沙化分级指数(DDI)为因变量,线性回归得到雅江中上游流域沙化分级指数近 30 a 的变化率,划分沙化土地动态转化的空间分布格局(图 2)。由图 2 可知,近 30 a 雅江中上游流域土地沙化整体呈逆转趋势,但存在局部土地沙化加剧现象。沙化逆转区域总面积约 3.13×10⁴ km²,面积比例约为 65.6%;主要分布在研究区西部的仲巴县和中部的桑珠孜区等。沙化加剧区域总面积约1.64×10⁴ km²,面积比例为 34.4%;主要分布在研究区西部的萨嘎县、吉隆县片区和东南部的康马县、琼结县等。

2020 年(现状)雅江中上游流域沙化土地具有典型的"自西向东"空间分异格局,西部源区的仲巴县、萨嘎县分布最广,面积达 8 000 km²,占研究区沙化土地总面积的 48%,且以极重度为主(图 3)。同时,研究区沙化土地具有显著的沿河道分布特点,干流河道 10 km 范围内,不同程度沙化面积达 1.02×10⁴ km²,比例达 61%。其中,河道 1 km 范围沙化面积比例为 9.6%,随着河道辐射距离延长,公里间隔沙化面积比例呈指数减小。水土保持不同坡度分级条件下,微坡(<5°)、缓坡(8°~15°)和较陡坡(15°~25°)沙化土地分布较广,面积比例分别为 41.1%,19.9%和 18.7%。不同土地利用条件下,雅江中上游流域以草地和未利用地沙化为主,所占比例分别为 54.1%和 32.1%(图 4)。

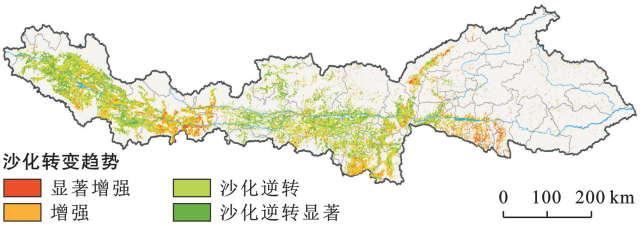

图 2　雅江中上游沙化土地动态转变空间分布格局

Fig.2　Spatial distribution pattern of dynamic changes of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River

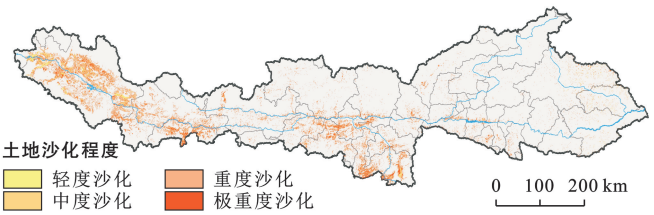

图 3　2020 年雅江中上游沙化土地地理空间分布

Fig.3　Geospatial distribution of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River in 2020

2.3　雅江中上游土地沙化驱动因子识别及影响机制

2.3.1　沙化土地时序变化驱动因子分析　基于主成分分析方法量化评估雅江中上游流域沙化土地时序变化的主要驱动因素及其因子载荷(图 5)。结果表明,PC_1—PC_3 主成分累计贡献率达 90.5%,为雅江中上游流域土地沙化的主要驱动因素。其中,PC_1 主成分因子荷载系数绝对值排序前 5 的分别是常住人口、农林牧渔产值、生产总值、造林面积和耕地面积,均为人为因素,贡献率为 59.1%,说明,研究区沙化土地的时序变化主要受人为因素主导;PC_2 主成分因子载荷系数绝对值排序前五的是伐木量、风速、气温、日照和畜牧头数,为人为因子和自然因素的综合,贡献率为 19.9%;PC_3 主成分因子载荷系数绝对值排序前五的是相对湿度、降水、日照、风速和 NDVI 等,均为自然因素,贡献率为 11.4%。

2.3.2　沙化土地空间分异驱动因子影响力分析　利用地理探测器方法,量化评估雅江中上游流域 1990,2005 和 2020 年期各驱动因子对沙化土地空间分异的影响程度大小(图 6)。由图 6 分析可知,研究区沙

