

舒翰俊,范顺祥,姜亚东,等. 内蒙古耕地景观生态风险评价及生态修复分区[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 895-906.

SHU Han-jun, FAN Shun-xiang, JIANG Ya-dong, et al. Landscape Ecological Risk Assessment and Ecological Restoration Zoning of Cultivated Land in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 895-906.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.09022

· 环境与可持续发展专刊 ·

内蒙古耕地景观生态风险评价及生态修复分区

舒翰俊¹, 范顺祥¹, 姜亚东², 王立群³, 李经纬¹, 宇振荣¹, 刘云慧^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古
呼和浩特 010020; 3. 呼伦贝尔市自然资源局, 内蒙古 呼伦贝尔 021199)

摘要: 诊断识别耕地面临的生态风险是开展耕地生态修复、保障耕地生态安全的先决条件。以“自然-社会-景观”多维度空间量化内蒙古耕地景观生态风险影响因素, 通过空间主成分分析法完成耕地景观生态风险综合评价, 以及各影响因素权重的量化; 基于评价结果, 分析生态风险空间聚集特征, 识别生态修复重点区域并提出修复对策。结果表明: ①内蒙古耕地景观生态风险是多因素共同影响的结果, 耕地景观破碎化、工矿污染、水资源胁迫和生境质量差是主要的生态问题。②耕地斑块分布集中、局部斑块面积大且完整、或沿河流分布时, 其景观生态风险较低; 耕地斑块分布零散、局部斑块破碎或处于大面积耕地的边缘时, 其景观生态风险较高。③耕地景观生态风险低值显著聚集于嫩江流域、西辽河流域、河套平原以及土默川平原西部, 是显著的冷点区域; 高值显著聚集于内蒙古南部, 是显著的热点区域。将热点区域划定为重点修复区, 建议实施耕地破碎化整治、农田生态基础设施建设、节水灌溉工程建设、退耕还林还草等生态修复工程; 不显著区域划定为农田保育区, 重点加强农田生态基础设施建设, 扩大农业空间植被覆盖率; 冷点区域划定为农业发展区, 主要发展绿色农业, 推进种养结合。

关键词: 景观格局; 生态风险; 耕地; 空间主成分分析; 热点; 冷点; 生态修复; 内蒙古

中图分类号: X171.4; F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)04-0895-12

Landscape Ecological Risk Assessment and Ecological Restoration Zoning of Cultivated Land in Inner Mongolia, China

SHU Han-jun¹, FAN Shun-xiang¹, JIANG Ya-dong², WANG Li-qun³, LI Jing-wei¹,
YU Zhen-rong¹, LIU Yun-hui^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Inner Mongolia Geological Survey Institute, Huhhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. Hulun Buir
Natural Resources Bureau, Hulun Buir 021199, Inner Mongolia, China)

Abstract: Diagnosing and identifying the ecological risks of cultivated land is a critical prerequisite for carrying out ecological restoration and ensuring ecological security of cultivated land. The influence factors of landscape ecological risk of cultivated land in Inner Mongolia were quantified by multi-dimensional perspective of “nature-society-landscape”, the comprehensive landscape ecological risk of cultivated land was evaluated using spatial principal component analysis

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-12-08

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871186)

作者简介: 舒翰俊(1998-), 男, 安徽黄山人, 理学硕士研究生, E-mail: shuhanjun9@163.com。

* 通讯作者: 刘云慧(1977-), 女, 云南罗平人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: liuyh@cau.edu.cn。

