

内蒙古黄河流域生态环境演变研究

摘要: 【目的】内蒙古黄河流域是中国重要的生态区域, 深入探究其生境质量变化及其驱动因子对区域荒漠化防治、生物多样性保护以及可持续发展具有重要意义。【方法】基于 1990—2020 年土地利用数据, 运用 GIS 技术和 InVEST 模型评估该区域的生境质量及其变化程度, 通过地理探测器分析生境质量空间异质性的驱动因子。【结果】(1) 该区域土地利用类型以草地为主, 其次占比面积较大的是未利用地, 建设用地的扩张速率最快, 其变化动态度高达 1.58%; (2) 生境退化度整体空间分布为北高南低, 退化度较高的区域主要集中在研究区北部, 未来的生境防护工作应重点关注这些区域; (3) 研究区生境质量本底较差, 呈现先降低后小幅度回升的变化趋势, 库布齐沙漠以及鄂尔多斯市东南部的生境质量等级最低, 此处多为沙地, 自然环境恶劣。生境质量发生退化的区域面积占比为 11.97%, 主要集中在研究区北部和黄河两岸附近; (4) DEM、NDVI 和土壤类型等自然因子的 q 值均大于等于 0.050, 是生境质量空间分异特征的主要驱动因子, 任意两种进行交互探测的因子对生境质量空间分异的解释力都要大于其单一因子的解释力。【结论】近 30 年内蒙古黄河流域生境质量先降低后小幅度回升, 建设用地扩张迅速, 土地沙化严重, 未来需加大对该区域的生态建设投入。

关键词: 土地利用; InVEST 模型; 生境质量; 空间自相关; 地理探测器

Abstract: 【Objective】The Yellow River Basin in Inner Mongolia is an important Ecoregion in China. It is of great significance to explore the changes of its habitat quality and its driving factors for regional desertification control, biodiversity protection and sustainable development. 【Method】Based on land use data from 1990 to 2020, GIS technology and InVEST model were used to evaluate the habitat quality and its degree of change in the region. The driving factors of spatial heterogeneity of habitat quality were analyzed through geographic detectors. 【Result】(1) The land use type in the region is mainly grassland, followed by unused land with a larger proportion. The expansion rate of construction land is the fastest, with a dynamic degree of change of up to 1.58%; (2) The overall spatial distribution of habitat degradation is high in the north and low in the south. The areas with high degradation are mainly concentrated in the northern part of the research area, and future habitat protection work should focus on these areas; (3) The background of the habitat quality in the study area is poor, showing a change trend of first decreasing and then slightly rising. The Kubuqi Desert and the southeast of Ordos City City have the lowest habitat quality grade, where most of them are sandy lands, and the natural environment is poor. The area of degraded habitat quality accounts for 11.97%, mainly concentrated in the northern part of the study area and near the banks of the Yellow River; (4) The q value of natural factors such as DEM, NDVI and Soil type is greater than or equal to 0.050, which is the main driving factor for the spatial differentiation of habitat quality. Any two factors that conduct interactive detection have greater explanatory power for the spatial differentiation of habitat quality than their single factor. 【Conclusion】In the past 30 years, the habitat quality of the Yellow River Basin in Inner Mongolia has first decreased and then slightly rebounded. The expansion of construction land is rapid, and land desertification is severe. In the future, it is necessary to increase investment in ecological construction in the region.

Key Words: Land use; InVEST model; Habitat quality; Spatial autocorrelation;

Geographic detectors

1 引言

生态环境质量（以下简称“生境质量”）是指在一定的时间和空间范围内生态系统能够提供给物种个体、种群、群落以及人类持续生存和繁殖所需条件的能力(Hall et al.,1997)，是保持区域生物多样性和改善生态环境的关键所在，可为生态系统服务水平的评价提供重要依据，目前已成为生物学、生态学、环境科学等领域的重要研究课题之一。区域生境质量的优劣往往受到人类活动的干扰，人类活动是导致生境质量退化和丧失的最主要因子(Terrado et al.,2016; Song et al.,2020)。随着人口增长、城市化进程的加快以及人类活动的不断扩大，各种形式的生境破坏和环境污染不断加剧，生境质量的研究变得愈加重要。土地利用是最重要的人类活动方式之一，也是影响生境质量的最重要因素之一(Newbold et al.,2015)，它造成生态系统内部结构、过程和功能发生巨大变化(雷金睿等,2020)，并最终影响生境斑块之间的物质循环和能量流动(Jaroslav et al.,2019; Yan et al.,2014)，因此通过土地利用变化来探索区域生境质量状况并探究其驱动因子，对合理利用土地资源和保护生态环境意义重大(刘智方等,2017)。

近年来，随着 RS、GIS 等技术的迅速发展，对于土地利用变化与生境质量模型化、空间化、精细化的研究逐渐成为热点(Scolozzi et al.,2011)，众多多尺度生境质量定量评估模型应运而生，其中最常用的有 InVEST 模型(Erik et al.,2010)、IDRISI 生物多样性模块(Limin et al.,2019)、HIS 生境适宜性模型(王志强等,2009)、MaxEnt 模型(Chao et al.,2018)等。其中 InVEST 模型由斯坦福大学、明尼苏达大学、自然保护协会和野生动物基金会联合开发(Terrado et al.,2016)，与其他模型相比，该模型具有理论发展成熟、参数少、数据获取容易、分析能力强等优点(陈妍等,2016)，其生境质量模块可以快速评估不同威胁源与土地利用变化对生态环境的影响，被广泛应用于生境质量的评估(Kunwar et al.,2020; 郝月等,2019)。例如有研究通过 InVEST 模型对皮科岛的生境保护进行了空间分析(Miguel et al.,2018)；还有学者利用 InVEST 模型评价了意大利的生境质量，确定了区域保护区并提出管理措施(Sallustio et al.,2017)。在国内，巩杰等运用 InVEST 模型分析了甘肃白龙江流域生境质量时空分异特征(巩杰等,2018; 田佳博等,2022)，研究结果为流域生境保育及生态建设提供了参考依据；尚俊等(2021)基于 InVEST 模型研究了鄱阳湖区的生境质量时空演化，并且运用标准差椭圆法和像元二分法分析其变迁特征，结果表明水域变迁受围湖造田和城镇扩张共同影响，仅从土地利用变化这一因素解释生境质量格局演变存在局限性；雷金睿等(2022)综合应用 InVEST 模型和空间统计分析等方法分析了海南岛三大流域生境质量的时空演变，研究表明生境质量在空间分布上具有较强的自相关性和显著的聚集性。奥勇等(2022)探究了黄河流域土地生态质量的空间分异规律；包玉斌等(2015)对陕西省黄河湿地保护区生境质量进行了评估。

黄河全长 5464km，是我国仅次于长江的第二大河，其起源于青藏高原，流经 9 个省区，是华北平原、青藏高原和黄土高原的生态连接纽带(齐松等,2022)。黄河流域在涵养水源、防风固沙、生物多样性保护上发挥了重要的生态作用，在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位(杨洁等,2021)。内蒙古黄河流域作为黄河流域的重要组成部分，是内蒙古重要的生态保护和环境治理地区、重要经济带和经济主要增长极。由于受自然因素和人为因素的影响，内蒙古黄河流域正在面临土地盐碱化、荒漠化、水土流失、农业污染等问题，大面积的荒漠植被衰败减少，草地退化，对生物多样性造成了严重威胁，给生境质量带来了巨大的压力(彭苏萍等,2020)。本研究基于以 RS 技术为支撑的土地利用数据和 InVEST 模型评估内蒙

古黄河流域 1990-2020 年生境质量退化度和生境质量,同时采用地理探测器探究生境质量空间分异特征的主要驱动力,研究结果可为内蒙古黄河流域土地资源合理利用、生态环境保护和经济发展提供借鉴和参考。

2 研究区概况

内蒙古黄河流域(康健等, 2022)地处黄河中上游,位于内蒙古自治区中西部(图 1),介于 $106^{\circ}10'-112^{\circ}50'E$ 、 $37^{\circ}35'-41^{\circ}50'N$ 之间(赵水霞等,2016)。流域面积为 15 万平方公里,占黄河流域总面积的 1/5,涉及内蒙古呼和浩特市、鄂尔多斯市、乌海市、乌兰察布市、巴彦淖尔市、包头市和阿拉善盟等 7 个盟市(李明等,2022),是国家呼包银榆经济区、内蒙古沿黄沿线经济带、呼包鄂经济区(金三角)、乌海周边经济区(小三角)的所在地。气候类型以温带大陆性气候为主,年均降雨量 $120\sim 450\text{ mm}$,拥有众多支流和湖泊,包括乌兰木伦河、大黑河、红河以及乌梁素海等,是河套平原和土默川平原农牧业的主要灌溉水源,也是沿河各市工业用水和饮用水的主要来源(叶振维等,2014)。流域景观地貌自西向东呈荒漠、荒漠草原的过渡特征(冯琰玮等,2022)。