化土地空间分异的主要驱动因子由 1990 年期的以自然地理要素影响为主，逐渐过渡为 2020 年期的多驱动因子协同均衡影响。其中，1990 年期，对沙化空间分布影响较大的驱动因子主要为高程（X_8，$q_s=0.13$）和风速（X_{14}，$q_s=0.11$）因子，其次为第一、二产业产值密度（X_2，X_3，$q_s=0.09$）；2005 年期，对沙化空间分布影响较大的驱动因子过渡为降水（X_{10}，$q_s=0.11$）、风速（X_{14}，$q_s=0.1$）、气温（X_{11}，$q_s=0.1$）为主，其次为第一、二产业产值密度（X_2，X_3，$q_s=0.09$）；至 2020 年期，影响沙化土地空间分异的主要驱动因子则包括风速、降水、高程、坡度（X_7）、第一产和第二产业产值密度等，q_s 值均介于 0.05～0.06。

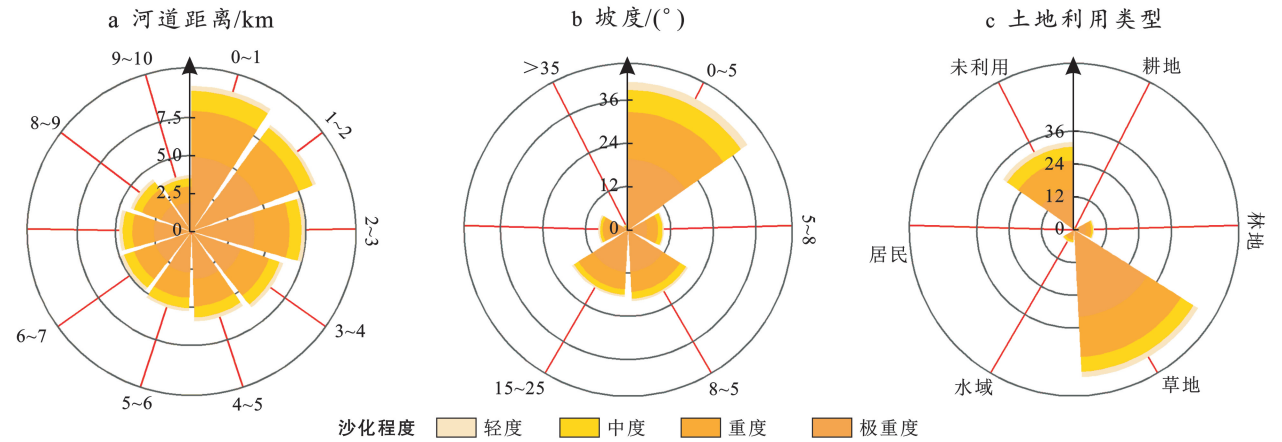

图 4 不同空间位置沙化土地面积比例（单位：%）

Fig.4 Percentage of land desertification in different spatial locations (unit: %)

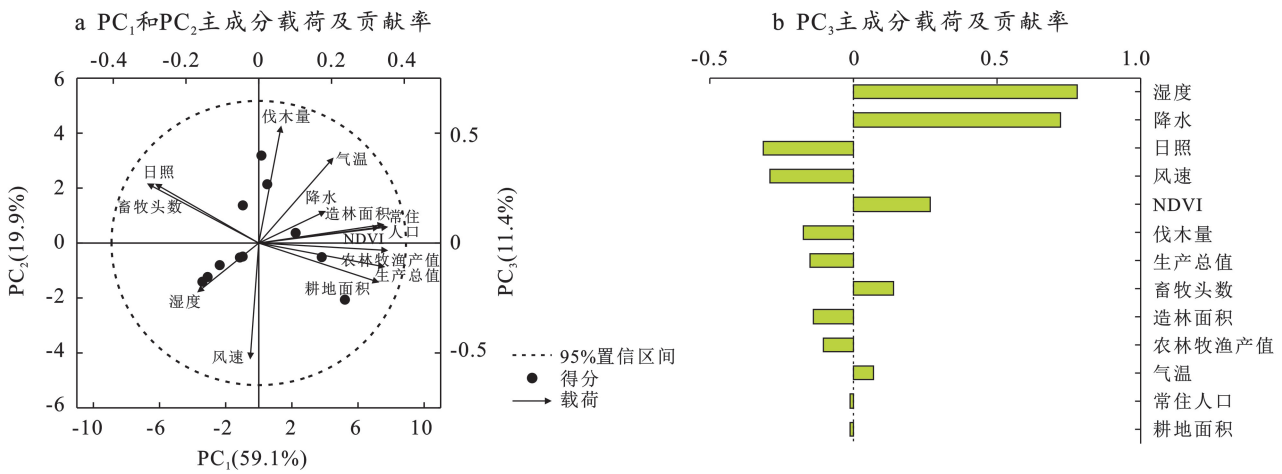

图 5 沙化土地时序变化驱动力主成分分析载荷图

Fig.5 Load diagram of principal component analysis on driving forces for temporal changes in land desertification

