基于地中海荒漠化与土地利用模型的中国北方6省区土地荒漠化敏感性分析

柴华彬，王 粘，邹友峰
（河南理工大学 测绘与国土信息工程学院，河南 焦作 454000）

摘 要：［目的］以中国北方6省区为研究区，采用地中海荒漠化与土地利用（MEDALUS）模型评估2010—2023年土地荒漠化敏感性及其时空演变特征，并探测其驱动因子，为区域土地退化防控和荒漠化风险管理提供科学决策依据。［方法］基于地中海荒漠化与土地利用模型、图谱分析法和地理探测器分析2010—2023年北方6省区荒漠化敏感性的时空演变特征和驱动机制。［结果］①北方6省区荒漠化敏感性类型以稳定型为主。不同类型转换面积达1.36×10^6 km²，占研究区面积的30.94%，主要发生在高敏感、中敏感和低敏感类型之间以及不同敏感类型的交界处。②各敏感性类型荒漠化面积变化存在明显差异。其中极敏感类型区域的面积由增长转为下降，高敏感类型呈波动状态，中敏感类型面积显著减少，低敏感区域持续扩展，不敏感区域面积保持稳定，总体趋势显示荒漠化敏感性有所缓解。③驱动因素分析结果显示，干燥度与土地利用类型的交互作用最显著。单因子驱动中，干燥度对敏感性变化的影响最大。［结论］研究期间北方6省区荒漠化敏感性整体态势降低，总体上呈西高东低的空间分布格局。未来北方6省区荒漠化治理过程中应加强对气候因子的监测，并合理有效规划土地利用类型。

关键词：荒漠化；MEDALUS模型；地理探测器；时空变化；北方6省区
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X（2026）05-0189-12 **中图分类号：**X171.1，P935

文献参数：柴华彬，王粘，邹友峰.基于地中海荒漠化与土地利用模型的中国北方6省区土地荒漠化敏感性分析[J].水土保持通报，2026，46（5）：189-200. Chai Huabin, Wang Zhan, Zou Youfeng. Desertification sensitivity analysis in six northern provinces and autonomous regions of China based on Mediterranean desertification and land use model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（5）：189-200.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.008 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.05.008**

Desertification sensitivity analysis in six northern provinces and autonomous regions of China based on Mediterranean desertification and land use model

Chai Huabin, Wang Zhan, Zou Youfeng
（*School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan* 454000, *China*）

Abstract: [Objective] Six northern provinces and autonomous regions were used as the study area, and the Mediterranean desertification and land use (MEDALUS) model was employed in order to assess land desertification sensitivity and its spatiotemporal evolution from 2010 to 2023 and to identify its driving factors, thereby providing a scientific basis for decision-making regarding regional land degradation prevention and control as well as desertification risk management. [Methods] Using the MEDALUS model, atlas analysis, and GeoDetector analysis, this study examined the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of desertification sensitivity in six northern provinces and autonomous regions from 2010 to 2023. [Results] ① The six northern provinces and autonomous regions were predominantly characterized by stable desertification sensitivity types. The area undergoing transitions between different types reached 1.36×10^6 km², accounting for 30.94% of the study

收稿日期：2025-12-15 **修回日期：**2026-03-27 **采用日期：**2026-03-28
资助项目：国家自然科学联合基金项目“山西黄河流域矿区采动生态演变驱动机制与协同修复”（U22A20620）；矿山环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心（安徽理工大学）开放基金项目（KSXTJC202301）；测绘科学与技术“双一流”项目（BZCG2023010）
第一作者：柴华彬（1977—），男（汉族），河南省新野县人，博士，教授，主要从事遥感信息处理，开采沉陷方面的研究。Email：chaihb@hpu.edu.cn。
通信作者：王粘（2000—），女（汉族），湖南省邵阳市人，硕士研究生，研究方向为生态遥感监测。Email：212304020098@home.hpu.edu.cn。

area. These transitions primarily occurred between high-, medium- and low-sensitivity types, as well as at the boundaries between different sensitivity types. ② There were marked differences in the changes in the areas of various desertification sensitivity categories. Specifically, the area of extremely sensitive regions shifted from an increase to a decrease; the area of high-sensitivity regions fluctuated; the area of moderate-sensitivity regions decreased significantly; the area of low-sensitivity regions continued to expand; and the area of non-sensitive regions remained stable. The overall trend indicated that desertification sensitivity had generally decreased. ③ The results of the driving factor analysis indicated that the interaction between aridity and land use type was the most significant. In the single-factor analysis, aridity had the greatest impact on changes in sensitivity. [Conclusion] During the study period, the overall sensitivity to desertification in the six northern provinces and autonomous regions decreased, exhibiting a spatial distribution pattern characterized by higher sensitivity in the west and lower sensitivity in the east. In future efforts to combat desertification in these six northern provinces and autonomous regions, monitoring of climatic factors should be strengthened, and land use types should be planned in a rational and effective manner.

Keywords: desertification; MEDALUS model; GeoDetector; spatiotemporal changes; six northern provinces and autonomous regions of China

中国是全球土地荒漠化最严重的国家之一[1-2]。根据第6次全国荒漠化和沙化调查结果,截至2019年,全国荒漠化土地面积为2.57×10^6 km^2,占国土面积的26.8%[3]。中国北方6省区(青海、甘肃、陕西、新疆、宁夏和内蒙古)的荒漠化面积达2.10×10^6 km^2,占全国荒漠化总面积的81.5%,是荒漠化严重地区,且北方6省区占据着塔里木盆地、黄土高原和蒙古高原等多个重要地貌单元,其荒漠化进程会影响中国北方的荒漠化治理与生态环境稳定性。

荒漠化敏感性是指在自然环境与人类活动共同作用下,土地生态系统发生荒漠化变化的潜在易感程度,反映土地对气候变化、土地利用变化及人类活动的响应能力[4]。敏感性分析能够识别高风险区域,为荒漠化防控和土地管理提供科学依据。现有研究提出了多种荒漠化敏感性评估模型,如压力-状态-响应(PSR)模型[5]、空间距离指数模型[6]以及地中海荒漠化与土地利用(MEDALUS)模型[7],其中MEDALUS模型因其指标灵活、量化有效而广泛应用[8-9],已在伊朗[10]、非洲[11]和土耳其[9]等多地得到实践。国内学者采用此方法对荒漠化敏感性也进行了系统探索,例如任雨等[12]采用MEDALUS模型对科尔沁沙地土地荒漠化风险进行了评估;马龙[13]、王青正等[14]基于MEDALUS模型并结合环境特征,建立了适用于研究区的潜在荒漠化风险评估模型,为当地荒漠化防控策略提供了依据。然而,这些研究多集中于局部区域或单年度分析,对于中国北方大范围、长期尺度的敏感性动态演变及其驱动机制研究仍较缺乏。

北方6省区是中国荒漠化治理的重点区域。中国几十年来先后实施了一系列生态保护工程,例如三北防护林工程(1978年)、退耕还林还草工程(2002年)、国家公园试点工程(2015年)等,对北方地区防沙治沙、减少水土流失、保障农业发展起到了至关重要的作用[15]。但是,随着气候变化以及人类活动影响,土地荒漠化压力逐年增大。因此,本研究选择以北方6省区为研究区,采用MEDALUS模型评估2010—2023年土地荒漠化敏感性及其时空演变特征,并探测其驱动因子,旨在为区域土地退化防控和荒漠化风险管理提供科学决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区为北方6省区,包括青海省、甘肃省、陕西省、新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区和内蒙古自治区,地理位置为31°35′—53°21′N,73°30′—126°4′E。该区域自然条件严酷,生态系统类型复杂。自2000年起,整个北方地区气温持续升高,增暖程度逐步加大。夏季降水相对集中,而冬季降水稀少。北方6省区大部分区域位于干旱半干旱气候区,该区域1901—2022年的年平均降水量不足400 mm[16]。