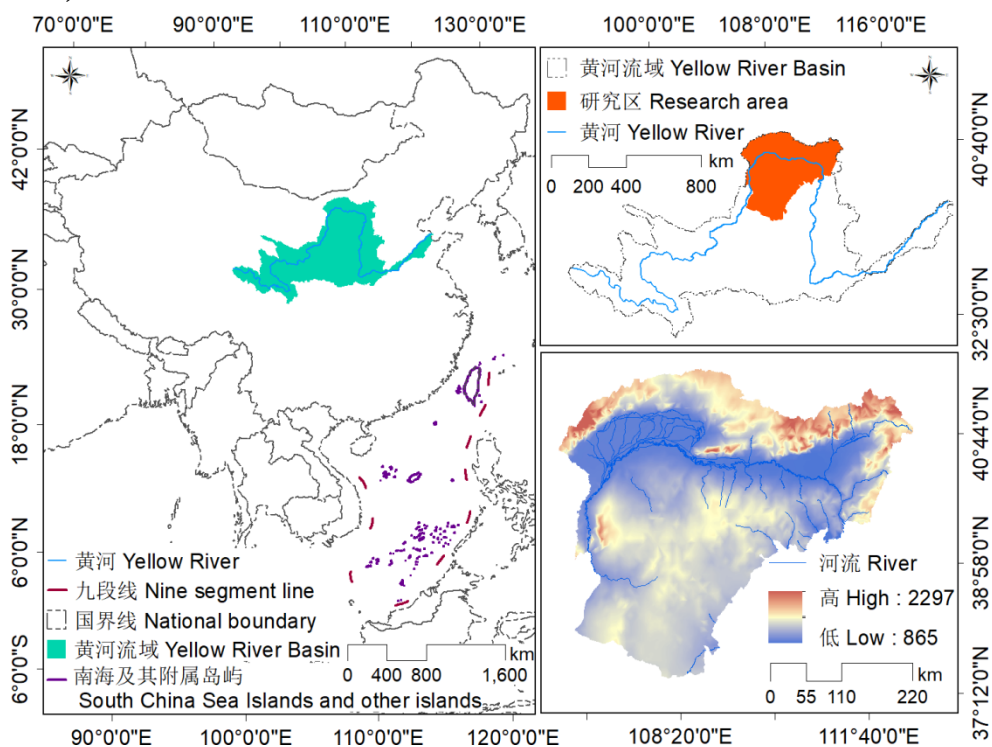


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location Map of the Study Area

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源及预处理

选取 1990、2000、2010 和 2020 年的土地利用数据,其来源于中国科学院资源环境科学与数据中心提供的分辨率为 30m 的栅格数据集,根据前人研究和研究区当地状况建立土地利用二级分类体系(表 1); 2020 年月平均气温和月平均降水数据来源于欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布的 ERA5-Land 数据集,基于月平均气温和降水栅格数据,利用 ArcGIS 栅格计算工具计算 12 个月平均气温的平均值得到了

2020 年的平均气温和降水栅格数据，空间分辨率为 1km；归一化植被指数数据来源于 MOD13A3 数据集的 2020 年逐月的 NDVI 栅格数据，基于 MOD13A3 数据集逐月的 NDVI 栅格数据，再利用最大合成法得到了 2020 年的 NDVI 栅格数据，空间分辨率为 1km；土壤类型数据源于中国科学院南京土壤研究所高以新、李锦等编制的 1:400 万中国土壤图（2000），可从国家地球系统科学数据中心获取。

表 1 土地利用数据分类系统 (张景华等, 2011)

Table.1 Land use data classification system

一级地类 First land type	二级地类 Secondary land type
耕地	水田、旱地
Cultivated land	Paddy fields、Dry land
林地	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
Woodland	Forest land、Shrubbery、Open woodland、Other woodland
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
Grassland	High coverage grassland、Medium coverage grassland、Low coverage grassland
水域	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩地
Waters	Rivers、Lakes、Reservoirs、Permanent glaciers snow、Beaches
建设用地	城镇用地、农村居民点用地、工矿用地、光伏发电用地
Construction land	Urban land、Rural residential land、Industrial and mining land、Photovoltaic power generation land
未利用地	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩石质地
Unutilized land	Sandy land、Gobi、Saline-alkali Land、Marsh land、Bare land、Bare rock texture

3.2 研究方法

3.2.1 生境质量模型

本文借助 InVEST3.12 中的 Habitat Quality 模块分析内蒙古黄河流域 1990、2000、2010 和 2020 年的生境质量空间分布及其变化。该模型以土地利用数据为基础，依据研究区实际情况选取适当威胁因子并确定不同威胁因子的影响距离和空间权重，综合考虑各类生境的生境适宜度以及对不同威胁因子的敏感程度，从而根据生境对不同威胁因子的响应程度计算得到生境退化度和生境质量。其中，生境对威胁因子的敏感程度越高，则反映出来的生境退化度越高，生境质量降低的可能性越大。模型处理结果以数值（0-1）来反应生境质量的优劣，数值越大，生境质量越优。模型运行前，所有的土地利用数据以及威胁源数据都需要进行栅格化处理(陈妍等,2016)。公式如下(Kim et al.,2015):

$$Q_{xj}=H_j[1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}] \tag{1)}$$

Q_{xj} 为栅格 x 在土地利用类型 j 中的生境质量值， H_j 是土地利用类型 j 的生境适宜度， D_{xj} 表示斑块 x 在

土地利用类型 j 中的生境退化度指数, k 为半饱和常数, z 通常取值为 2.5。生境退化度 D_{xj} 主要受威胁因子个数、影响范围、影响权重、生境对不同威胁的敏感程度这几个因素的影响, 其计算过程如下所示:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad 2)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r \max}} \right) \quad \text{if } linear \quad 3)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{r \max}} \right) d_{xy} \right] \quad \text{if } exponential \quad 4)$$

式(2)(3)(4)中, R 为胁迫因子数量, Y_r 为胁迫因子的栅格单元总数, ω_r 是威胁源影响权重, r_y 为栅格单元上的胁迫因子个数, β_x 为栅格 x 的可达性水平, 即法律保护度水平, 如严格保护区, 则取值 1; 如为收获型保护取值 0; 中间保护水平的可赋值 0-1 之间; S_{jr} 表示土地利用类型 j 对威胁因子 r 的敏感程度; i_{rxy} 为胁迫因子的影响范围, 衰退类型 (线性或指数类型) 不同选取的公式也不同, 据实际类型选取合适的公式。

根据 InVEST 模型中生境质量模块的使用手册, 需要输入到模型中的数据主要有各期土地利用数据、威胁因子参数表(表 2)、生境适宜度表(表 3), 表中参数来源于前人文献(杨洁等,2021; 齐松等,2022)和模型推荐的参考值。

3.2.2 土地利用变化动态度

土地利用变化动态度 (K) 通常用来反应区域一定时间范围内某种土地利用类型面积的变化速率, 在一定程度上可以反映土地资源扩张或萎缩程度(Xiulan et al.,1999)。本文选取单一土地利用变化动态度研究内蒙古黄河流域土地资源的扩张或萎缩程度, 其计算过程为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad 5)$$

K 为研究时段内某土地利用类型的变化动态度; U_a 和 U_b 为研究开始时和结束时的某土地利用类型面积 (km^2); T 为研究时段, 单位为年。其中, K 的绝对值越小, 说明地类的变化速率越小; K 如果为正值, 则表示某土地利用类型在研究时段内处于扩张状态。

3.2.3 空间统计分析

空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关, 可用来分析地理事物或现象的某一属性在不同空间位置上的相关性, 是对邻近单元位置属性值相似程度的定量描述(奥勇等,2022)。本文以全局空间自相关

Moran I 指数描述生境质量整体上的相关性和集聚程度,以局部空间自相关 *LISA* 指数探究生境质量空间分布的聚类与分异特征及其空间位置。相关公式如下:

$$Moran\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_i \sum_j w_{ij}} \quad 6)$$

n 为研究区的空间网格单元数量; x_i 和 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的观测值; $\bar{x}$ 为所有单元观测值的平均值; w_{ij} 为空间单元 i 和 j 的权重矩阵。*Moran I* 的值介于-1 到 1 中间,值等于 0,表示结果不相关;值大于 0,表示结果呈正相关,反之亦然。其绝对值越大,则相关性越强(Getis et al.,1992)。

3.2.4 地理探测器

地理探测器可用来探测某一地理现象或事物的空间分异性并揭示其背后驱动力。其核心思想是:如果某个自变量的变化对某个因变量有一定的影响,那么自变量和因变量在空间上的分布应该具有一定的相似性(Wang et al.,2012; Wang et al.,2010)。它包括 4 部分:风险探测、生态探测、因子探测和交互作用探测(王劲峰等,2017),本文主要通过因子探测和交互作用探测度量生境质量空间分布特性的驱动因子,模型如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad 7)$$

式中: q 是驱动因子对某一地理现象造成影响而发生变化的解释力; h 是因子的分类或分区数; L 是能够产生影响的因子的样本数; N_h 和 N 分别是 h 类和所有的单元数, σ_h^2 和 σ^2 是 h 和整个区域的方差。 q 值为 0-1, 且 q 值越大, 生境质量的空间异质性越强。

表 2 生境威胁因子的影响范围及其权重

Table.2 The impact range and weight of habitat threat factors

威胁源 Threat source	影响范围 Influence range (km)	权重 Weight
工矿用地 Industrial and mining land	9	0.9
旱地 Dry land	5	0.6
城镇用地 Urban land	10	1
农村居民点 Rural residential area	7	0.7

表 3 生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度

Table.3 Habitat suitability and its relative sensitivity to different threat sources