3 讨论

受制于数据来源、监测方法和统计时段的不统一，关于雅鲁藏布江流域土地沙化的量化研究结论不一致[13,21-23]。本研究以 GEE 平台 Landsat 系列卫星遥感数据为支撑，采用改进的 NDVI-Albedo-Wet 特征空间荒漠化差值指数方法开展近 30 a 雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空动态的监测识别和归因分析。结果表明，研究区土地沙化整体呈逆转趋势，但存在局部加剧现象，研究结论基本与第 6 次荒漠化和沙化土地监测结果一致[3]。截止到 2020 年期，雅江中上游流域沙化土地总面积约为 1.67×10^4 km^2，极重度沙化土地比例达 54.5%，且呈现出显著的自西向东沿干流河道带状分布特点。其中，西部源区的仲巴县和萨嘎县境内沙化土地分布最广，一方面因为源区生态环境复杂脆弱，受冻融侵蚀、水力侵蚀和风力侵蚀等多种因素的制约[24]；另一方面，源区土地利用以未利用地和低密度草地为主[25]，土质疏松，为土地沙化提供了天然条件。雅江河谷由西向东横向分布，与该地区盛行的季风风向平行，加之干湿交替，河床水位升降，大量沙物质裸露，在西南季风搬运作用下，形成了河道两岸大面积的堆积沙地和坡面沙地。本研究量化结果，雅江干流河道 10 km 范围内，沙化面积比例达 61%，且集中分布在微坡和缓坡滩涂区域。

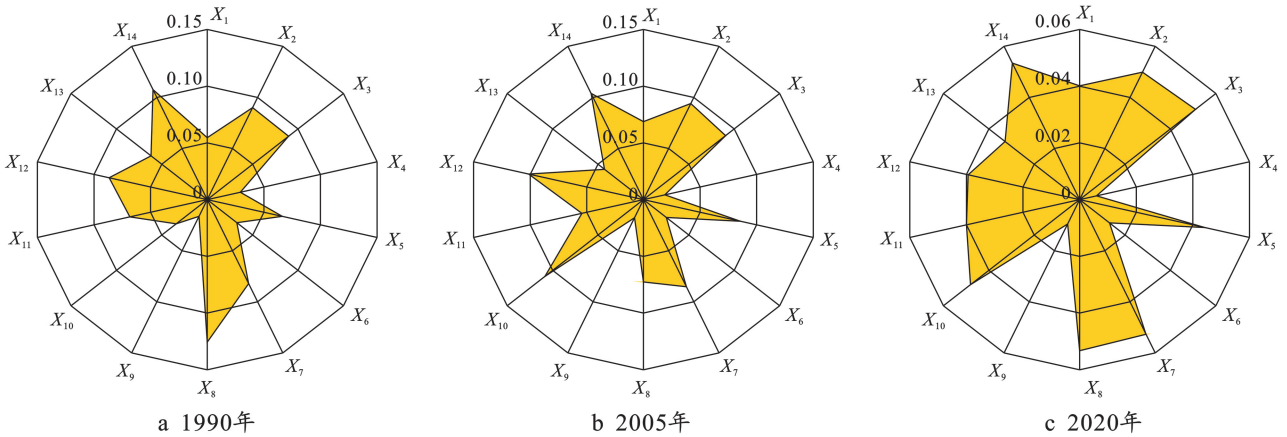

图 6　典型年沙化土地空间分异驱动因子影响力统计

Fig.6　Driving factor influence statistics for spatial differentiation of land desertification in typical years