1.2 数据源与预处理

研究区DEM数据来源于地球资源数据云平台提供的全国250 m DEM数据,坡度根据DEM数据计算所得。土壤质地、土壤容重、土体厚度数据来源于国家青藏高原科学数据中心提供的中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集(2010—2018年),该数据集基于全国土壤调查和实地采样进行了精度检验与验证[17-18]。除上述静态数据外,其他数据年份均选取2010,2015,2020和2023年。人口密度数据来源于LandScan平台。NDVI、土地利用类型数据分别来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的中

国年度 NDVI,EVI 1 KM 数据集和中国多时期土地利用遥感监测数据集。降水量和潜在蒸散量数据分别来源于国家地球系统科学数据中心提供的 1901—2023 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集和国家青藏高原科学数据中心提供的中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集,两数据集均使用 ArcGIS 生成年度数据。数据均统一坐标系为 GCS_WGS_1984。

1.3　研究方法

1.3.1　MEDALUS 模型

MEDALUS 模型通过多层次、多因子的分析方法,帮助评估土地退化的敏感性、土地利用的可持续性以及恢复的潜力[19]。通过从土壤、植被、气候和管理质量 4 个方面,选择对荒漠化有影响的关键子指标,每个子指标对荒漠化的贡献以权重值定量表示,分别计算土壤、植被、气候和管理 4 个质量指数,最终得到荒漠化敏感性指数。

北方 6 省区干旱、半干旱区域广布,土地荒漠化的主要影响因素与 MEDALUS 模型的评价维度具有较好的对应关系,因而该模型能够较为全面地表征研究区荒漠化敏感性。考虑到区域内部自然环境差异显著,本研究在原有 MEDALUS 模型基础上进行了改进,以量化北方 6 省区土地荒漠化敏感性。在干旱和半干旱地区,选择 NDVI 作为植被健康状况的子指标,用以表征植被覆盖状况。在气候质量指数中将坡向替换为潜在蒸散量,坡向的影响更局限于局部地形,对于研究区采用的分辨率为 1 km 的遥感数据来说,坡向的细微变化很难在评估结果中表现出来[20]。而北方 6 省区存在植被覆盖和气候的差异,从东部的草原到西部的荒漠草原和荒漠,气候类型多样。潜在蒸散量是在有足够的水源可用的情况下发生的蒸发和蒸腾量,是根据风速、湿度和日照时数计算得出的综合指数[21],故研究中将其作为气候质量指数评估的子指标。参考 MEDALUS 模型指导手册以及相关参考文献对选取的子指标进行分类并赋权重[22-24]后计算各质量指数。

(1) 土壤质量指数。土壤质量指数由土壤质地、土壤容重、土体厚度和坡度 4 个参数构成[19-20]。土壤质地是土地荒漠化的重要评价指标,其性质在不同荒漠化进程中差异显著。土壤容重反映土壤的紧实度和孔隙度,较高的土壤容重会抑制植物根系生长和微生物活动。土体厚度是指植物根系能够有效利用的土层深度,较厚的土体提供了更大的根系生长空间和水分。坡度会影响水土流失和土壤水分保持。其计算公式为

$$SQI=(ST\cdot SD\cdot S\cdot BD)^{1/4} \tag{1}$$

式中:SQI 为土壤质量指数; ST 为土壤质地; SD 为土体厚度(cm); S 为坡度(°); BD 为土壤容重(g/cm^3)。

(2) 植被质量指数。植被质量指数选取植被覆盖、火灾风险、抗旱性和侵蚀防护 4 个子指标[20]。采用归一化植被指数(NDVI)近似表征研究区的植被覆盖情况。火灾风险、抗旱性和侵蚀防护通过土地利用类型重分类获得[25],用以量化植被对荒漠化的防护能力。计算公式为

$$VQI=(DR\cdot EP\cdot FR\cdot VC)^{1/4} \tag{2}$$

式中:VQI 为植被质量指数; DR 为抗旱性; EP 为侵蚀防护; FR 为火灾风险; VC 为植被覆盖。

(3) 气候质量指数。气候质量指数由降水量、潜在蒸散量和干燥度构成[24]。干燥度是降水量与潜在蒸散量的比值,反映区域气候的干燥程度[26]。地表潜在蒸散量直接反映了地表水分的蒸发潜力和地表水分循环的状态,高潜在蒸散发条件下,地表水分的流失会导致土地的退化和沙漠化。降水量提供直接水分补给。本文选择这 3 个指标作为参数进行计算,计算公式为

$$CQI=(PRE\cdot PET\cdot AI)^{1/3} \tag{3}$$

式中:CQI 为气候质量指数; PRE 为降水量(mm); PET 为潜在蒸散量(mm); AI 为干燥度。

(4) 管理质量指数。管理质量指数由人口密度和土地利用类型构成[19]。人口密度反映人类活动强度,对土地利用压力和荒漠化敏感性有直接影响。土地利用方式的不合理(如过度放牧、过度开垦、不合理的农业实践)会增加生态系统脆弱性。人口密度数据存在少量空值,采用 ArcGIS 的 Focal Statistics 工具进行插值后计算。计算公式为

$$MQI=(PD\cdot LU)^{1/2} \tag{4}$$

式中:MQI 为管理质量指数; PD 为人口密度(人/km^2); LU 为土地利用类型。

1.3.2　荒漠化敏感性指数

荒漠化敏感性指数是 MEDALUS 模型的核心指标,用于定量化评估土地荒漠化的潜在敏感性。它由土壤质量指数、植被质量指数、气候质量指数和管理质量指数的几何平均值[25]得出。计算公式如(5)所示,并按表 1 对荒漠化敏感性指数进行等级划分。

$$DSI=(SQI\cdot VQI\cdot CQI\cdot MQI)^{1/4} \tag{5}$$

荒漠化敏感性类型动态度参考土地利用类型动态度,是衡量某一种敏感类型在研究时段内的变化速度[27]。计算公式为

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{t}\times 100\% \tag{6}$$

式中:K 为研究时段内某一荒漠化敏感类型的动态度(%); U_a 为研究初期某荒漠化敏感类型的面积

(km^2)；U_b为研究末期该荒漠化敏感类型的面积(km^2)；T为研究时间长(a)。

表1 荒漠化敏感性指数的范围和等级

Table 1 Ranges and categories of desertification sensitivity index

敏感程度	等级	分类标准
不敏感	1	<1.17
低敏感	2	1.17～1.33
中敏感	3	1.33～1.37
高敏感	4	1.37～1.53
极敏感	5	>1.53

1.3.3 荒漠化敏感性时空演变特征

为了探究北方6省区土地荒漠化敏感性的时空变化特征及规律，单独提取各敏感性类型斑块，运用特定公式对不同年份相同敏感性类型的栅格地图进行空间叠加分析[5,20]。计算公式为

$$Code_i = 1\,000 \times Code_{i_2010} + 100 \times Code_{i_2015} + 10 \times code_{i_2020} + Code_{i_2023} \quad (7)$$

式中：$Code_i$为该敏感类型在研究期内的演变编码；$Code_{i_2010}$，$Code_{i_2015}$，$Code_{i_2020}$和$Code_{i_2023}$分别为2010，2015，2020和2023年的该敏感类型栅格图斑。单一敏感类型转移特征初始栅格共有16种编码值，对其研究期间内转移特征进行分类归纳为4类(表2)。

表2 单一敏感类型转移特征分类

Table 2 Classification of transition characteristics of single sensitivity types

转换类型	编码	分类	说明
稳定型	1111	1	敏感类型多年未发生变化
转入型	0001,0011,0101,0111	2	敏感类型发生变化，由其他类型演变而来
转出型	1000,1100,1010,1110	3	敏感类型发生变化，转出为其他类型
波动型	0010,0100,0110,1001,1011,1101	4	2023年与2010年相比敏感类型未发生变化，但在研究期内呈现波动演变
其他	0000	0	