土地利用类型 Land use type	生境适宜度 Habitat suitability	旱地 Dry land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlement	工矿用地 Industrial and mining land
水田 Paddy fields	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5
旱地 Dry land	0.3	0	0.5	0.4	0.5
有林地 Forest land	1	0.8	0.9	0.8	0.8
灌木林地 Shrubbery	0.9	0.4	0.8	0.7	0.7
疏林地 Open woodland	0.8	0.85	0.9	0.8	0.8
其他林地 Other woodland	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8
高覆盖度草地 High coverage grassland	0.9	0.4	0.6	0.5	0.6
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	0.8	0.45	0.65	0.55	0.65
低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.7	0.5	0.7	0.6	0.7
河渠 Rivers	0.9	0.65	0.85	0.75	0.8
湖泊 Lakes	1	0.7	0.9	0.8	0.7
水库坑塘 Reservoirs	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7
永久性冰川雪地 Permanent glaciers snow	1	0.7	0.85	0.75	0.7
滩涂 Mudflat	0.6	0.75	0.95	0.8	0.7
滩地 Beach land	0.6	0.75	0.95	0.8	0.7
盐碱地 Saline-alkali Land	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3
沼泽地 Marsh land	0.6	0.7	0.8	0.75	0.6

注：城镇用地、农村居民点、工矿用地、光伏发电用地、沙地、戈壁、裸土地、裸岩石质地和其他为利用地的生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度为 0，因此未列出。The habitat suitability and relative sensitivity to different threat sources of urban land, rural residential areas, industrial and mining land, photovoltaic power generation land, sandy land, Gobi land, bare land, bare rock land, and other unused land are 0, so they are not listed.

4 结果与分析

4.1 土地利用变化分析

4.1.1 土地利用演变时空特征

1990-2020 年内蒙古黄河流域各土地利用类型数量和面积占比差异较大，按面积大小依次是草地、未利用地、耕地、林地、建设用地、水域，并且土地利用空间分布呈现出一定的分异特征（图 2）。草地数量最多、面积最大、分布最广，几乎覆盖整个研究区域（图 3），是该区域的主要土地利用类型。各年份草地面积占总面积比例分别为 54.70%、54.98%、52.86%、52.53%，其中 2000 年草地的面积达到最大，有 82317.98km²；未利用地主要分布在黄河周边和鄂尔多斯南部，未利用地是该研究区面积第二的土地利用类型，面积占总面积比例为 21%左右，面积最大时为 32666.24km²；耕地分布较为集中，主要分布于黄河两岸，各年份耕地面积占总面积比例分别为 14.59%、14.04%、15.66%、15.85%，2000 年耕地面积最小，占地 21018.41km²，2020 年耕地面积达到最大，占地 23735.20km²；林地、水域、建设用地三者的占地面积相

对较小, 共约 14182km², 是研究区用地面积的 10%左右, 其中建设用地的分布比较零散, 林地夹杂在耕地和草地之间, 呈带状分布于研究区域的东北角。土地利用类型在空间上的不同组合和数量上的差异在一定程度上影响了内蒙古黄河流域生态系统服务功能的结构和水平。

各土地利用类型均发生了不同程度的变化(图 4)。对各时段土地利用类型的变化量和变化动态度进行了分析, 具体而言, 30 年间耕地、林地、建设用地的面积呈增加趋势, 分别增加了 1888.52km²、291.94km²、1831.84km², 变化动态度分别为 0.29%、0.15%、1.58%, 这表明耕地和建设用地增加的相对较多, 而且建设用地的扩张速率最快。从各时段的变化来看, 耕地的面积是先减小后增大, 1990-2000 年耕地萎缩, 减少了 828.28km², 2000-2010 年耕地发生了扩张, 共扩张了 2423.81km², 且扩张速率非常快, 变化动态度为 1.15%。此外, 2010-2020 年建设用地的增长速率最快, 变化动态度为 3.11%, 增长了 1350.75km²。30 年间水域的面积持续减少, 草地、未利用地的占地面积虽然各有增减, 但总体上是处于退化状态, 三者变化动态度分别为-0.22%、-0.13%、-0.05%。具体而言, 水域在 2000-2010 年这十年的变化最大, 面积减少了 208.01km², 占总减少面积(248.01km²)的 84%; 草地在 1990-2000 年间略微扩张, 2000-2010 年草地变化动态度为-0.39%, 占地面积减少了 3173.62km², 该十年的变化速率最快, 萎缩程度最大; 未利用地较为特殊, 前 20 年未利用地的面积都在扩张, 面积增加了 866.28km², 但从 2010 年开始, 仅用十年时间减少了 1389.19km², 而且动态度为-0.43%, 变化速率较快。