雅江中上游流域 1990—2020 年沙化土地时序变化的归因识别结果表明,近 30 a 研究区土地沙化呈逆转趋势的主要原因是受人为因素的影响,主成分因子(PC_1)贡献率达 59.1%,说明人工干预防沙治沙工作成效显著。经过多年的综合治理,西藏自治区造林面积和植被盖度双增高,实现了荒漠化和沙化土地面积的双下降;特别是针对雅鲁藏布江中上游流域,统计结果,近 20 a 植被覆盖(NDVI)以 0.02/10 a 变化速率波动增长,沙化治理成效显著[21]。气候变化对雅江中上游流域沙化土地时序变化的贡献相对较小且复杂,主成分因子(PC_3)贡献率为 11.4%。根据典型气象因子时序变化统计结果(图 7),雅江中上游流域近 30 a 降水量呈 0.3 mm/a 增加趋势,一方面为植被恢复提供了有利水分条件[26],另一方面降水增加可能加重水力侵蚀[27-28]。流域气温呈 0.03 ℃/a 波动上升,一方面使得蒸发增强,土壤干化,为土地沙化创造条件;另一方面,导致冻土融化,冻融侵蚀增强;加之区域风速的波动变化,协同过度放牧,不合理开垦等人类活动多因素的综合,可能造成雅江中上游流域土地沙化的局部加剧。

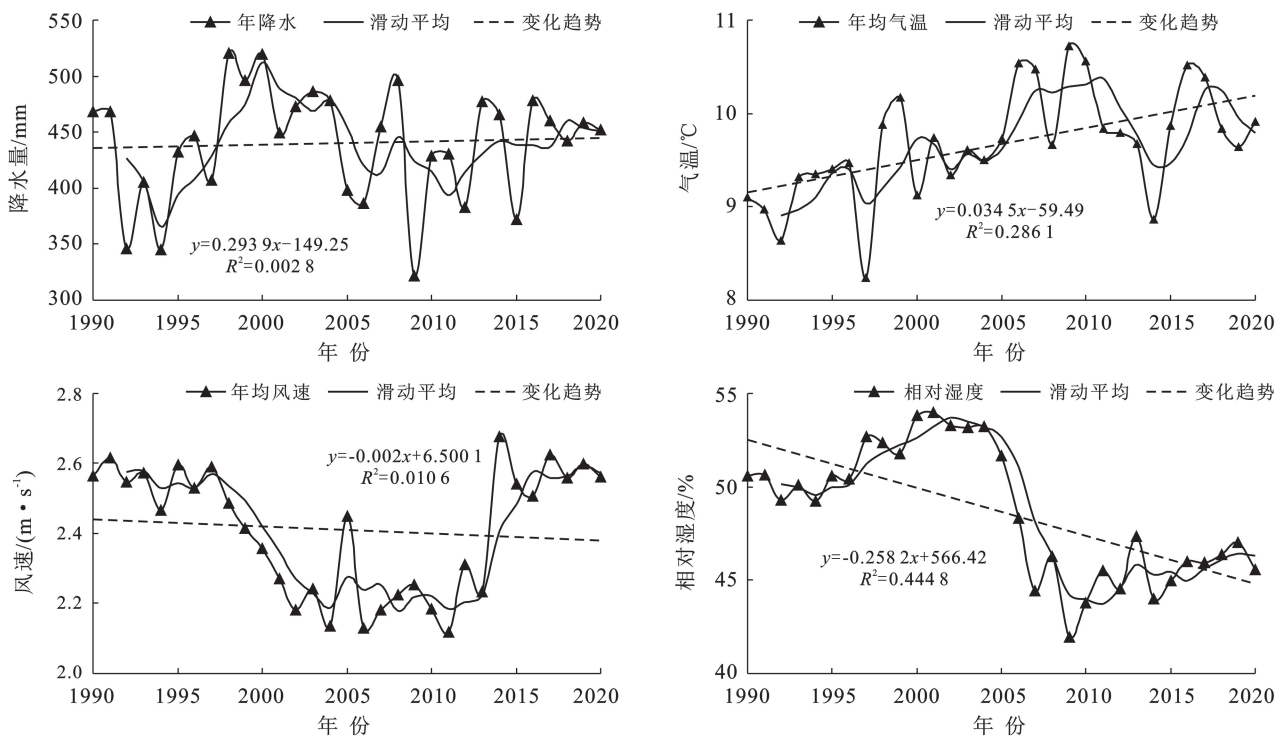

图 7　雅江中上游流域 1990—2020 年气候变化

Fig.7　Climate changes in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River basin from 1990 to 2020