同时，基于表2内单一敏感类型转移特征4类编码栅格图，采用公式(8)进行整合，以此获得2010—2023年北方6省区总体土地荒漠化敏感性时空演变编码。

$$Code = 10\,000 \times Code_{no} + 1\,000 \times Code_{low} + 100 \times Code_{mid} + 10 \times Code_{high} + code_{ext} \quad (8)$$

式中：$Code_{no}$，$Code_{low}$，$Code_{mid}$，$Code_{high}$，$Code_{ext}$分别对应不敏感、低敏感、中敏感、高敏感和极敏感类型。并将其整理为17类，形成研究区荒漠化敏感性演变图谱(表3)，用于定量分析各敏感类型的空间演变规律。

表3 荒漠化敏感性时空变化图谱特征

Table 3 Atlas characteristics of spatiotemporal changes in desertification sensitivity

编码	分类	说明	编码	分类	说明
00001	1	该地一直为极敏感类型	01000	10	该地一直为低敏感类型
00010	2	该地一直为高敏感类型	02300	11	中敏感类型转低敏感类型
00023	3	极敏感类型转高敏感类型	03200	12	低敏感类型转中敏感类型
00032	4	高敏感类型转极敏感类型	04400	13	低敏感和中敏感类型之间波动
00044	5	极敏感和高敏感类型之间波动	10000	14	该地一直为不敏感类型
00100	6	该地一直为中敏感类型	23000	15	低敏感类型转不敏感类型
00230	7	高敏感类型转中敏感类型	32000	16	不敏感类型转低敏感类型
00320	8	中敏感类型转高敏感类型	44000	17	不敏感和低敏感类型之间波动
00440	9	中敏感和高敏感类型之间波动	00000	其他	

1.3.4 地理探测器

地理探测器是一种空间统计分析方法，主要用于揭示地理现象空间异质性的驱动因素及其作用机制[28]。该方法通过分析变量之间的空间一致性和变异性，评估驱动因子对目标现象的解释力。其中因子探测器是通过计算q值来度量某一因子对荒漠化敏感性变化的影响程度。将荒漠化敏感性作为因变量，其他影响因子作为自变量。q值越大，该因子对荒漠化敏感性变化的影响越大。交互探测器是用于分析不同因子之间的交互作用，即多个因素共同作用时对目标现象的影响。

2 结果与分析

2.1 质量指数分析(SQI\VQI\CQI\MQI)

2010—2023年各质量指数的空间分布差异变化较为细微。整体来看，以2023年为例(图1)，土壤质

量较高的地方主要分布在内蒙古自治区东北部、青海省大部以及甘肃省南部等地。土壤质量低的地方集中分布于沙漠地区。北方大部分地区植被质量都偏低,较好的区域主要分布在干燥度较低且植被覆盖较高的地区,如大兴安岭和青海省南部高原山地等。荒漠化严重和极严重地区主要分布在研究区西部,以原生沙漠、戈壁和盐碱地为主。气候质量指数低的地区主要分布在新疆维吾尔自治区和内蒙古自治区的西部地区,气候质量呈西低东高态势,其中气候质量好的地区多分布在北方 6 省区南部以及大兴安岭北部,降水量高,干燥度低的地区整体表现出较好的气候状态。研究区管理质量大部分处于中等水平,其中管理质量较低部分主要为城市、矿业建设用地和人口密集区。

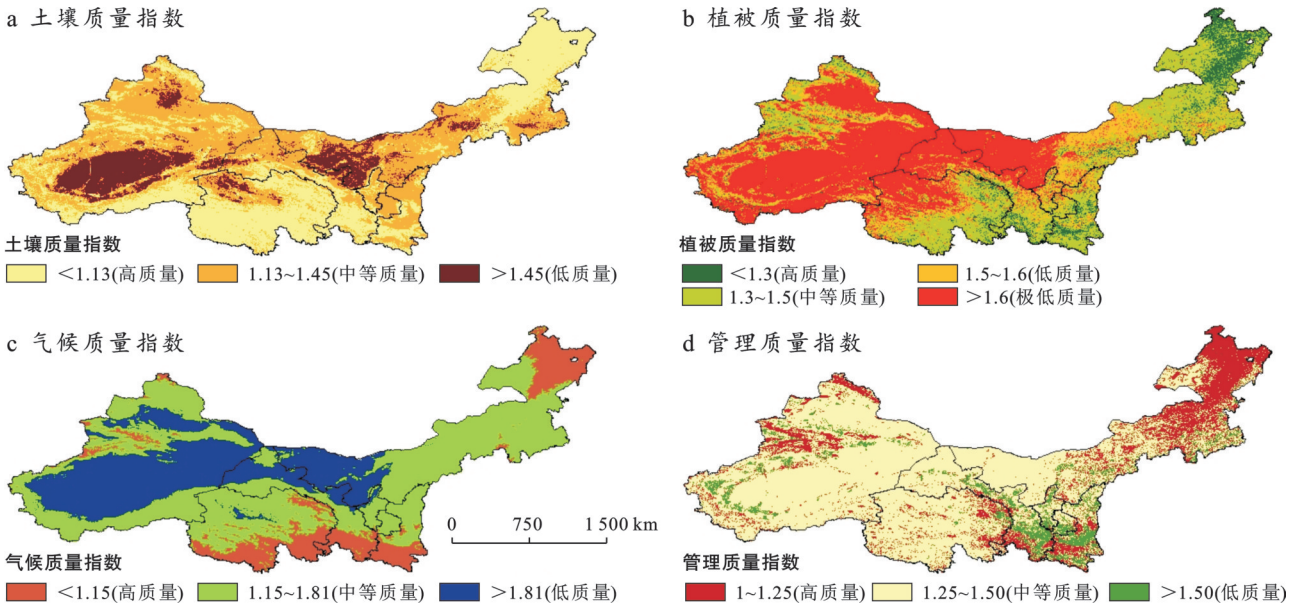
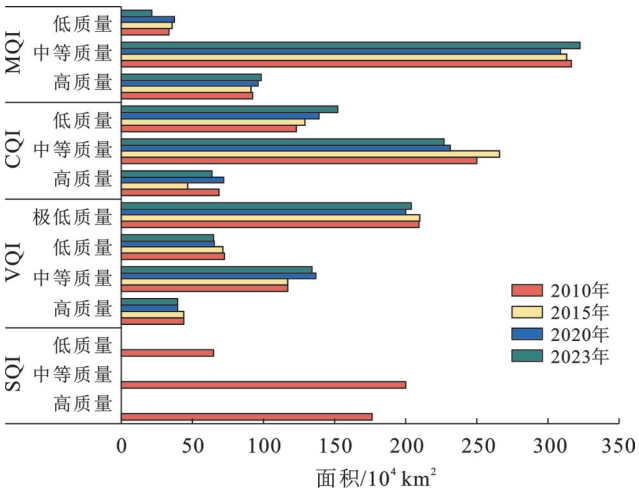


图 1　中国北方 6 省区 2023 年质量指数空间分布

Fig.1　Spatial distribution of quality indices in six northern provinces and autonomous regions of China in 2023

由图 2 可知,管理质量以中等水平为主,相对于 2010 和 2023 年高质量区域面积增加,低质量区域面积减少,反映生态治理和管理措施在一定程度上取得积极成效。



注:SQI 为土壤质量指数;VQI 为植被质量指数;CQI 为气候质量指数;MQI 为管理质量指数。

图 2　研究区 2010—2023 年每个质量指数不同类别面积

Fig.2　Areas of different categories of each quality index in study area from 2010 to 2023

气候质量以中等水平为主,相对于 2010 年,高质量区域面积波动明显,2015 年显著下降,2020 年达到峰值,2023 年略有回落,表明部分地区的气候质量在 2020 年得到显著改善。气候低质量区域面积持续增加,表明研究区内不利气候条件影响范围有所扩大。由于北方 6 省区气候干旱,沙漠、盐碱地和戈壁分布广泛,植被质量一直偏低,相对于 2010,2015,2020 和 2023 年植被低质量区域面积显著减少,中等质量面积显著增加,这可能与中国实施的一系列退耕还林,防沙固沙措施紧密相关。