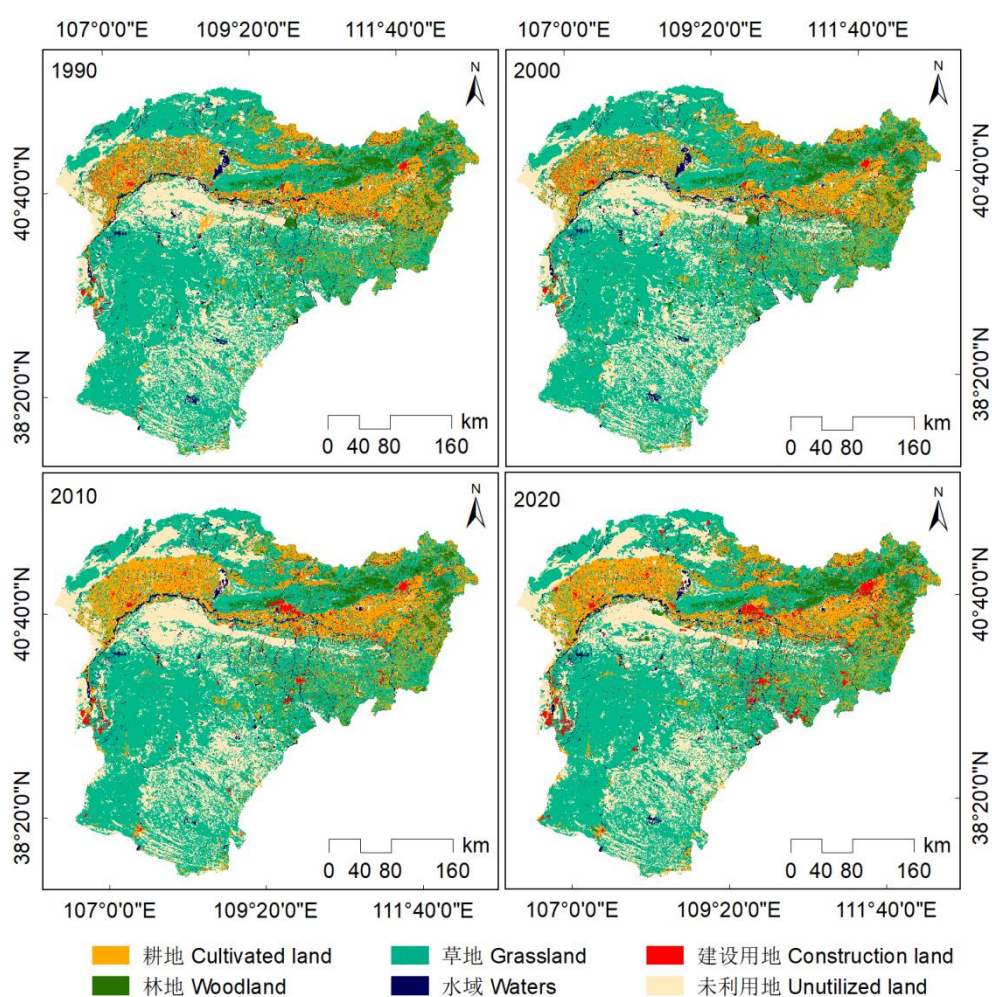


图 2 不同年份土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in different years

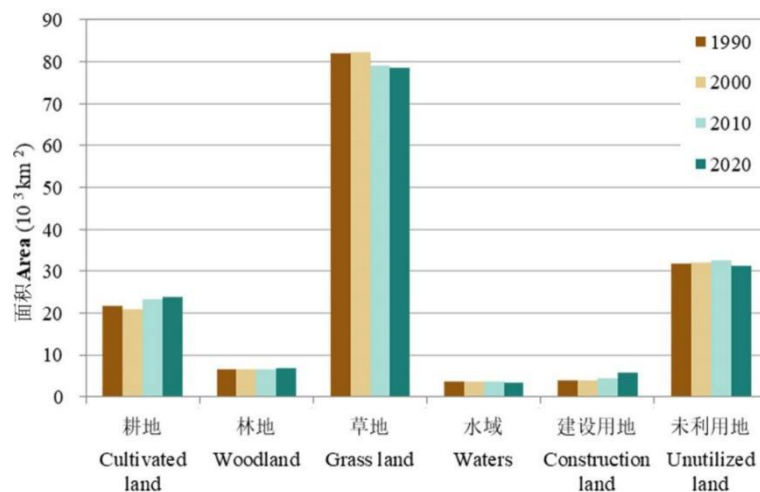


图 3 不同年份土地利用类型面积

Fig.3 Area of land use types in different years

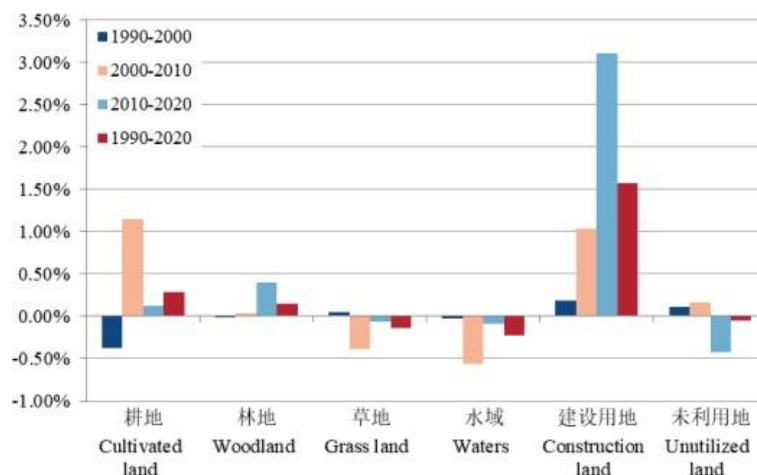


图 4 不同年份土地利用类型面积变化动态度

Fig.4 Dynamic degree of land use type area change in different years

4.1.2 土地利用结构转移特征

为进一步明晰内蒙古黄河流域各土地利用类型的变化类型和相互转移特征, 对各期土地利用数据进行空间叠加分析, 获得 1990-2020 年土地利用结构转移矩阵 (表 4)、空间分布图 (图 5) 和桑基图 (图 6)。草地、水域、未利用地以转出为主, 耕地、建设用地、林地以转入为主。草地的变化最大, 主要与耕地、建设用地、未利用地之间发生相互转化, 共有 8.92% 的草地转为其他地类, 其中, 2.86% 的草地转为耕地, 主要发生在研究区北部和西部, 1% 的草地转为建设用地, 有 3.97% 的草地转为未利用地, 此转移过程主要发生在研究区北部靠近边界区域; 其次转出量较大的是耕地和未利用地, 耕地和未利用地分别向其他地类

转移了 3.36%和 4.99%，但耕地的转入量较转出量更大，因此耕地整体上是转入为主的。此外，建设用地转出面积为 0.88%，转入面积为 2.11%，以转入为主；林地和水域虽各有转移，但是转移量不大，相对较为稳定。

分时段来看，1990-2000 年土地利用类型之间都发生了相互转移，但是转移程度、转移面积非常小，其中建设用地 10 年间转入 0.05%，转出为 0%。2000-2010 年草地与耕地和未利用地之间的转移较为明显，10 年之间草地向耕地转移了 1.89%的面积，向未利用地转移了 2.89%的面积，而耕地和未利用地分别有 0.75%、2.19%的面积转化为草地，由此可见，草地在这 10 年之间以转出为主。2010-2020 年建设用地转入面积占比为 1.61%，转出面积占比为 0.71%，说明建设用地在这十年增长较多，人类活动较为频繁。草地仍然与耕地和未利用地相互转化，且转化量相对较高。此外，无论是从整体来看还是从某一时段分析，水域转移量都是最小的，变化不是很明显。

Fig.4 Land Transfer Matrix from 1990 to 2020

		2020					
土地利用类型		草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地
Land-use type		Grassl	Cultivated	Construction	Woodland	Waters	Unutilized land
		and	land	land			
1990	草地 Grassland	45.77	2.86	1.00	0.80	0.28	3.97
	耕地 Cultivated land	1.91	11.22	0.68	0.35	0.20	0.22
	建设用地 Construction land	0.26	0.53	1.71	0.02	0.03	0.04
	林地 Woodland	0.72	0.24	0.11	3.14	0.03	0.15
	水域 Waters	0.33	0.26	0.06	0.03	1.60	0.24
	未利用地 Unutilized land	3.56	0.73	0.26	0.24	0.20	16.25

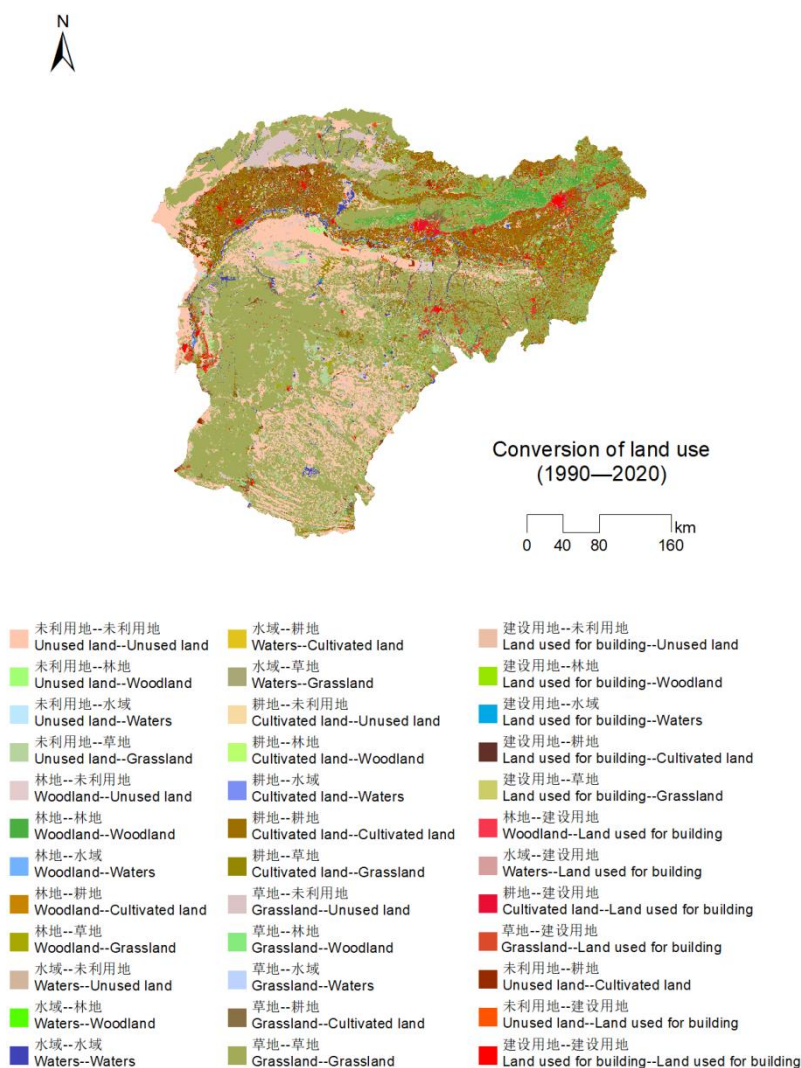


图 5 1990–2020 年土地利用结构转移空间分布

Fig.5 Spatial distribution of land use structure transfer from 1990 to 2020

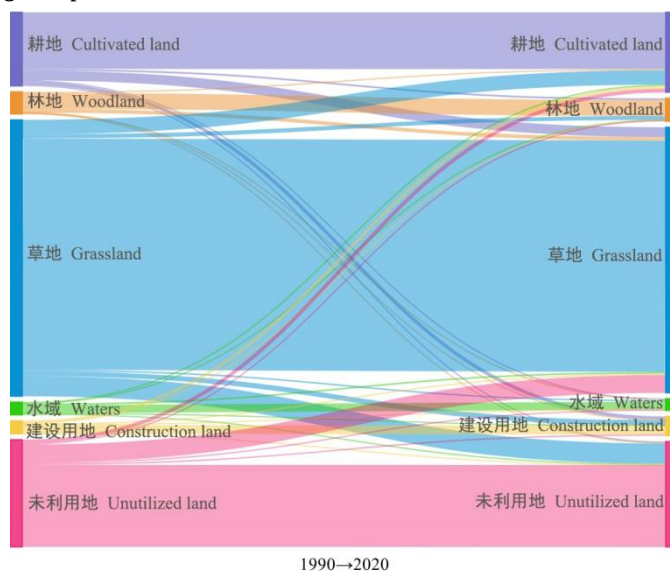


图 6 1990–2020 年土地利用结构转移桑基图

Fig.6 Sankey of Land Use Structure Transfer from 1990 to 2020

4.2 生境退化度分析

生境退化度的大小表达了该地类在目前监管水准下,受到生境威胁因子作用水平的大小,从而反映出其生境质量降低的概率大小(Li et al.,2021)。据 InVEST 模型得到内蒙古黄河流域 1990、2000、2010、2020 年的生境退化度空间分布(图 7)。

生境退化度整体空间分布为北高南低,生境退化度较高的区域主要集中在研究区北部,即巴彦淖尔市、包头市和呼和浩特市所在区域,该区域是耕地的主要集中区域,水域、林地、草地、建设用地多穿插分布于耕地地块之间,斑块面积小且不连续,是受威胁源影响最大和人类干扰最为频繁的区域,其中,生境退化度最高的区域为点块状,均为林地、水域和草地分布的地方,这些都是对威胁源较为敏感的土地利用类型,表明其生境质量具有较高潜在退化的可能性,未来的生境防护工作应重点关注这些区域。此外,鄂尔多斯市东北区域也需要格外注意,该区域林地、草地、水域的生境退化度等级为中等偏高,生境退化度虽然不是很高,但若不注意防护,会导致其生境退化度的值增高,从而生境质量退化的可能性也会大大增加。