沙化土地空间分异性归因分析，1990 年期雅江中上游流域沙化土地空间分布主要受高程地形地貌和风速气候变化的影响，与已有研究结论相似[29]。上述现象可能归因于研究区土壤侵蚀的特点：河谷低海拔地区沙化土地广泛分布，且是风力侵蚀的主要发生区域；水力侵蚀多发生于海拔 5 200 m 以下区域，冻融侵蚀则集中在海拔 5 200 m 以上区域[30]。近 30 a 受人类活动和气候变化的双重作用，研究区沙化土地空间分布的驱动力由自然地理要素为主，向多因素协同均衡影响转变。至 2020 年期，研究区沙化土地空间分布受风速、降水、高程、坡度和产值密度等多因素的综合影响，各因子影响力值均介于 0.05～0.06。需要强调的是，各驱动因子并非单独作用影响沙化土地的空间分布，因子间存在协同效应。地理探测器因子交互作用探测结果，因子两两交互对沙化土地空间分布影响力呈双因子增强和非线性增强（图 8）。其中，交互影响力排序前 3 的分别是：高程∩NDVI、高程∩风速以及高程∩第一产业产值密度。

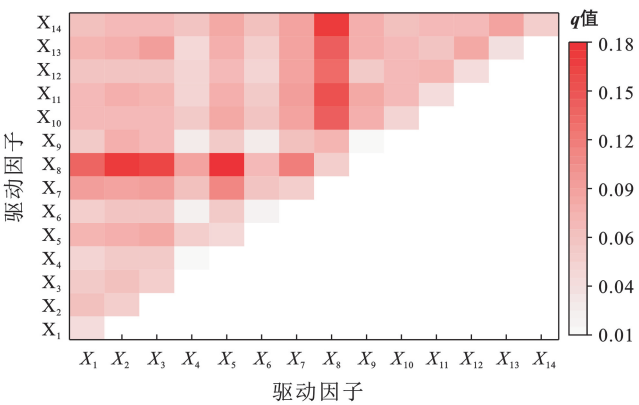

图 8 土地沙化空间分布驱动因子交互作用影响力统计

Fig.8 Statistical analysis of interactive influence of driving factors on spatial distribution of land desertification

4 结 论

1990—2020 年雅江中上游流域土地沙化整体呈逆转趋势，但局部区域仍有加剧，极重度沙化面积比例增加。截止到目前，沙化土地仍以极重度为主，呈现出自西向东沿干流河道带状分布的特点，江源区沙化土地广泛分布且集中在微坡、缓坡地形以及草地和未利用地上。主成分分析结果，土地沙化逆转主要受人类活动因素影响，而研究区气候暖湿化、风速波动变化等，则可能是土地沙化加剧的诱因。地理探测器分析结果，雅江中上游流域沙化土地空间分异主要影响因子由 1990 年期的高程、风速等自然地理因素，转变为 2020 年期的风速、降水、高程和产值密度等多因素的协同，且各驱动因子对沙化土地空间分布的影响力呈双因子增强和非线性增强。建议进一步加强雅江源区生态修复与保护，加强河道左右岸 10 km 范围的沙源治理和植被培育、探索 25°坡度以下集中连片沙化土地的光伏治沙新模式。

参考文献（References）

[1] 屠志方，李梦先，孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理，2016(1)：1-5.
Tu Zhifang, Li Mengxian, Sun Tao. The status and trend analysis of desertification and sandification [J]. Forest Resources Management, 2016(1):1-5.

[2] Shi Peng, Huang Yong, Chen Chen, et al. How does pipeline construction affect land desertification? A case study in Northwest China [J]. Natural Hazards, 2015, 77(3):1993-2004.

[3] 昝国盛，王翠萍，李锋，等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J].林业资源管理，2023(1)：1-7.
Zan Guosheng, Wang Cuiping, Li Feng, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification [J]. Forest Resources Management, 2023(1):1-7.

[4] 李伟娟.雅鲁藏布江中上游沙化土地动态研究[D].西藏拉萨：西藏大学，2019.
Li weijuan. Analysis on dynamic changes of sandy desertification land in the middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River in Tibet [D]. Lasha, Xizang: Tibet University, 2019.

[5] Wang Pu, Lassoie J P, Morreale S J, et al. A critical review of socioeconomic and natural factors in ecological degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. The Rangeland Journal, 2015,37(1):1-9.