2.2　荒漠化敏感性分析

从图 3 可以看出,研究区荒漠化敏感性空间分布呈明显的地带性特征。荒漠化极敏感区主要位于沙漠化地区,如塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠等地。高敏感区主要分布在沙漠边缘,包括戈壁、盐碱地等。这些区域的土壤结构较为松散,水分蒸发较快,易受气候变化和人为活动的影响;中低敏感区则主要分布在研究区生态环境相对较为稳定的盆地、高原和干旱草原等区域,但由于气候变化和人类活动的影响,依然存在一定的荒漠化风险;不敏感区域主要分布在平原、山地和湿润区域,如大兴安岭与东北平原交界处、

青海省东南部的阿尼玛卿山等地区，这些地方植被覆盖较好，土壤水分充足，生态环境相对稳定。

由表 4 可知，相对于 2010 年、2015—2020 年极敏感类型覆盖面积都有所增加，但到 2023 年覆盖面积开始减少，与 2010 年相比，2023 年极敏感类型面积总体增加了约 3.38%，覆盖面积均值 7.38×10^5 km^2；高敏感类型面积增加 1.42%。覆盖面积均值 1.63×10^6 km^2。中敏感类型面积减少 26.21%，覆盖面积均值 5.46×10^5 km^2。低敏感类型面积增加了 1.70%，覆盖面积均值 1.11×10^6 km^2。不敏感类型面积比例变化幅度较小，整体保持在 8.00% 左右，覆盖面积均值 3.73×10^5 km^2。中敏感类型面积持续减少，低敏感类型增加，局部区域荒漠化风险得到一定程度缓解，但高敏感和极敏感类型面积比例仍处于较高水平，这表明荒漠化防治成效具有阶段性和空间差异性，整体荒漠化风险仍不容忽视。

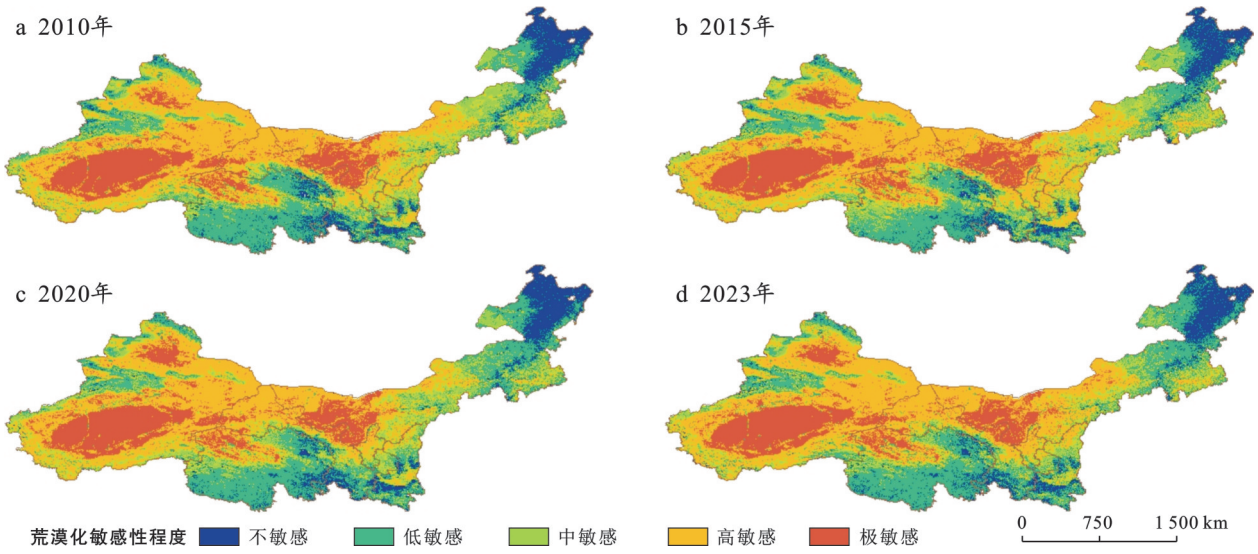


图 3 北方 6 省区 2010—2023 年荒漠化敏感性程度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of desertification sensitivity levels in six northern provinces and autonomous regions of China from 2010 to 2023

表 4 北方 6 省区 2010—2023 年土地荒漠化敏感性程度面积

Table 4 Areas of different land desertification sensitivity levels in six northern provinces and autonomous regions of China from 2010 to 2023

敏感性等级	2010年		2015年		2020年		2023年	
	面积/10^4 km^2	比例/%	面积/10^4 km^2	比例/%	面积/10^4 km^2	比例/%	面积/10^4 km^2	比例/%
极敏感	71.97	16.4	73.68	16.7	75.28	17.1	74.40	16.88
高敏感	160.58	36.5	168.19	38.2	157.94	35.8	167.20	37.92
中敏感	58.65	13.3	59.59	13.5	55.02	12.5	43.28	9.82
低敏感	110.77	25.2	104.17	23.7	113.68	25.8	118.60	26.90
不敏感	38.29	8.7	34.62	7.9	38.89	8.8	37.39	8.48
合 计	440.27	100	440.25	100	440.81	100	440.86	100

从图 4 可知各阶段单一荒漠化敏感类型的动态度。极敏感类型在 2010—2015 年和 2015—2020 年为+0.46 和+0.43，反映其在 2010—2020 年呈增加趋势，且 $K_{E2010—2015}>K_{E2015—2020}$，表明极敏感类型面积增加速度变缓。2020—2023 年为−0.4，表明极敏感类型面积开始减少；高敏感类型和不敏感类型动态度呈波动形式，2010—2015 年和 2020—2023 年为正，2015—2020 年为负。中敏感类型在 2010—2015 年为+0.31，2015—2020 为−1.66，2020—2023 年为−9.03，表明 2010—2015 年呈现扩张的趋势，2015—2023 年呈现缩减的趋势。而且 $|K_{M2010—2015}|<|K_{M2015—2020}|<|K_{M2020—2023}|$，说明中敏感类型面积减少速率比面积增加的速率更大；低敏感 2010—2015 年动态度为−2.27，面积减少，2015—2020 年和 2020—2023 年分别为+1.67 和+1.38，且减少速率小于增加速率，低敏感类型面积增加。总体而言，从 2010—2023 年荒漠化敏感性整体态势降低。极敏感区域由增加转为减少；高敏感区域波动明显，中敏感区总体下降，区域面积显著减少；低敏感区域持续扩展，不敏感区域变化幅度较小。

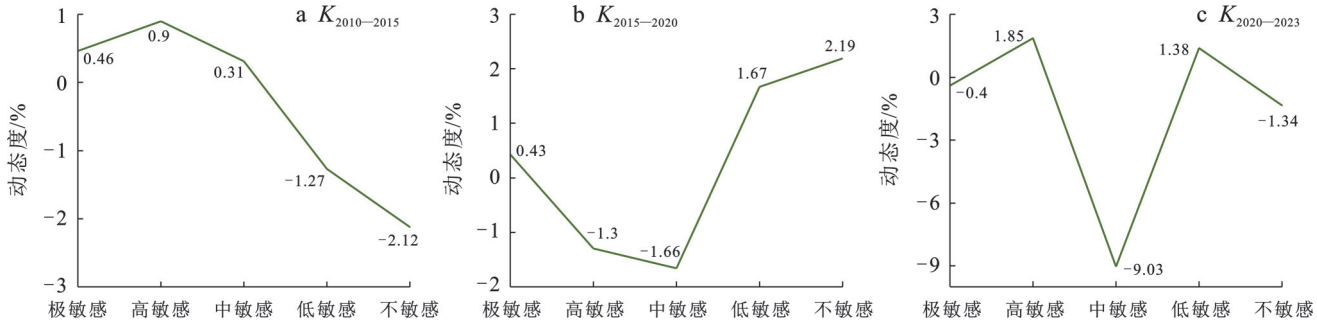


图 4　研究区荒漠化敏感性单一类型动态度变化

Fig.4　Dynamic degree of each single desertification sensitivity type in study area