从时间变化来看,研究区 1990 年和 2000 年生境退化度的平均值都是 0.0078,从图中也可看出这十年来生境退化度并未发生很大的变化,但是 2010 和 2020 年的生境退化度分别为 0.0084、0.0094,后二十年的生境退化度增大,平均值增长了 0.0016,也就说明生境质量潜在退化的可能性增大,可以看到 2020 年鄂尔多斯市东北部的生境退化度的确发生了变化。

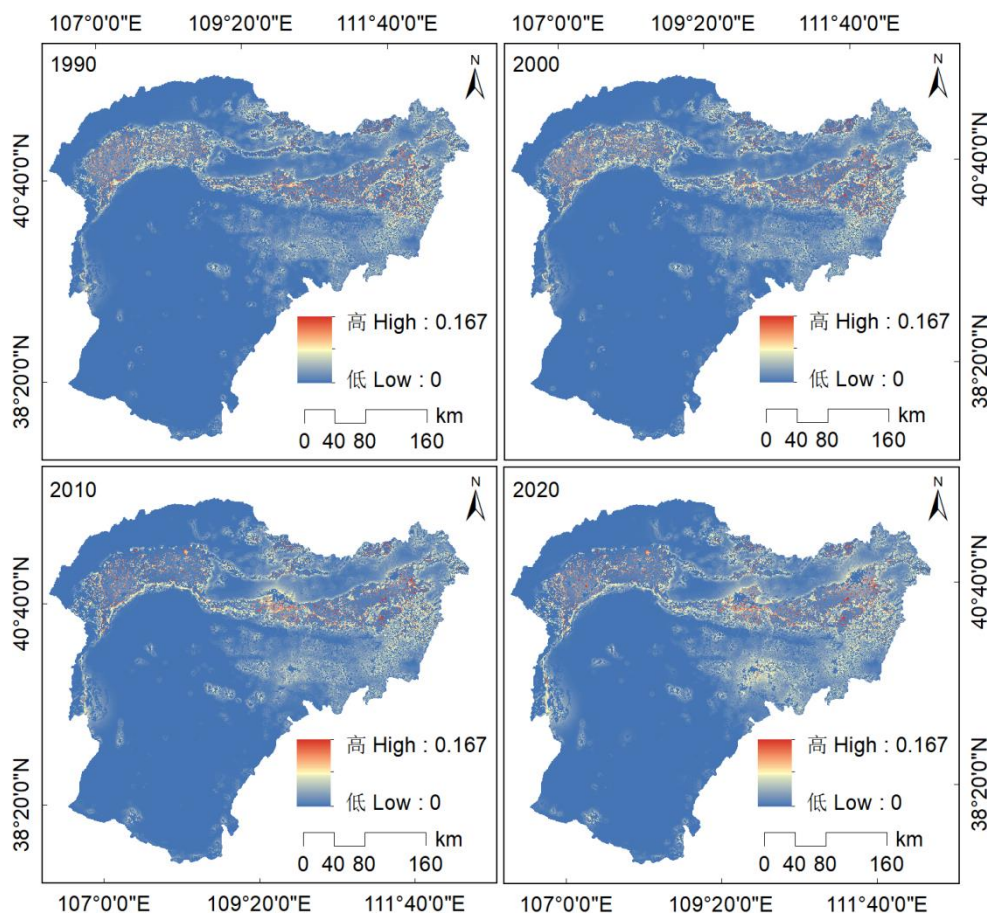


图7 不同年份生境退化度空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of habitat degradation in different years

4.3 生境质量分析

4.3.1 生境质量时空变化特征

借助 InVEST 模型中的生境质量模块,得到内蒙古黄河流域 1990、2000、2010、2020 年的生境质量空间分布(图 8),为了更加直观的表现出不同区域生境质量的差异,运用 ArcGIS 软件中的自然断点法将其分为 5 个等级(表 5),分别是低(0-0.15)、较低(0.15-0.35)、中等(0.35-0.65)、较高(0.65-0.85)、高(0.85-1)。

1990-2020 年内蒙古黄河流域生境质量均值分别为 0.545、0.542、0.527 和 0.528,呈现先降低后小幅度回升的趋势。高等级生境质量区域面积分别为 25.18%、23.35%、20.43%和 19.52%,处于持续减少的状态,30 年间共减少了 5.66%,低等级生境质量区域面积分别为 22.21%、22.48%、23.43%和 23.50%,处于持续增加的状态,30 年间共增加了 1.29%,无论是从生境质量均值变化趋势上分析,还是从不同等级生境质量的区域面积增减来看,在研究期内研究区的生境质量总体上处于下降的状态。其中 2000-2010 年生境质量恶化程度最为严重,生境质量均值下降了 0.015,反映出这十年的外界干扰对当地生境造成了极大的破坏,2010-2020 年的生境质量变化不大,生境质量得到小幅度改善。高等级和低等级生境质量的区域面积大小往往最能代表该区域该时间内的生境质量水平的高低,比如 1990 年的生境质量均值最高,并且可以发现

高等级生境质量区域面积占比高达 25.18%，高于其他年份同等级生境质量的区域面积占比，低等级生境质量区域面积占比为 22.21%，低于其他年份的同等级占比，而 2020 年与 1990 年的情况正好相反，高等级生境质量区域面积占比为 19.52%，于所有年份中最低，低等级生境质量区域面积占比 23.50%，于所有年份中最高。

从空间格局来看，生境质量等级为低的区域主要分布在库布齐沙漠以及鄂尔多斯市东南部，此处多为沙地，自然环境恶劣，生境质量很低，而生境质量等级为较低的区域主要集中在黄河北岸附近的河套平原，该区域耕地、建设用地和沙地相互交错，生境较为脆弱，生境质量相对较低。生境质量等级为高和较高的区域也相对较为明显，尤其是鄂尔多斯中部和西南部，草地分布较为广泛，生境质量相对较高，此外，研究区东北部的生境质量值很高，这是因为此处林地生长较为茂盛，生境抗干扰能力强。

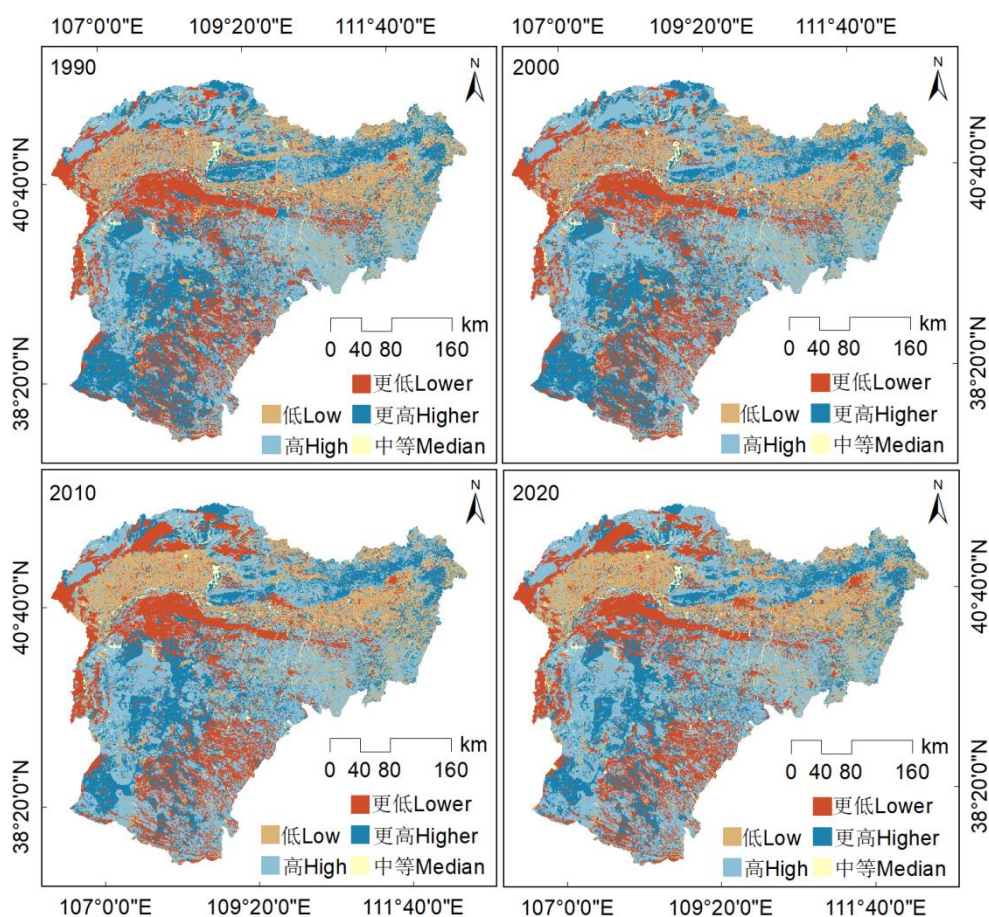


图 8 不同年份生境质量空间分布图

Fig.8 Spatial distribution map of habitat quality in different years

表 5 不同年份生境质量面积占比 (%)
Table.5 Proportion of habitat quality area in different years

等级 Grade	1990	2000	2010	2020	面积变化 Area change (%)
低 Low	22.21	22.48	23.43	23.50	1.29
较低 Lower	15.64	15.16	16.35	16.40	0.75
中等 Medium	1.86	1.89	1.85	1.85	-0.01
较高 Higher	35.10	37.12	37.93	38.73	3.63
高 High	25.18	23.35	20.43	19.52	-5.66
指数均值 Exponential mean	0.545	0.542	0.527	0.528	