(SPCA), and the weight of each impact factor was quantified; based on evaluation results, the spatial aggregation characteristics of ecological risks, which was later used to identify the key areas of ecological restoration, were identified, and the restoration countermeasure was put forward. The results show that ① the landscape ecological risk of cultivated land in Inner Mongolia is driven by multiple factors, cultivated landscape fragmentation, mining pollution, water resources stress and poor habitat quality are the major ecological risks. ② The ecological risk is lower at the region, where the distribution of cultivated land is concentrated and the cultivated land patches are large and unbroken, or along the river; conversely, the ecological risk is higher at the region, where the cultivated land is scattered and the cultivated land patches are small or at the edge of the large area patches. ③ There is a significant spatial aggregation of landscape ecological risks of cultivated land in Inner Mongolia with cold spot areas distributing at Nenjiang River Basin, Xiliaohe River Basin, Hetao Plain and Tumochuan Plain, while the hot spot areas distributing at the south of Inner Mongolia. The hot spot areas are diagnosed as the key ecological restoration zones, where ecological restoration projects, including remediating farmland fragmentation, constructing farmland ecological infrastructure, constructing water-saving irrigation infrastructure, and returning farmland to forest or grassland, are recommended; the cold spot areas are diagnosed as agricultural development zones, where is suggested to develop green agriculture and promote the combination of planting and farming; other areas are diagnosed as farmland conservation areas, where is recommended to strengthen the construction of farmland ecological infrastructure and expand the vegetation coverage in agricultural space.

Key words: landscape pattern; ecological risk; cultivated land; spatial principal component analysis; hot spot; cold spot; ecological restoration; Inner Mongolia

0 引言

耕地安全是粮食安全的保障,是实现人类可持续发展的基础^[1]。随着现代社会的发展,建设用地的扩张导致大量耕地侵占,并引起耕地景观破碎化的加剧^[2];机械化生产以及农药、化肥等农业化学品的过量投入,加剧了耕地土壤退化并造成了土壤板结、生物多样性丧失、面源污染等诸多生态问题^[3-4]。评估耕地景观面临的生态风险与问题,提高应对生态风险能力,是实现农业可持续发展的关键。

生态风险评价是对生态系统健康问题的诊断,是控制生态风险的先决条件。当前,耕地生态风险评价的相关研究多集中在局域尺度下对重金属污染、农业面源污染等特定污染源,或对水土流失、土地荒漠化等因素的单项风险评估^[5-8]。例如, Li 等基于“源-途径-受体”理论,在全国范围内对耕地重金属污染风险进行评价并提出了相应的风险防控策略^[5]; Wang 等通过遥感数据识别了 21 世纪以来中国县域耕地流失和景观破碎化风险的空间特征,为耕地保护和大规模利用提供了数据基础和科学支持^[9]。然而,随着人类对自然环境干扰的日益加重,

生态系统面临的生态风险多元化和复杂性也开始凸显,因此,单一风险源的评价无法对生态管理提供有力依据和参考^[10],而宏观、多维度的综合评估手段更具意义^[11]。

近年来,“社会-经济-自然”复合生态系统、景观生态学理论以及 3S 技术的发展,为生态风险评价提供了新的视角与方法——景观生态风险评价。风险指数法在当前的景观生态风险评价中最为常见,即用景观破碎度指数、景观优势度指数、景观脆弱度指数等构建景观风险指数,通过划分风险小区,计算各小区内的景观风险指数,最终实现区域内的空间化评价^[12]。这种方法重点强调了景观格局对区域生态风险的影响,但是对于“自然-社会”复合生态系统,景观风险指数可能不足以有效概括其中的多源风险。在复合生态系统中,自然和社会的干扰无处不在,同时景观格局与生态过程的相互作用也不可忽略。基于自然、社会、景观 3 个维度的景观生态风险评价是更具综合性的评估方法,因此被越来越多的研究者所关注,已成为宏观生态系统管理的重要工具^[13]。与传统的生态风险评价方式相比,景观生态风险评价强调多源生态风险的综合评估,不仅纳

入了自然、社会维度的风险因子,而且将景观格局特征纳入评价体系,强调景观格局对风险的影响^[14]。因此,有必要在宏观尺度上整合自然、社会、景观多源影响因素,建立风险评价体系,综合评价耕地景观所面临的生态风险,为耕地安全提供保障。