2.3　荒漠化敏感性空间变化特征

2.3.1　荒漠化敏感性单一类型转变特征

土地荒漠化敏感性转换类型空间分布与面积如图 5—6 所示,在极敏感、高敏感、低敏感、不敏感类型中,稳定型占据主导地位,分别占 46.25%,39.94%,61.34% 和 80.54%。中敏感类型以波动为主,占比 38.5%。在 2010—2023 年,极敏感类型转出面积比例为 18.33% 大于转入面积 16.63%;高敏感类型转出面积比例为 16.22%,小于转入面积 20.91%,相互转化区域大多分布在沙漠边缘地带,戈壁。中敏感、低敏感和不敏感类型转出面积比例分别占 38.5%,14.91% 和 6.03%,转入面积分别占 18.89%,13.46% 和 8.18%,说明更多的中敏感类型区域向高敏感和低敏感类型转换,低敏感类型区域转化为不敏感类型。中敏感类型的波动性比例最高为 38.5%,在未来荒漠化管理中,还应加强中敏感波动类型区域的监督防护,减少中敏感类型向高敏感类型转换,持续增加向低敏感类型和不敏感类型区域的转入。

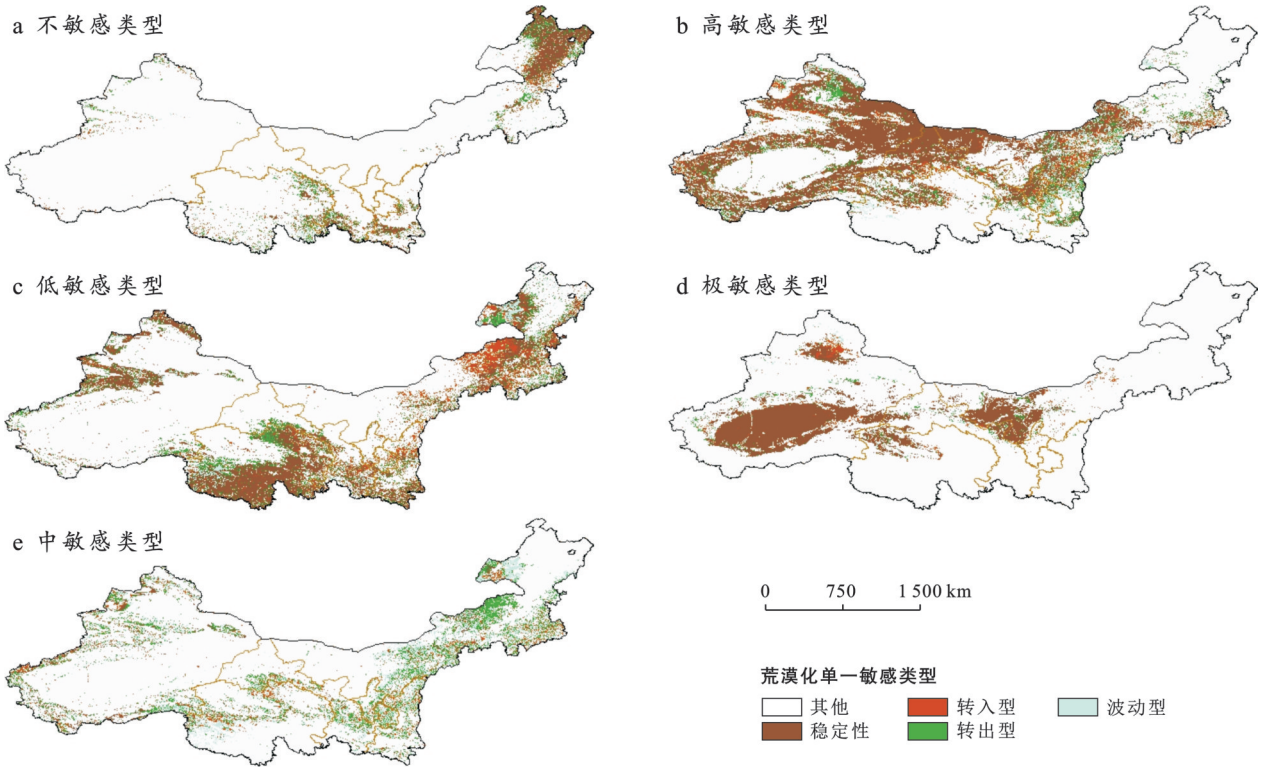


图 5　研究区 2010—2023 年荒漠化单一敏感类型空间分布

Fig.5　Spatial distribution of single desertification sensitivity types in study area from 2010 to 2023

2.3.2　荒漠化敏感性的时空演变类型

通过试验进一步明确不同荒漠化类型之间的转换关系如图 7 和表 5 所示,在 2010—2023 年内,北方 6 省区土地荒漠化敏感性发生了显著变化,变化面积达 1.36×10^6 km^2,占研究区总面积的 30.94%。极敏感、高敏感和低敏感类型区域面积都有所增加,而中敏感和不敏感类型减少。转换类型面积最大的是中敏感类型转换为低敏感类型,为 1.78×10^5 km^2。高敏感、中敏感和低敏感类型之间的转换面积比例最大,且转换类型主要发生在相邻敏感类型之间,变化

超过两类的面积比例非常小。因此，根据表3将土地荒漠化敏感性相邻敏感类型之间的转换合并为17类，其空间分布如图8所示，相邻敏感类型转变类别分布如图9所示。从所占面积来看，敏感性不变的地区占67.87%；敏感性降低的区域占9.35%，敏感性上升的区域占11.08%。极敏感类型与高敏感类型之间以高敏感转化为极敏感类型为主，比例3.23%。高敏感与中敏感类型之间以中敏感转化为高敏感类型为主，比例10.1%。中敏感与低敏感类型之间以中敏感转化为低敏感类型为主，比例14.5%。低敏感与不敏感类型之间以不敏感转化为低敏感类型为主，比例8.9%。从空间分布上，转换区域主要发生在各敏感类型地区交界处。因此，应保护不敏感类型区域，对改善区域继续治理，对退化区域进行控制，加强对波动类型和相邻敏感类型交界处的管理。

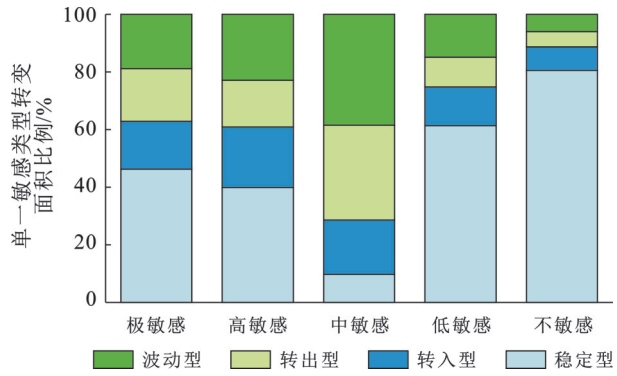


图6 研究区2010—2023年荒漠化单敏感类型转变面积比例

Fig.6 Proportions of transition areas of single desertification sensitivity types in study area from 2010 to 2023

2.4 北方6省区荒漠化敏感性驱动因子分析

引入地理探测器，定量分析各指标因子对北方6省区不同年份荒漠化敏感性的驱动程度。结果如表6所示，2010—2023年对北方6省区土地荒漠化敏感性空间分异影响最大的单一因素是干燥度，其他主导因素分别是植被覆盖、降水量和土地利用类型。其中干燥度、降水量和抗旱性的影响力持续上升，植被覆盖对2010—2020年荒漠化敏感性变化的影响力显著上升，但在2023年影响力显著下降。人口密度的q值极小，可能与人口密度较低有关。其他因子在4个年份中保持较为稳定的影响。