4.3.2 生境质量等级转移分析

通过 ArcGIS 的分析工具对各时段内的生境质量等级转移进行了分析（图 9、表 6），图中红色部分是生境质量发生退化的区域，绿色部分是生境质量得到改善的区域，灰色部分是生境质量未发生改变的区域。

1990-2000 年研究区 85.17%的区域未发生生境质量变化，生境得到改善和生境发生退化的区域面积旗鼓相当，呈极度破碎的零星状散布于整个研究区，面积占比分别为 7.49%和 7.34%，相对均衡。2000-2010 这十年的生境质量等级转移较为明显，生境得到改善的区域以点块状分布于研究区的中部和东部，面积为 5921.04km²，占比为 3.96%，较前十年下降了很多，从图上可以很明显的看到生境质量退化的区域（红色）主要以块状分布在研究区北部，退化面积为 9005.57km²，面积占比为 6.02%，但是退化区域更为集中和明显，且该面积大于生境质量改善的区域面积。此外，生境质量没有发生改变的区域面积占比 90.03%，该面积占比较前十年增长了 4.86%。2010-2020 年生境质量发生改善和退化的区域面积都是 4730km² 左右，面积占比仅有 3.16%，变化面积相等且占比较小，二者对总体生境质量的影响足以相互抵消，生境质量未发生变化的区域面积占比高达 93.68%，说明这十年的生境质量变化较为稳定。总观 30 年的生境质量变化，生境质量未发生变化的区域占主体，面积占比为 77.97%；生境质量退化的区域面积是 17905.67km²，面积占比为 11.97%，主要集中在研究区北部和黄河两岸附近，结合土地利用变化来看，这类区域大多是由草地退化为未利用地、耕地过渡为建设用地和林地退化为建设用地的区域；生境质量改善的区域面积是 15036.66km²，面积占比为 10.06%，主要分布在研究区中部即鄂尔多斯中北部，大多是未利用地转变为草地和林地的区域。总体上研究区的生境质量呈退化趋势，生境退化的区域要多于生境改善的区域，需加强对当地生态环境的保护力度，降低自然因素对生态环境的消极影响，控制人为因素对生态环境的过度干扰。

表 6 各时段生境质量等级转移面积 (km²) 及其占比 (%)

Table.6 The transfer area of habitat quality level at different time periods (km²) and its proportion (%)

生境变化 Habitat changes	面积/占比 Area/Proportion	1990-2000	2000-2010	2010-2020	1990-2020
改善 Improve	面积 Area	11195.46	5921.04	4730.17	15036.66
	占比 Proportion	7.49	3.96	3.16	10.06
不变 Not	面积 Area	127369.62	134776.40	140207.41	116595.53
	占比 Proportion	85.17	90.03	93.68	77.97
退化 Worsen	面积 Area	10983.78	9005.57	4730.53	17905.67
	占比 Proportion	7.34	6.02	3.16	11.97

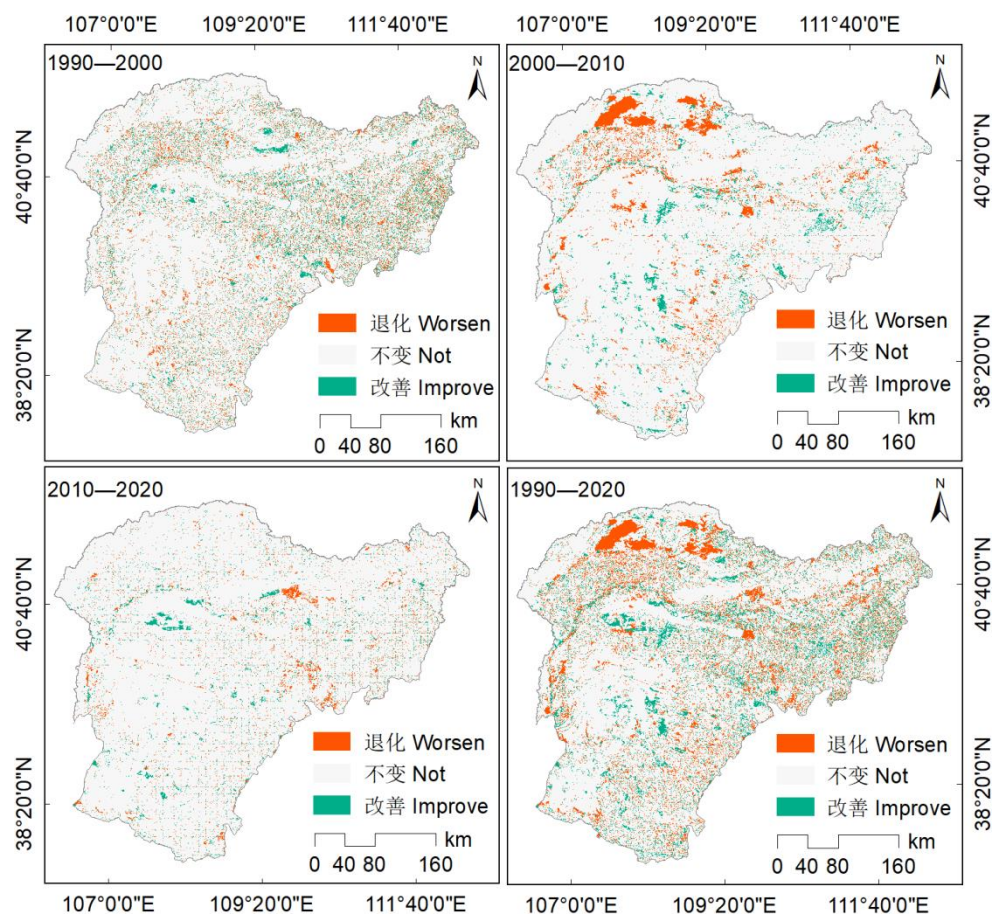


图9 各时段生境质量等级转移图

Fig.9 Map of Habitat Quality Level Transfer at Different Time Periods

4.3.3 生境质量空间统计分析

在 p 值小于 0.01 的情况下, 研究区 1990-2020 年四个时期生境质量的全局空间自相关 Moran I 值分别为 0.462、0.459、0.495、0.491 (表 7), 均大于 0, 说明内蒙古黄河流域生境质量分布呈现空间正相关, 且空间相关性较明显, 具有显著的空间聚集性, 总体来看, 研究区 30 年来的 Moran I 值是增大的, 表明生境质量的空间自相关性在增强。

为了进一步明晰研究区生境质量空间分布的局部情况, 根据 LISA 指数分析方法, 对研究区生境质量的空间集聚类型进行了分析 (图 10), 研究区有一半为不显著区域 (N), 生境质量高值集聚区即 H-H 主要集中在研究区东北部和鄂尔多斯市中部以及西南区域, 也是研究区林地和草地分布较多的区域, 与生境质量较好区域大致重合, L-L 为生境质量低值集聚区, 这类区域主要分布在黄河南岸的库布齐沙漠, 还有一部分零散分布于研究区西北部和东南部, 相似的, 此类区域与生境质量较差区域重合很多。生境质量低值由高值围绕 (L-H) 与高值由低值围绕 (H-L) 的异常值区域面积相对较小, 呈零星分布。从时间变化来看, 2010 年研究区北部的 L-L 区域地扩张较为明显。

表 7 生境质量全局空间自相关性

Table.7 Global spatial autocorrelation of habitat quality						
年份 years	莫兰指数 Moran I	z	p	年份 years	莫兰指数 Moran I	p
1990	0.462	252.47 2	<0.01	2010	0.495	270.39 6
2000	0.459	250.29 3	<0.01	2020	0.491	268.21 2