全面诊断识别生态系统存在的风险问题后,需要因地制宜制定生态风险应对措施,并确定重点修复区域^[15]。目前,常见生态修复分区方法主要有经验划分法^[16]、阈值法^[17]、聚类分析法^[18-19]等。经验划分法依赖研究人员的实践经验和主观判断,难免存在主观因素影响。阈值法则可能导致划分出的区域在空间上分散、破碎,易对后续的管理造成不便。而聚类分析法可通过空间自相关算法识别严重遭受生态风险威胁的区域,空间分布相对集中,便于实施后续的生态管理措施,是当前广泛应用的分区方法^[18-19]。

内蒙古是我国粮食主产区之一,被誉为“北疆粮仓”。但是,该地区耕地质量较差,多为中低产田,加之其地处北方生态脆弱区,水资源匮乏,受干旱、荒漠化胁迫严重;农业化学品投入量的不断增加,使得面源污染风险不容忽视;土地长期的重用轻养,导致土壤侵蚀、荒漠化程度加重,土壤养分流失问题突出;另外,受工矿开采的影响,一些耕地还出现工矿污染问题,直接影响耕地质量、数量和农产品生产的安全;近年来随着城市化的快速发展,建设用地扩张导致耕地破碎化程度的加剧和生境质量的下降,这也严重影响了农业生态系统的生态过程,加剧了耕地的生态脆弱性^[20]。总体来说,内蒙古耕地垦殖利用过度,退化严重,农业生态环境质量差,不利于农业的可持续发展,因此,揭示其耕地生态风险并开展相应的生态修复工程,对保障我国粮食安全具有重要意义。因此,本文在自然、社会、景观3个维度下量化、空间化9个耕地生态风险影响因子,运用空间主成分分析法综合评价内蒙古耕地生态风险;利用空间自相关分析,识别生态风险的空间聚集特征,以此划分生态修复分区,从而有针对性地提出区域耕地修复对策,为内蒙古未来的耕地保护和农业绿色发展提供科学参考。

1 研究区概况

内蒙古位于中国北部边疆,纬度范围为 $37^{\circ}24'N\sim 53^{\circ}23'N$,经度范围为 $97^{\circ}12'E\sim 126^{\circ}04'E$,南北宽约1 700 km,东西长约2 400 km,国土总面积为 $118.3\times 10^4\text{ km}^2$ (图1)。其地处蒙古高原东南部,

平均海拔约1 000 m,地形以高原为主体,呈现高原、山地、平原镶嵌排列的带状分布;气候以温带大陆性季风气候为主,降水量为50~450 mm,由东北向西南递减,呈现空间分布不均、季节变化强烈的特点。内蒙古拥有耕地17 255.43万亩,主要类型为旱地和水浇地,集中分布在嫩江流域(大兴安岭沿麓农牧区)、西辽河流域(西辽河流域农牧区)、河套—土默川平原(沿黄干流农牧区)及阴山北麓(阴山沿麓农牧区)^[21]。

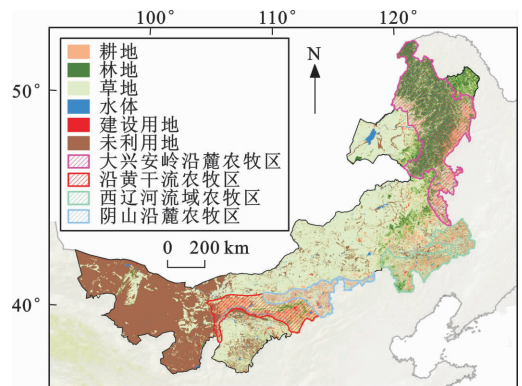


图1 内蒙古土地利用类型分布

Fig. 1 Distribution of Land-use Type in Inner Mongolia

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

研究数据包括土地利用数据、DEM数据、土壤数据等,原始数据信息与来源如表1所示。本文将所有栅格数据统一设置成CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_37坐标系,重采样至 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 分辨率,并根据内蒙古自治区边界裁剪至统一范围进行处理和分析。