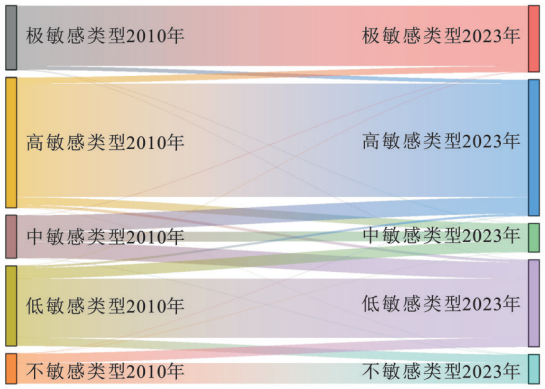


图7 研究区2010—2023年荒漠化敏感性转移桑基图

Fig.7 Sankey diagram of desertification sensitivity transitions in study area from 2010 to 2023

表5 研究区2010—2023年荒漠化敏感性转移矩阵

Table 5 Transition matrix of desertification sensitivity in study area from 2010 to 2023 单位：10^4 km^2

项 目	极敏感类型	高敏感类型	中敏感类型	低敏感类型	不敏感类型
极敏感类型	66.03	4.17	0.04	0.01	
高敏感类型	6.66	124.22	8.60	2.93	0.03
中敏感类型	0.01	18.01	10.76	17.82	0.08
低敏感类型	0.00	2.34	11.98	64.29	9.11
不敏感类型		0.02	0.04	10.35	22.70

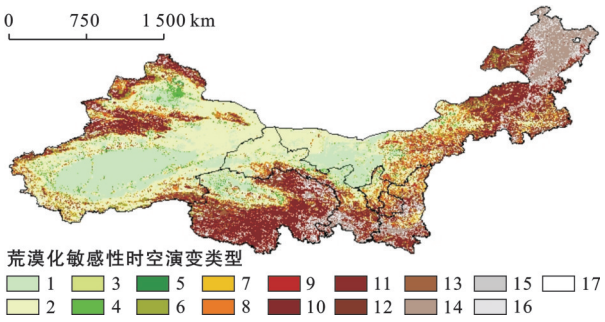


图8 研究区2010—2023年荒漠化敏感性时空演变类型

Fig.8 Spatiotemporal evolution types of desertification sensitivity in study area from 2010 to 2023

表6 研究区不同驱动因子对荒漠化敏感性的解释程度

Table 6 Explanatory power of different driving factors for desertification sensitivity in study area

年份	不同驱动因子q值												
	LU	AI	PET	PRE	DR	EP	FR	VC	S	BD	ST	SD	PD
2010	0.611	0.693	0.566	0.624	0.577	0.576	0.455	0.634	0.223	0.507	0.422	0.347	0.001
2015	0.631	0.686	0.575	0.591	0.584	0.583	0.470	0.613	0.214	0.491	0.421	0.345	0.002
2020	0.637	0.724	0.577	0.640	0.594	0.592	0.469	0.650	0.194	0.463	0.419	0.344	0.001
2023	0.637	0.727	0.546	0.663	0.607	0.603	0.474	0.608	0.199	0.468	0.426	0.357	0.001

注：AI为干燥度；LU为土地利用类型；PRE为降水量；PET为潜在蒸散量；DR为抗旱性；EP为侵蚀防护；FR为火灾风险；VC为植被覆盖；ST为土壤质地；S为坡度；BD为土壤容重；PD为人口密度。

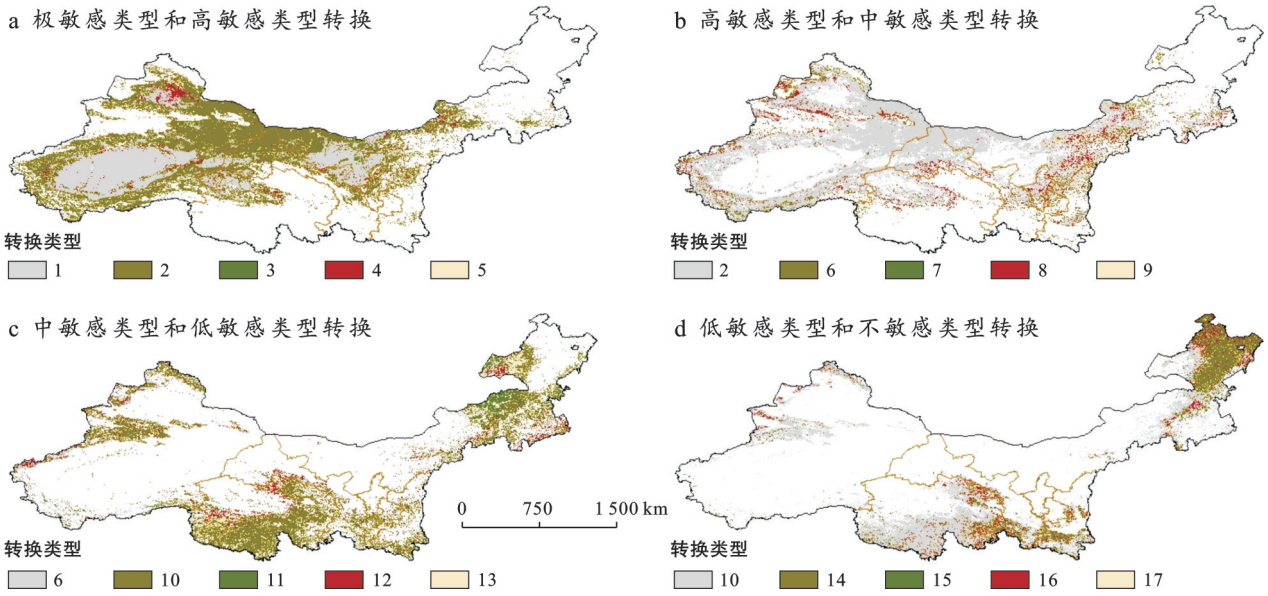


图 9　北方 6 省区 2010—2023 年荒漠化敏感性相邻类型转换空间分布

Fig.9　Spatial distribution of adjacent-type conversions of desertification sensitivity in six northern provinces and autonomous regions of China from 2010 to 2023

基于地理探测器的交互因素探测,分析不同因素之间交互作用对 2010—2023 年北方 6 省区土地荒漠化敏感性空间分异的解释力(如图 10 所示)。各因子之间都存在显著交互作用,具体表现为双因子增强型占 84.6%,非线性增强型占 15.4%。其中 2010—2023 年北方 6 省区土地荒漠化敏感性的空间分异性受干燥度∩土地利用的交互作用影响最为显著,2023 年 q 值最大为 0.87;其次是土地利用∩潜在蒸散量的交互作用影响。由此可知,土地荒漠化敏感性空间变化不仅是单一驱动因子作用的结果,还受到不同因子间交互作用的共同驱动。因子间的耦合作用对荒漠化敏感性空间异质性的影响更为显著。