[6] Feng Lili, Jia Zhiqing, Li Qingxue, et al. Spatiotemporal change of aeolian desertification land distribution in Northern China from 2001 to 2015 [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018,46(10):1555-1561.

[7] Wei Wei, Guo Zecheng, Shi Peiji, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in Northwest China from 2000 to 2017 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021,31(1):46-68.

[8] 吴俊君.沙化土地遥感定量提取与评价方法研究[D].北京：中国林业科学研究院，2015.
Wu Junjun. Methods for quantitative extraction and assessment of sandy land based on remote sensing technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.

[9] 吕利利，颉耀文，黄晓君，等.基于 CART 决策树分类的沙漠化信息提取方法研究[J].遥感技术与应用，2017，32(3)：499-506.
Lv Lili, Xie Yaowen, Huang Xiaojun, et al. Desertification information extraction method research based on the

CART decision tree classification [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(3):499-506.

[10] Duan Hanchen, Wang Tao, Xue Xian, et al. Dynamics of aeolian desertification and its driving forces in the Horqin Sandy Land, Northern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014,186(10):6083-6096.

[11] Ezghari S, Zahi A, Zenkouar K. A new nearest neighbor classification method based on fuzzy set theory and aggregation operators [J]. Expert Systems with Applications, 2017,80:58-74.

[12] 李宇君,张磊.基于沙地指数模型的沙地监测方法[J].地球信息科学学报,2021,23(4):680-691.
Li Yujun, Zhang Lei. Sandy land monitoring method based on classification index model [J]. Journal of Geo-Information Science, 2021,23(4):680-691.

[13] 李作成,张路,欧阳志云,等.基于 Google Earth Engine 的青藏高原土地沙化模拟与动态评估[J].生态学报,2023,43(4):1526-1536.
Li Zuocheng, Zhang Lu, Ouyang Zhiyun, et al. Land desertification simulation and dynamic assessment of Qinghai-Tibet Plateau based on Google Earth Engine [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(4):1526-1536.

[14] 朱震达.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,1998,18(2):145-155.
Zhu Zhenda. Concept, cause and control of desertification in China [J]. Quaternary Sciences, 1998,18(2):145-155.

[15] 刘拓.中国土地沙漠化及其防治策略研究[D].北京:北京林业大学,2005.
Liu Tuo. Studies of desertification and it's control strategies in China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.

[16] Xu Duanyang, Li Chunlei, Zhuang Dafang, et al. Assessment of the relative role of climate change and human activities in desertification: A review [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011,21(5):926-936.

[17] Huang Jianping, Zhang Guolong, Zhang Yanting, et al. Global desertification vulnerability to climate change and human activities [J]. Land Degradation & Development, 2020,31(11):1380-1391.

[18] 国家林业和草原局.高寒区沙化土地综合治理技术标准:LY/T 2997—2018[S].北京:中国标准出版社,2019.
National Forestry and Grassland Administration. Technical standard for comprehensive management of desertification land in high cold regions: LY/T 2997—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[19] Ringnér M. What is principal component analysis? [J]. Nature Biotechnology, 2008,26(3):303-304.

[20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[21] 李海东,沈渭寿,蔡博峰,等.雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系[J].生态学报,2013,33(24):7729-7738.
The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(24):7729-7738.

[22] 孙明,沈渭寿,李海东,等.雅鲁藏布江源区风沙化土地演变趋势[J].自然资源学报,2010,25(7):1163-1171.
Sun Ming, Shen Weishou, Li Haidong, et al. Traits and dynamic changes of the aeolian sandy land in the source region of the Yarlung Zangbo River in Tibet [J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(7):1163-1171.

[23] 詹琪琪,赵伟,杨梦娇,等.雅鲁藏布江中部流域土地沙化遥感识别[J].地球信息科学学报,2022,24(2):391-404.
Zhan Qiqi, Zhao Wei, Yang Mengjiao, et al. Identification of sandy land in the midstream of the Yarlung Zangbo River [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022,24(2):391-404.

[24] 李海东,沈渭寿,邹长新,等.雅鲁藏布江源区土壤侵蚀特征[J].生态与农村环境学报,2010,26(1):25-30.
Li Haidong, Shen Weishou, Zou Changxin, et al. Soil erosion in the source area of the Yarlung Zangbo in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010,26(1):25-30.