2.2 分析方法

2.2.1 景观生态风险评价体系构建

景观生态风险指自然、社会因素的干扰对生态环境和景观格局交互作用所产生的不利影响^[22]。本文针对内蒙古耕地垦殖利用过度、退化严重、农业生态环境质量差的现状,以及所面临的干旱、荒漠化、土壤退化与侵蚀、工矿和面源污染、生境质量差、破碎化加剧等风险,从自然、社会、景观3个维度综合选取影响因子构建内蒙古耕地景观生态风险评价指标体系。各风险影响因子按生态风险由低到高分成1~5级,分级详情如表2所示。

(1)自然。自然影响因子选取坡度、土壤有机碳、荒漠化程度和距水源距离。坡耕地会加剧土壤侵蚀风险^[23],坡度越大意味着耕地面临的景观生态

表 1 主要数据清单
Table 1 List of Main Data

数据名称	数据类型	时间	数据来源
土地利用数据	30 m 栅格数据	2020 年	中国科学院资源环境科学与数据中心(https:// www. resdc. cn/)
DEM 数据	30 m 栅格数据		美国航空航天局(https:// search. earthdata. nasa. gov/)
植被指数数据	1 km 栅格数据	2020 年	美国航空航天局(https:// search. earthdata. nasa. gov/)
土壤数据	矢量数据		内蒙古自治区地质调查研究院
河流湖泊、道路、工矿点数据	矢量数据	2020 年	内蒙古自治区地质调查研究院
农药、化肥投入量数据		2020 年	内蒙古自治区统计局

表 2 耕地景观生态风险影响因子及评价分级标准
Table 2 Influence Factors and Grading Criteria of Landscape Ecological Risk of Cultivated Land

指标类型	影响因子	分级标准				
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
自然	坡度/(°)	0~2	2~6	6~15	15~25	>25
	土壤有机碳/ 10^{-3}	>30	20~30	10~20	6~10	0~6
	荒漠化程度/%	70~100	50~70	10~50	1~10	0~1
	距水源距离/km	0~4	4~8	8~12	12~16	>16
社会	农业化学品投入量/($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	0~5	5~10	10~15	15~20	>20
	距工矿距离/km	>13.5	10.0~13.5	7.0~10.0	3.5~7.0	0~3.5
	生境质量	0.9~1.0	0.7~0.9	0.5~0.7	0.1~0.5	0~0.1
景观	景观分割指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
	平均斑块面积	112.7~156.3	75.1~112.7	40.4~75.1	18.6~40.4	6.3~18.6

风险越大,本文通过DEM数据提取耕地坡度,并参考全国农业区划委员会于1984年颁发的《土地利用现状调查技术规程》进行分级;土壤有机碳含量可以指示土壤肥力和保水能力^[24],本文定义土壤有机碳低的耕地具有较高的生态风险,参考《全国第二次土壤普查养分分级标准》对原始数据进行分级;荒漠化程度采用遥感指数进行识别^[25],利用MODIS数据产品MOD13A2,采用最大值合成法合成2020年植被生长季6月至8月的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI),并采用像元二分模型计算植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover,FVC)^[26],计算得到的植被覆盖度按照《关于中国三北地区荒漠化分类分级及参考指正表的修订》重分类为5个级别^[27];耕地与水源距离可间接反映土壤水分情况^[28],距离水源地更近的区域受水资源胁迫的风险更低,水源地与每个耕地斑块的最近距离利用ArcGIS中欧式距离工具测量,并用相等间隔法(间隔取4 km)进行分级。

(2)社会。社会影响因子选取农业化学品投入量、距工矿距离和生境质量。农药化肥使用量的增加提高了耕地受面源污染的威胁程度^[29],综合各旗县氮肥和磷肥施用量、农药使用量及耕地面积,计算各旗县每公顷耕地的农业化学品投入量,并将其分