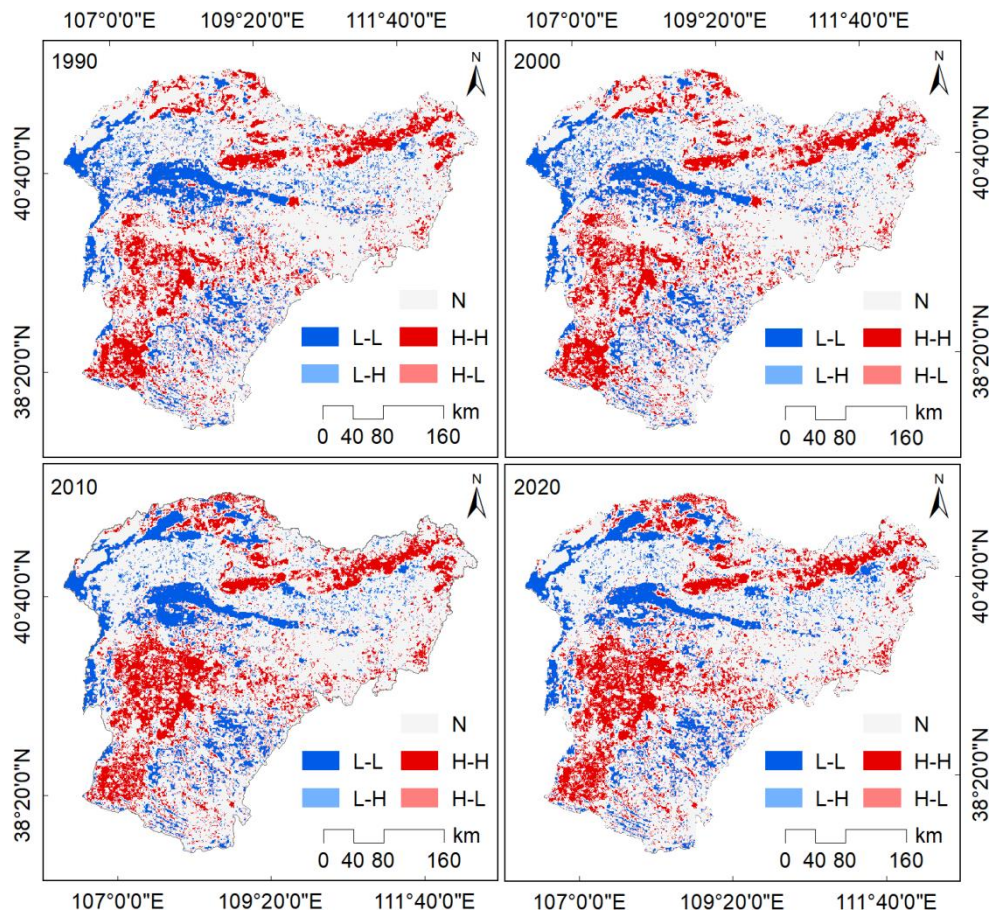


图 10 生境质量空间集聚类型图

Fig.10 Map of Spatial Agglomeration Types of Habitat Quality

4.4 驱动力分析

本文选取归一化植被指数 NDVI、DEM、坡度、气温、降水、土壤类型等自然因子，以及人口密度、GDP 等社会经济因子为主要因子，探究其对研究区生境质量的影响程度。

基于地理探测器对研究区内各驱动因子的计算结果 q 值进行分析（表 8），各驱动因子的 q 值整体上都不是很高，主要是因为区域生境质量的变化较为复杂，往往受到多方面因素联合的影响，不同的因子之间存在相互作用(黄兰等,2023)。对生境质量解释力即影响程度由大到小依次为 DEM(0.074)>NDVI(0.062)>土壤类型（0.050）>降水（0.036）>气温（0.024）>坡度（0.015）>GDP（0.007）>人口（0.006），且所有驱动因子都通过了 p<0.05 的显著性检验，各个因子在不同程度上解释了生境质量的空间分异，其中 DEM、NDVI 和土壤类型等自然因子的 q 值均大于等于 0.050，具有较强的解释力，而以 GDP 和人口为

代表的社会经济因子的解释力则相对较差。整体来讲，自然因子对生境质量空间格局的作用要远大于社会经济因子的作用，因此要加大对自然环境的关注和保护力度，促进当地气候和植被的改善，这对生境质量的提高具有很大的作用。

为进一步探究各因子交互作用对生境质量空间分异性的影响，基于地理探测器得到了驱动因子交互探测结果（图 11）。结果发现，任意两种进行交互探测的因子对生境质量空间分异的解释力都要大于其单一因子的解释力。均表现出了双因子增强或非线性增强的效果(许彩彩等,2022)。其中， $X1 \cap X2$ (0.146) 的值最大，且交互作用为非线性增强，说明土壤类型与 NDVI 的协同作用对生境质量空间异质性的解释力度最大，其次是 $X2 \cap X3$ (0.133)、 $X1 \cap X3$ (0.121)、 $X1 \cap X4$ (0.118)、 $X2 \cap X5$ (0.102) 和 $X2 \cap X8$ (0.101) 的交互作用较大，解释力均大于 0.1，且均为自然因子的交互作用，结合单因子探测结果，由此可说明自然因子是影响生境质量空间分异的主要驱动因子。 $X6 \cap X7$ (0.009) 即人口和 GDP 的交互作用最小，但是该交互结果为双因子增强，其交互解释力要大于单一人口或单一 GDP 的解释力，另外，无论是人口还是 GDP，其对该研究区生境质量的影响都是很弱的，但是其与任意自然因子的交互作用均大于单一因子的作用，效果最为明显的是 $X3 \cap X7$ (0.079) 和 $X3 \cap X6$ (0.078)，社会经济因子是不容忽视的。

表 8 生境质量驱动力探测结果

Table.8 Detection results of driving forces for habitat quality								
驱动因子 Driving factors	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
q	0.050	0.062	0.074	0.036	0.024	0.006	0.007	0.015
p	0	0	0	0	0	0	0	0

注：X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8 分别是土壤类型、归一化植被指数、高程、降水、气温、人口、生产总值、坡度。X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8 are respectively Soil type、NDVI、DEM、Precipitation、Temperature、Population、GDP and Slope.

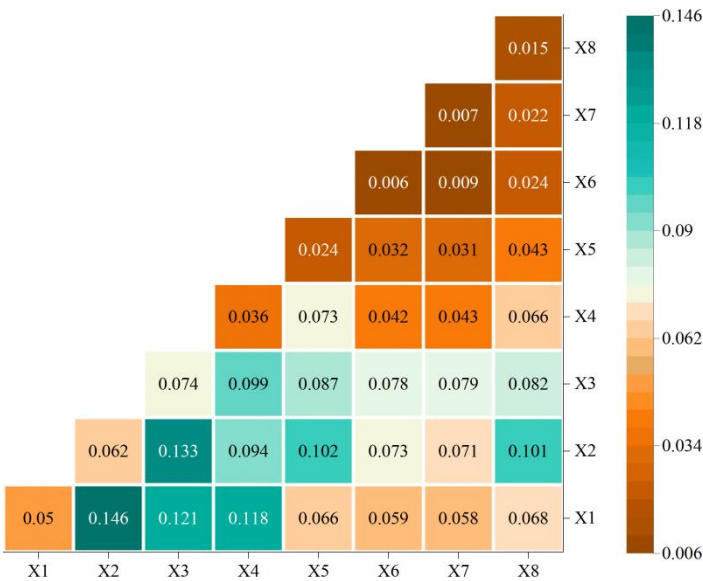


图 11 生境质量驱动因子交互探测结果

Fig.11 Interactive detection results of driving factors for habitat quality

5 讨论与结论

5.1 讨论

内蒙古黄河流域的生境质量本底较差,整体变化趋势为先下降后小幅度回升,这与前人研究保持一致(冯琰玮等,2022)。黄河两岸以及研究区东南部生境质量低,鄂尔多斯中部和西南部的生境质量高。从分析工具 InVEST 模型来看,生境质量受到威胁因子个数、影响范围、影响权重、生境对不同威胁的敏感程度以及生境适宜度等的影响,而这些因素都是基于对土地利用数据的输入和解读,林地和草地的生境适宜度要高于耕地、建设用地和未利用地,因此生境质量的空间格局与土地利用的空间分布高度相似,土地利用变化会直接影响到生境质量的变化,这与其他地区的研究一致(Wei et al.,2017; John et al.,2019)。黄河北岸分别坐落着库布齐沙漠和河套平原,沙地和耕地主要集中于此,鄂尔多斯中部和西南部的草地成片,土地利用的分布格局最终影响到生境质量值的高低。2000-2010 年耕地过度扩张,加之气候干旱,区域多风少雨,土壤沙化严重,草地发生大量退化,这是导致研究区 30 年内生境质量出现断层式下降的主要原因,由此可见,退耕还林还草的生态价值短时间内没有在该区域得到体现,在之后十年里,草地未发生大幅度减少,说明退耕还林还草政策逐渐起到了一定的调控作用。不同土地利用斑块往往以点块状相互交错,未成片分布,破碎程度高,连通性差,尤其是林地、水域、草地和耕地以点块状交杂分布的地带,这种斑块面积小且分散的布局往往会导致生境无法形成较强的抗干扰能力,生态功能大打折扣,对威胁源的敏感程度要远高于其他破碎化程度较低的生境,有着很高的生境退化度,生境质量发生退化的可能性极高,因此,要改善生境质量,首先要对该类区域整改,可人为增强林地、水域和草地的成片扩张,同时减少诸如建设用地、耕地等的过度介入。

从驱动力分析来看,本文所选取得所有驱动因子都通过了 $p < 0.05$ 的显著性检验,说明都在不同程度上解释了生境质量的空间分异,自然因子是导致生境质量空间分异的主要驱动因子,高程和坡度影响植被的类型和生长状况,同时也反映了人类活动的可达性,高海拔地带人类干扰较难到达,其生境质量要高于低海拔地带,NDVI 反映植被的覆盖度,气温和降水影响物种的成长态势和栖息地适宜性(王江涛等,2023),土壤类型影响植物的根系生长和发展,诸类因子或通过对土地利用的影响间接引起生境的变化,或直接作用于生境,此外,社会经济因子对该区生境质量变化的驱动作用较小,但是人口和 GDP 表明了一定的城市扩张水平和经济发展状况,是探究人类活动对生境质量影响的主要驱动因子。生境质量问题的诊断和解决不能只从单一因子上入手,任意两种驱动因子对生境质量空间分异的解释力都要大于其单一因子的解释力,自然因子与社会因子之间存在的复杂的交互关系,综合考虑所有因子之间的协同作用,在改善生境质量的工作上必大有成效。

同时,本研究存在一定的不足之处。首先,选取的 InVEST 模型虽然具有便捷、高效的特点,但同时也有相对难以控制的缺点,在参数设置上一般是在前人研究上进行修改设置,存在一定的主观性(Chen et al.,2016),在一定程度上给不同地区研究的对比造成困难,因此,在今后的研究中,应关注关键参数的确定方法。其次,由于数据获取和处理难度较大,本文进行驱动力分析时选取的社会经济因子较少,没有对鄂尔多斯区域的煤炭开采活动进行分析,并且缺少相应的政策要素,之后的学习中会着重考虑其他社会因子对生境质量的影响。