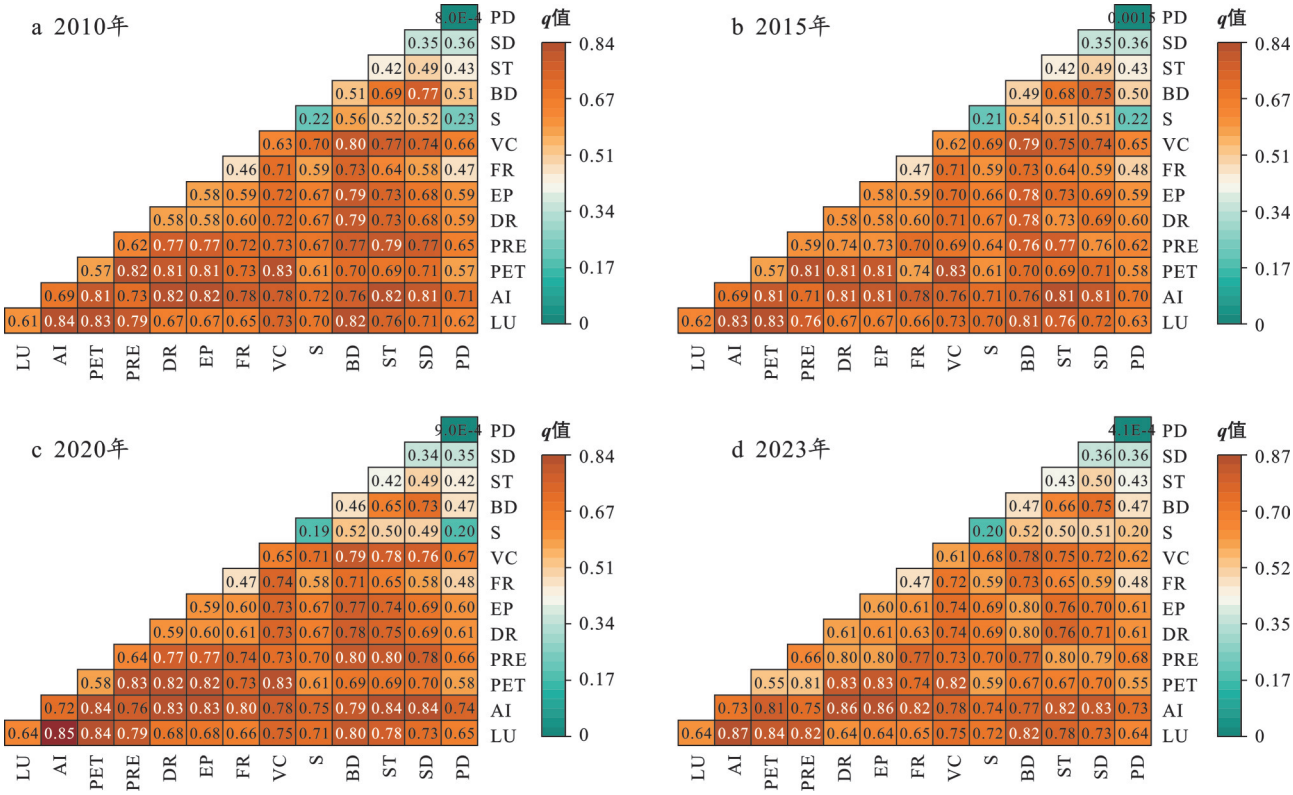


图 10　研究区不同年份因子交互探测结果

Fig.10　Factor interaction detection results for different years in study area

3 讨 论

与已有研究[20,25]对比分析表明，本文对荒漠化敏感性空间分布特征的判断具有一致性，各敏感类型的空间分布格局相似。其中，极敏感和高敏感类型主要分布在沙漠及其周边地区；不敏感类型集中于气候条件良好、植被覆盖度高的平原和山地区域，相互转化区域多位于沙漠边缘及戈壁等地带，也表明荒漠化高风险区通常位于现有沙漠的外围[29]，对其重点监管可有效防止荒漠化区域扩张。此外，2010—2023年北方6省区荒漠化敏感性整体下降，这与已有研究[30-31]揭示的中国北方荒漠化从2010年大部分地区进入整体缓解阶段趋势保持一致。荒漠化极敏感区域的面积增长趋势减缓，与北方4大沙地近30 a来沙漠化扩张比例逐渐减小[32]、科尔沁沙地“治理速度＞沙化速度”[33]，浑善达克沙地土地沙漠化减缓等[34]模式等形成空间呼应。这表明研究结果具有一定的可靠性。

随着国家政策推进和生态恢复项目实施，北方6省区荒漠化治理取得一定成效。虽然北方6省区在2010—2023年荒漠化敏感性整体态势降低，但生态系统结构还比较脆弱。高敏感类型面积波动明显，与极敏感类型的转化区域，主要分布于沙漠边缘、戈壁及生态过渡带等敏感地带。这类区域因其脆弱的生态本底与活跃的动态变化，荒漠化敏感性较高，是区域荒漠化防控的关键地段。荒漠化敏感性转换主要发生在高敏感、中敏感和低敏感类型间，类型交界处区域仍面临威胁。因此，监测预警与治理实践中，应重点关注这些转化区，将其列为优先防控与精细管理靶区，科学实施生态修复政策。另外还需加强气候因素和植被变化的监测，提前预警，及时制定防治政策。

本文在方法论创新与研究实践应用层面均体现出明确价值。首先，在指标体系构建上，本研究突破传统单因子反演荒漠化信息分析的局限，紧密结合北方6省区的生态环境特征，从管理、植被、土壤与气候质量4个维度系统选取多源指标，建立了更符合区域实际的综合评价框架。其次，在分析方法上，综合运用图谱分析法与地理探测器，不仅揭示了研究期间荒漠化敏感性的时空演变规律与空间分异特征，而且识别出关键驱动因子及其交互作用机制。在此基础上，研究针对各敏感类型区域提出针对性的防治策略，增强了成果的决策支撑能力，为区域生态安全维护与荒漠化防治提供科学依据与实践参考。

研究中尚存在一些不足，研究采用的1 km分辨率遥感数据存在一定的局限性，可能忽略了小尺度的生态变化，难以精确捕捉植被覆盖碎片化、土壤退化斑块化等小范围荒漠化特征，削弱了其空间表达精度。在以后的研究中，将进一步细化研究指标，采用更高精度的数据，深入探究不同荒漠化类型的特征分布以及对整体荒漠化的影响机制。

4 结 论

（1）4大质量指数存在明显空间差异。土壤、植被、气候和管理质量指数较高的区域多分布在青海、宁夏、甘肃省南部以及内蒙古东北部。质量指数低的区域主要集中在新疆、甘肃北部以及内蒙古西部地区。研究区整体气候干旱，植被质量始终偏低。相对于2010年，2023年植被质量和管理质量都有所好转，但气候质量持续降低。

（2）在2010—2023年期间，荒漠化敏感性整体呈现西高东低的空间分布特征，荒漠化敏感性总面积保持稳定，其中极敏感、高敏感和低敏感类型区域的面积增加，极敏感区域先增长后减少，低敏感区域面积显著增加，中敏感区域由扩张转为收缩，北方6省区荒漠化总体趋势减缓。土地荒漠化敏感性类型中，稳定型占据主导地位。中敏感类型的波动性较大，比例最高为38.5%。极敏感类型与高敏感类型相互转化区域大多分布在沙漠边缘地带等。

（3）从荒漠化敏感性的空间分异驱动机制分析发现，单个驱动因子中，干燥度始终为主导驱动因子，植被覆盖、降水量与土地利用类型共同构成核心影响体系。交互影响中，大部分表现为双因子增强型，尤以干燥度∩土地利用类型交互效应最突出，表明荒漠化敏感性空间异质性由多因素交互作用主导，而生态修复措施通过植被-土地利用协同调控可以有效遏制荒漠化扩张。

参考文献(References)

[1] Tao Wang. Progress in sandy desertification research of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(4):387-400.

[2] 赵爱斌，娄安如.青海湖湖东沙地人工植被群落特征研究[J].北京师范大学学报(自然科学版)，2023，59(4)：653-660.
Zhao Aibin, Lou Anru. Characteristics of artificial vegetation community in sandy areas on the east shore of Qinghai Lake [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023,59(4):653-660.

[3] 咎国盛，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] Huang Beiying, Duan Hanchen, Cao Wanying. Multidimensional analysis of desertification sensitivity in the Horqin sandy land based on an improved MEDALUS - ESA model and an optimal geographical detector [J]. Ecological Indicators, 2025,178:113847.

[5] 姜旭海,韩玲,白宗璠,等.内蒙古自治区沙漠化敏感性时空演变格局和趋势分析[J].生态学报,2023,43(1):364-378.
Jiang Xuhai, Han Ling, Bai Zongfan, et al. Analysis of the temporal and spatial evolution pattern and trend of desertification sensitivity in the Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):364-378.