配至耕地栅格,实现空间化^[30],并用相等间隔法(间隔取 $5\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)进行分级;耕地与工矿距离越近意味着耕地受工矿污染胁迫越大,采用ArcGIS欧式距离工具测量工矿点位与每个耕地斑块的最近距离,输出空间化栅格结果,并参考文献^[31]进行分级处理;生境质量采用InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs)模型中的生境质量模块完成,该模块以人类活动对生态环境的影响为基础^[32],利用各土地覆被类型的生态敏感性与各环境威胁源的威胁强度评估生境质量,本文定义生境质量低的区域面临更大的景观生态风险^[33],并根据王乐志的研究^[34]进行风险分级。

(3)景观。景观影响因子选取景观分割指数(DIVISION)与平均斑块面积(AREA_MN)。耕地破碎化对耕地的利用效率存在显著的负面影响^[35],影响水平方向上的景观生态过程,增加耕地退化风险^[19]。景观分割指数表示耕地斑块的分离程度;平均斑块面积指耕地斑块的平均面积,能够指示耕地斑块的细碎程度;二者大小可以反映耕地斑块的破碎化程度^[36]。其计算及空间化利用Fragstats4.2软件的移动窗口法完成。为方便Fragstrats4.2软件运行处理,将耕地栅格数据重采样至250 m分辨率,再通过移动窗口法(窗口大小设置为 $1\text{ km} \times 1$

km)实现景观分割指数和平均斑块面积的空间量化。景观分割指数按相等间隔法(间隔取 0.2)分级;平均斑块面积采用自然断点法分级。

2.2.2 空间主成分分析

由于各生态风险影响因子间存在一定的相关性,所以通过空间主成分分析(Spatial Principal Component Analysis,SPCA)对各因子进行降维处理。空间主成分分析是对一组栅格波段执行主成分分析,通过对特征光谱空间坐标轴的旋转,将相关的多变量空间数据压缩为少数不相关的综合指标,消除冗余信息,实现高维变量的最佳综合和简化,并客观地确定各个因子的权重值^[37-38]。

本文将各生态风险影响因子栅格数据输入 ArcGIS 软件的主成分分析工具中,可获得各个主成分所对应的空间载荷图、主成分载荷矩阵以及各主成分的贡献率,并通过以上结果计算各因子权重值。累积贡献率达 90%的主成分被确定为有统计学意义的主成分,将具有统计学意义的主成分通过式(1)进行叠加分析^[31,39],以栅格网格为评价单元输出综合评价因子的生态风险评价结果。其表达式为

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a_{ij} F_j)$$
 (1)

式中: E 表示耕地景观生态风险综合评价结果; a_{ij} 表示第 i 个栅格对应的第 j 个主成分; F_j 表示第 j 个主成分的特征值贡献率; m 表示每个主成分中的栅格数量; n 表示主成分的个数。

2.2.3 生态修复重点区域识别

通过 ArcGIS 软件创建渔网工具,将研究区划分为 5 km×5 km 的格网(采样小区),统计每个格网内的耕地景观生态风险平均等级。由于具有高(低)值的点不一定是具有统计显著性的热(冷)点,所以本文用 ArcGIS 软件的热点分析工具识别耕地景观生态风险空间聚集特征。热点分析是通过对数据集集中的每一个要素进行 Getis-Ord G_i^* 统计,得到高值和低值要素在空间上发生聚集的位置,热点表示高值的显著聚集区,冷点表示低值的显著聚集区,这是当前应用最为广泛的局部空间自相关统计方法^[18-19]。该方法能更好地展示遭受生态风险威胁更严重的区域,而并非单独关注生态风险评估结果的绝对高低。