[25] 张瑞,徐宗学,刘晓婉,等.1980—2015 年雅鲁藏布江流域土地利用时空演变格局分析[J].中国农村水利水电,2019(3):106-111.
Zhang Rui, Xu Zongxue, Liu Xiaowan, et al. Spatiotemporal characteristics of land use/cover change for the Yarlung Tsangpo River Basin from 1980 to 2015 [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3):106-111.

[26] 孟庆博,刘艳丽,鞠琴,等.雅鲁藏布江流域近 18 年来植被变化及其对气候变化的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):539-550.
Meng Qingbo, Liu Yanli, Ju Qin, et al. Vegetation change and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River basin in the past 18 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021,19(3):539-550.

[27] Jiang Chong, Li Daiqing, Gao Yanni, et al. Spatiotemporal variability of streamflow and attribution in the Three-Rivers Headwater Region, Northwest China [J]. Journal of Water and Climate Change, 2016,7(3):637-649.

(下转第 404 页)

业绿色技术创新：基于系统GMM和动态门槛的中国省级数据分析[J].科研管理，2022，43(4)：111-118.
Chen Yuke, Liu Lantian, Dong Jingrong. Environmental regulation tools, regional differences and green technology innovation of enterprises: An analysis of China's provincial panel data based on the system GMM and dynamic threshold [J]. Science Research Management, 2022, 43(4): 111-118.

[19] 王国峰，钱子玉，石瑞.中国农业生态效率研究热点和趋势分析[J].中国农业资源与区划，2023，44(10)：20-31.
Wang Guofeng, Qian Ziyu, Shi Rui. Research hotspots and trends of agriculture eco-efficiency in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(10): 20-31.

[19] 郑德凤，郝帅，孙才志.基于DEA-ESDA的农业生态效率评价及时空分异研究[J].地理科学，2018，38(3)：419-427.
Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi. Evaluation of agricultural ecological efficiency and its spatial-temporal differentiation based on DEA-ESDA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 419-427.

[20] 王宝义，张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素：基于1996—2015年31个省份的面板数据分析[J].中国农村经济，2018(1)：46-62.
Wang Baoyi, Zhang Weiguo. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996-2015 [J]. Chinese Rural Economy, 2018 (1): 46-62.

[21] 汪亚琴，姚顺波，侯孟阳，等.基于地理探测器的中国农业生态效率时空分异及其影响因素[J].应用生态学报，2021，32(11)：4039-4049.
Wang Yaqin, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of agricultural eco-efficiency in China based on geographic detector [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4039-4049.

[22] 陈莹，杨芳玲.中国城镇化与土地财政耦合协调关系研究：基于省级面板数据的分析[J].南京农业大学学报(社会科学版)，2018，18(1)：106-114.
Chen Ying, Yang Fangling. Study on the coupling coordination between urbanization and land finance in China: An empirical analysis based on provincial panel data [J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, 18(1): 106-114.

[23] 王劲峰，徐成东.地理探测器：原理与展望[J].地理学报，2017，72(1)：116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134.

[24] 郭健斌，张英，张志伟，等.基于地理探测器的藏东南高山峡谷区土地利用变化及其驱动机制：以西藏林芝市为例[J].中国农业大学学报，2023，28(4)：210-226.
Guo Jianbin, Zhang Ying, Zhang Zhiwei, et al. Land use change and its driving mechanism in the alpine gorge of southeast Tibet based on geodetector: A case study of Nyingchi City [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(4): 210-226.

(上接第113页)

[28] 兰泽凡，田小靖，牛祎凡，等.基于RUSLE模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价[J].水土保持研究，2024，31(3)：20-29.
Lan Zefan, Tian Xiaojing, Niu Yifan, et al. Evaluation on soil erosion based on RUSLE model in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 20-29.

[29] 刘晓婉，彭定志，徐宗学.雅鲁藏布江流域NDVI对高程与降水的相依性研究[J].高原气象，2018，37(2)：349-357.
Liu Xiaowan, Peng Dingzhi, Xu Zongxue. Variability of NDVI with elevation and precipitation in Yarlung Zangbo River basin [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37 (2): 349-357.

[30] 赵健，李蓉.雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究[J].长江科学院院报，2008，25(3)：42-45.
Zhao Jian, Li Rong. Soil erosion and subarea characteristics in Yarlung Tsangpo River basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25 (3): 42-45.