[6] 郭泽呈,魏伟,石培基,等.中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J].地理学报,2020,75(9):1948-1965.
Guo Zecheng, Wei Wei, Shi Peiji, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(9):1948-1965.

[7] Xu Shuxing, Wang Juanle, Altansukh O, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of desertification on the Mongolian Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2024,941:173566.

[8] Li Dajing, Zhu Zaichun, Xu Erqi, et al. Desertification sensitivity and its impacts on land use change in the Tarim basin, northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2024,957:177601.

[9] Uzuner Ç, Dengiz O. Desertification risk assessment in Turkey based on environmentally sensitive areas [J]. Ecological Indicators, 2020,114:106295.

[10] Afzali S F, Khanamani A, Maskooni E K, et al. Quantitative assessment of environmental sensitivity to desertification using the modified MEDALUS model in a semiarid area [J]. Sustainability, 2021,13(14):7817.

[11] Kacem H A, Fal S, Karim M, et al. Application of fuzzy analytical hierarchy process for assessment of desertification sensitive areas in northwest of Morocco [J]. Geocarto International, 2021,36(5):563-580.

[12] 任雨,张勃,陈曦东.科尔沁沙地土地荒漠化敏感性评估[J].中国沙漠,2023,43(2):159-169.
Ren Yu, Zhang Bo, Chen Xidong. Desertification sensitivity assessment in Horqin sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(2):159-169.

[13] Chen Yang, Ma Long, Wang Xixi, et al. Spatiotemporal patterns of desertification sensitivity and influencing factors across the western Inner Mongolia Plateau, China [J]. Ecological Informatics, 2025,89:103190.

[14] Shao Wenyan, Wang Qingzheng, Guan Qingyu, et al. Environmental sensitivity assessment of land desertification in the Hexi Corridor, China [J]. Catena, 2023,220:106728.

[15] Zhang Zhihua, Huisingh D. Combating desertification in China: Monitoring, control, management and revegetation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,182:765-775.

[16] 杨吉存,郭兵.1901—2022年中国长时序降水量时空变化格局分析[J].生态学报,2025,45(12):5853-5870.
Yang Jicun, Guo Bing. Analysis of spatial and temporal variation patterns of long-term precipitation in China from 1901 to 2022 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(12):5853-5870.

[17] Liu Feng, Wu Huayong, Zhao Yuguo, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China [J]. Science Bulletin, 2022,67(3):328-340.

[18] Liu Feng, Zhang Ganlin, Song Xiaodong, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China [J]. Geoderma, 2020,361:114061.

[19] Ogbue C, Igboeli E, Ajaero C, et al. Remote sensing analysis of desert sensitive areas using MEDALUS model and GIS in the Niger River basin [J]. Ecological Indicators, 2024,158:111404.

[20] Ren Yu, Zhang Bo, Chen Xidong, et al. Analysis of spatial-temporal patterns and driving mechanisms of land desertification in China [J]. Science of the Total Environment, 2024,909:168429.

[21] Zhang Caixia, Wang Xunming, Li Jinchang, et al. Identifying the effect of climate change on desertification in northern China *via* trend analysis of potential evapotranspiration and precipitation [J]. Ecological Indicators, 2020,112:106141.

[22] Elnashar A, Zeng Hongwei, Wu Bingfang, et al. Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile basin driven by the MEDALUS-GEE framework [J]. Science of the Total Environment, 2022,815:152925.

[23] Wijitkosum S. Factor influencing land degradation sensitivity and desertification in a drought prone watershed in Thailand [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(2):217-228.

[24] Prăvălie R, Săvulescu I, Patriche C, et al. Spatial assessment of land degradation sensitive areas in southwestern Romania using modified MEDALUS method [J]. Catena, 2017,153:114-130.

[25] Ren Yu, Liu Xiangjun, Zhang Bo, et al. Sensitivity assessment of land desertification in China based on multi-source remote sensing [J]. Remote Sensing, 2023,15(10):2674.

[26] Zhang Caixia, Wang Xunming, Li Jinchang, et al. The impact of climate change on aeolian desertification in northern China: Assessment using aridity index [J]. Catena, 2021,207:105681.

[27] 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.

[28] Ji Xinyang, Yang Jinzhong, Liu Jianyu, et al. Analysis of spatial-temporal changes and driving forces of desertification in the Mu Us sandy land from 1991 to 2021 [J]. Sustainability, 2023,15(13):10399.

[29] Yue Yaojie, Geng Limin, Li Min. The impact of climate change on aeolian desertification: A case of the agro-pastoral ecotone in northern China [J]. Science of the Total Environment, 2023,859:160126.

[30] 卢建男,李玉强,赵学勇,等.半干旱区典型沙地生态环境演变特征及沙漠化防治建议[J].中国沙漠,2024,44(4):284-292.
Lu Jiannan, Li Yuqiang, Zhao Xueyong, et al. Characteristics of ecological environment changes and advices for combating desertification in typical semi-arid sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4): 284-292.

[31] Jiang Zhaolin, Ni Xiliang, Xing Minfeng. A study on spatial and temporal dynamic changes of desertification in northern China from 2000 to 2020 [J]. Remote Sensing, 2023,15(5):1368.

[32] 朱芳莹.中国北方四大沙地近30年来的沙漠化时空变化及气候影响[D].江苏 南京:南京大学,2015.
Zhu Fangying. The influence of climate change over the temporal and spatial variation of desertification of four main dune fields over the past 30 years in northern China [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University, 2015.

[33] 李玉强,王旭洋,郑成卓,等.科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议[J].中国沙漠,2024,44(4):302-314.
Li Yuqiang, Wang Xuyang, Zheng Chengzhuo, et al. The practice on prevention and control of aeolian desertification and suggestion on the ecologically sustainable restoration in the Horqin sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(4):302-314.

[34] 赵媛媛,武海岩,丁国栋,等.浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):101-111.
Zhao Yuanyuan, Wu Haiyan, Ding Guodong, et al. A review on the aeolian desertification in the Otindag sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5):101-111.

(上接第177页)

[31] 万丹,梁博,喻武,等.藏东南泥石流沉积区植被演替过程物种多样性研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(1):68-74.
Wan Dan, Liang Bo, Yu Wu, et al. Study on species diversity of vegetation with succession in debris flow deposits in southeastern Tibet [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(1):68-74.

[32] 赵勇,王鹏飞,樊巍,等.典型退化山地生态系统植被恢复阶段分类:以小浪底库区山地为例[J].中国水土保持科学(中英文),2007,5(1):77-83.
Zhao Yong, Wang Pengfei, Fan Wei, et al. Classification of typical degraded ecosystems at different stages of vegetation restoration: A case study in Xiaolangdi hilly areas, Henan Province, China [J]. Science of Soil and Water Conservation,2007,5(1):77-83.

[33] 陈志超,蔡太义,郝成元,等.伏牛山森林土壤理化性质空间分异特征[J].南方农业学报,2013,44(7):1140-1144.
Chen Zhichao, Cai Taiyi, Hao Chengyuan, et al. Spatial variation of soil physicochemical properties in Funiu Mountain [J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2013,44(7):1140-1144.

[34] 祁鹏卫,张贤.2000—2019年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(13):5427-5436.
Qi Pengwei, Zhang Xian. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5427-5436.

[35] Chen Yating, Liu Aobo, Cheng Xiao. Vegetation grows more luxuriantly in Arctic permafrost drained lake basins [J]. Global Change Biology, 2021, 27(22): 5865-5876.

[36] Li Zhouyuan, Shen Qiyu, Fan Wendi, et al. Nature-based solutions *vs*. human-induced approaches for alpine grassland ecosystem: "Climate-help" overwhelms "human act" to promote ecological restoration in the three-river-source region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing, 2024,16(7):1156.