3 结果分析

3.1 耕地景观生态风险评价

3.1.1 景观生态风险影响因子

内蒙古耕地景观各生态风险影响因子分级空间

分布如图 2 所示。对 9 个影响因子进行空间主成分分析,共生成 9 个主成分、主成分特征值及贡献率(表 3)和主成分载荷矩阵(表 4),同时由前 6 个主成分的特征值和贡献率计算出各影响因子的权重(表 5)。由表 3 可知,前 6 个主成分的特征值累积贡献率大于 90%,即提取前 6 个主成分概括内蒙古耕地景观生态风险信息。从权重分析来看,9 个影响因子中,距工矿距离、平均斑块面积、景观分割指数、距水源距离和生境质量具有较高的权重值,分别为 0.217 8、0.174 8、0.161 3、0.144 3、0.130 5,也说明这些因子对内蒙古耕地景观生态风险影响较大。在指标类型上,自然、社会、景观因子的权重分别为 0.277 1、0.386 8、0.336 1,由此可见人为干扰和景观格局对耕地景观生态风险具有更大影响。

表 3 主成分特征值及其贡献率

Table 3 Eigenvalues and Contribution Rates of Principal Components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
主成分 1	0.115 2	31.0	31.0
主成分 2	0.071 2	19.2	50.2
主成分 3	0.063 4	17.1	67.3
主成分 4	0.043 2	11.6	78.9
主成分 5	0.029 7	8.0	86.9
主成分 6	0.023 0	6.2	93.1
主成分 7	0.010 7	2.9	96.0
主成分 8	0.008 5	2.3	98.2
主成分 9	0.006 5	1.8	100.0

景观破碎化的两个评价指标——景观分割指数、平均斑块面积权重高达 0.336 1,已经成为耕地景观生态风险第一威胁源。由图 2(h)、(i)可知,耕地景观破碎化风险严重的区域位于内蒙古南部呼和浩特、鄂尔多斯、赤峰等大型城市附近,这些区域建设用地扩张现象最为突出^[40],其景观破碎化与城镇化进程的加速密切相关。此外,大兴安岭山麓的耕地也存在较高破碎化风险,有研究表明退耕还林还草工程可能会造成区域耕地破碎化^[41],而大兴安岭山麓退耕还林还草工程的实施可能加剧了这一趋势^[42]。工矿污染对耕地景观威胁较大,工矿点位分布密集,与农业空间重叠度高,距离耕地近使得耕地大多存在工矿污染风险^[43]。距水源距离也存在较高权重值,这可能与内蒙古水资源供需矛盾有关,东部地区的水资源胁迫较小,西部除河套地区外,水资源具有较大胁迫,水资源的时空分布不均使得耕地与水源距离成为耕地安全的一大威胁。耕地景观的生境质量受周围环境影响较大,普遍较低,东部大