5.2 结论

(1) 草地是数量最多、面积最大、分布最广的土地利用类型,其次是未利用地。各土地利用类型均发生了不同程度的变化,耕地和建设用地增加的相对较多,而且建设用地的扩张速率最快,其变化动态度高达 1.58%。草地的转出量最大,共有 8.92%的草地转为其他类型的土地利用类型,主要与耕地、建设用地、未利用地之间发生相互转化。

(2) 生境退化度整体空间分布为北高南低,生境退化度较高的区域主要集中在研究区北部,该区域是耕地的主要集中区域,表明其生境质量具有较高潜在退化的可能性,未来的生境防护工作应重点关注这些区域。

(3) 生境质量本底差,总体变化趋势为先降低后小幅度回升。生境质量等级为低的区域主要分布在库布齐沙漠以及鄂尔多斯市东南部,此处多为沙地,自然环境恶劣。30 年间生境质量退化的区域面积是 17905.67km²,面积占比为 11.97%,主要集中在研究区北部和黄河两岸附近;生境质量改善的区域面积是 15036.66km²,面积占比为 10.06%,主要分布在研究区东北部、鄂尔多斯中部及西南部,大多是林地集中以及未利用地转变为草地和林地的区域。此外,生境质量分布呈现空间正相关,具有显著的空间聚集性。

(4) 自然因子对生境质量空间分异的作用要远大于社会经济因子的作用,DEM、NDVI 和土壤类型等自然因子的 q 值均大于等于 0.050,是主要驱动因子。任意两种进行交互探测的因子对生境质量空间分异的解释力都要大于其单一因子的解释力,其中土壤类型与 NDVI 的协同作用对生境质量空间异质性的解释力度最大,另外,社会经济因子与任意自然因子的交互作用均大于单一因子的作用,社会经济因子不容忽视。

参 考 文 献

- Chao, Liu, Hong, Liang, Huo, Lu, Ming, Tian, Xing, Guang (2018) [Potential geographical distribution of *Pyrus calleryana* under different climate change scenarios based on the MaxEnt model]. *The Journal of Applied Ecology*.
- Chen Y, Qiao F, Jiang L (2016) Effects of Land Use Pattern Change on Regional Scale Habitat Quality Based on InVEST Model—a Case Study in Beijing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*.
- Erik N, Heather S, Peter H, Marc C, Driss E, Stacie W, Steven M, Stephen P, Maya MA (2010) Projecting Global Land-Use Change and Its Effect on Ecosystem Service Provision and Biodiversity with Simple Models. *Plos One* 5 (12):e14327.
- Getis A, Ord JK (1992) The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*
- Hall LS, Krausman PR, Morrison ML (1997) The habitat concept and a plea for standard technology. *Wildlife Society Bulletin* 25 (1)
- Jaroslav J, Bozek P (2019) Land abandonment in Poland after the collapse of socialism: Over a quarter of a century of increasing tree cover on agricultural land. *Ecological Engineering* 138:106-117
- John J, Chithra NR, Thampi SG (2019) Prediction of land use/cover change in the Bharathapuzha river basin, India using geospatial techniques. *Environmental Monitoring and Assessment* 191 (6):354.351-354.315
- Kim T, Song C, Lee WK, Kim M, Kim J (2015) Habitat Quality Valuation Using InVEST Model in Jeju Island. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 18 (5):1-11.
- Kunwar RM, Evans A, Mainali J, Ansari AS, Rimal B, Bussmann RW (2020) Change in forest and vegetation cover influencing

distribution and uses of plants in the Kailash Sacred Landscape, Nepal. *Environment, Development and Sustainability* 22 (2):1397-1412

Li Y, Duo L, Zhang M, Wu Z, Guan Y (2021) Assessment and Estimation of the Spatial and Temporal Evolution of Landscape Patterns and Their Impact on Habitat Quality in Nanchang, China. *Land* 10 (10):1073.

Limin, Dai, Shanlin, Li, Bernard, Lewis J, Jian, Wu, Dapao, Yu (2019) The influence of land use change on the spatial-temporal variability of habitat quality between 1990 and 2010 in Northeast China. *Journal of Forestry Research* v.30 (06):251-260

Miguel M, Catarina F, Marta V, Helena C, Artur G (2018) Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal). *Land Use Policy* 78:637-649

Newbold T, Hudson LN (2015) Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*

Sallustio L, De Toni A, Strollo A, Di Febbraro M, Gissi E, Casella L, Geneletti D, Munafò M, Vizzarri M, Marchetti M (2017) Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management* 201 (oct.1):129

Scolozzi R, Geneletti D (2011) Spatial Rule-Based Assessment of Habitat Potential to Predict Impact of Land Use Changes on Biodiversity at Municipal Scale. *Environmental Management* 47 (3):368-383.

Song S, Liu Z, He C, Lu W (2020) Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model. *Ecological Indicators* 112:106071-

Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V (2016) Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of The Total Environment*

Wang JF, Hu Y (2012) Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software* 20 (none):114-115

Wang JF, Li XH, Christakos G, Liao YL, Zhang T, Gu X, Zheng XY (2010) Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science* 24 (1):107-127.

Wei Y, Jin Y, Tao S, Yang Z, Cai Y, Yi Y (2017) Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities. *Ecological Indicators* 92 (SEP.):354-366

Xiulan W, Yuhai B (1999) Discussion on research methods of land use dynamic change. *Progress in Geography* 18 (1):81-87

Yan L, Huang X, Hong Y, Zhong T (2014) Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area – A case study of Guiyang. *Habitat International* 44:339-348

奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 杨潇, 张乐艺 (2022) 基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价. *干旱区地理* 45 (01):164-175

包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜 (2015) 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. *干旱区研究* 32 (3):8

陈妍, 乔飞, 江磊 (2016) 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的评估研究——以北京为例. *北京大学学报:自然科学版*

冯琰玮, 甄江红 (2022) 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究. *中国农业资源与区划* 43 (10):129-138

巩杰, 马学成, 张玲玲, 柳冬青, 张金茜 (2018) 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异. *水土保持研究* 25 (3):6

郝月, 张娜, 杜亚娟, 王熠辉, 郑艳东, 张长春 (2019) 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. *应用生态学报* 30 (3):10

黄兰, 陈秋计, 冯建中, 刘瑞祥 基于地理探测器的神府矿区生境质量时空特征及驱动机制分析. *西安理工大学学报*:1-14

康健, 杨光, 韩雪莹, 张雨 (2022) 黄河流域内蒙古段土地沙漠化动态变化及驱动力分析. *草学* (06):32-42

雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 陈小花, 吴庭天, 李苑菱 (2022) 基于 InVEST 模型的海南岛三大流域生境质量时空演变. *应用生态学报* 33 (09):2511-2520. 10.13287/j.1001-9332.202209.019

雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天 (2020) 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. *生态学报* 40 (14):14

- 李明, 刘金泉, 郭艳光, 包永红, 杨中杰, 祝鹏, 黄修梅 (2022) 内蒙古黄河流域智慧农业高质量发展思考. 南方农业 16 (13):168-171+176. 10.19415/j.cnki.1673-890x.2022.13.047
- 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎姗, 许通, 杨丽 (2017) 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. 生态学报 37 (13):4538-4548
- 彭苏萍, 毕银丽 (2020) 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考. 煤炭学报 45 (04):1211-1221. 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0444
- 齐松, 董春, 卫东, 邱士可 (2022) 基于 InVEST 模型的黄河干流沿岸生境质量时空变化研究. 测绘科学 47 (08):114-122. 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.08.014
- 尚俊, 蔡海生, 龙月, 曾君乔, 陈艺, 张学玲 (2021) 基于 InVEST 模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析. 长江流域资源与环境 30 (8):15
- 田佳博, 杜哲, 贾启建, 何玲 (2022) 太行山不同地形梯度生境质量空间分异及其影响因素研究——以河北省阜平县为例. 林业与生态科学 37 (04):426-436. 10.13320/j.cnki.hjfor.2022.0060
- 王江涛, 杨永崇, 杨梅焕 基于地理探测器的黄土高原 NPP 时空变化及驱动力研究. 西安理工大学学报:1-10
- 王劲峰, 徐成东 (2017) 地理探测器:原理与展望. 地理学报 72 (01):116-134
- 王志强, 陈志超, 郝成元 (2009) 基于 HSI 模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价. 湿地科学 (03):197-201
- 许彩彩, 吕春娟, 陈卓, 郭岩松 (2022) 省域视角下耕地自然质量空间格局与影响因素. 中国农业资源与区划 43 (03):253-264
- 杨洁, 谢保鹏, 张德罡 (2021) 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. 中国沙漠 41 (4):11
- 叶振维, 路达, 白妙馨 (2014) 内蒙古黄河流域水污染形势分析. 环境与发展 26 (04):100-103
- 张景华, 封志明, 姜鲁光 (2011) 土地利用/土地覆被分类系统研究进展. 资源科学 33 (6):9
- 赵水霞, 李畅游, 李超, 史小红, 孙标, 赵胜男 (2016) 基于 3S 技术的黄河内蒙古段河道演变特性分析. 水利水电科技进展 36 (04):70-74