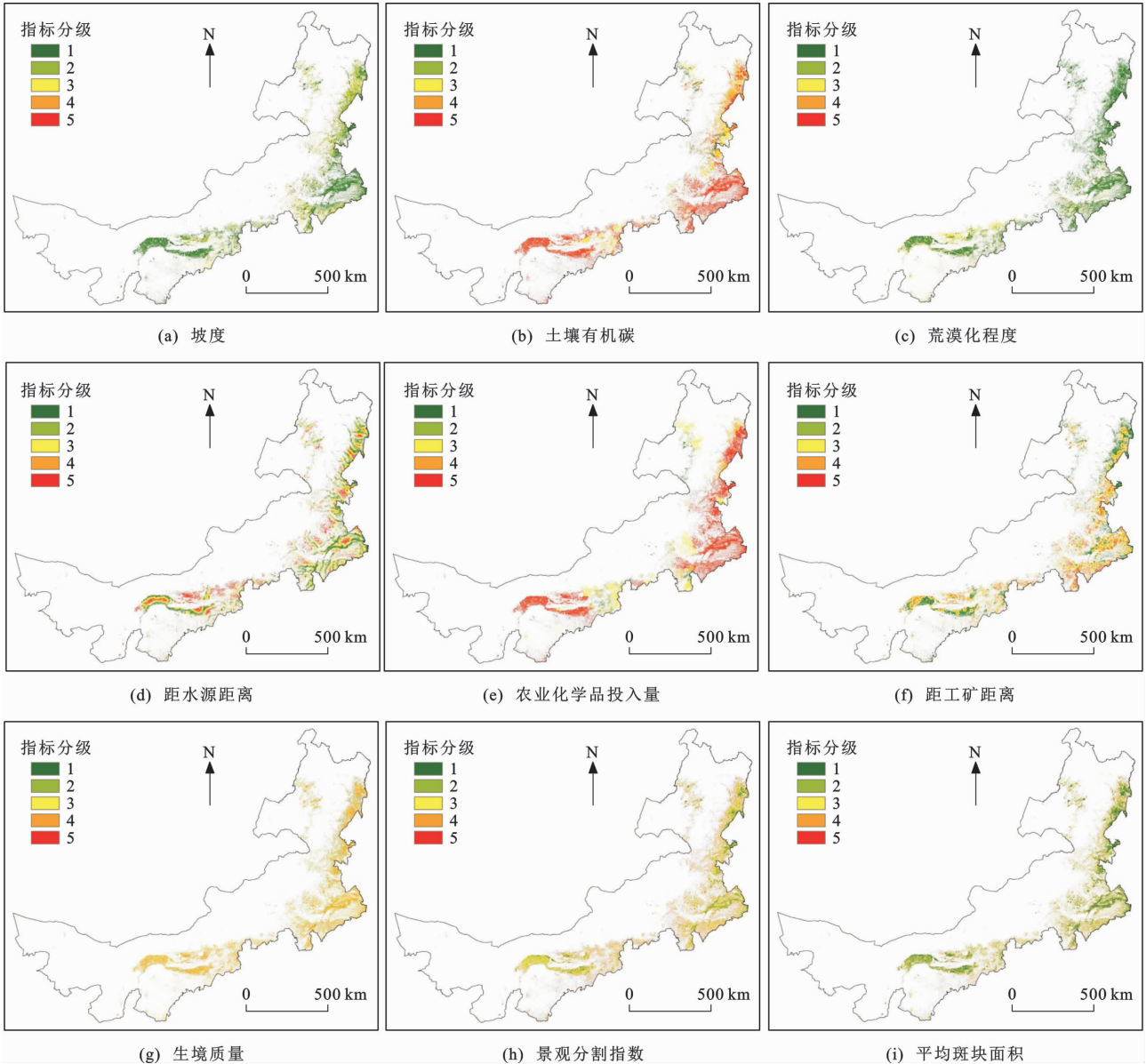


图 2 耕地景观生态风险影响因子分级空间分布

Fig. 2 Grading Spatial Distributions of Influence Factors for Landscape Ecological Risk of Cultivated Land

表 4 主成分载荷矩阵

Table 4 Load Matrix of Principal Components

评价因子	9 个主成分的载荷								
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6	主成分 7	主成分 8	主成分 9
坡度	0.118	0.039	0.028	−0.102	−0.190	0.071	0.964	0.050	0.010
土壤有机碳	−0.069	−0.080	0.052	0.497	0.637	−0.504	0.234	−0.159	0.012
荒漠化程度	0.094	0.053	0.001	0.075	0.164	−0.058	−0.019	0.975	−0.049
距水源距离	0.197	0.869	−0.416	0.155	−0.006	−0.048	−0.024	−0.080	−0.004
农业化学品投入量	−0.175	−0.095	−0.013	0.827	−0.421	0.309	0.005	0.049	0.022
距工矿距离	−0.002	0.420	0.902	0.042	−0.069	−0.035	−0.049	−0.018	−0.005
生境质量	−0.160	0.100	0.032	−0.014	0.586	0.783	0.073	−0.038	0.022
景观分割指数	0.645	−0.130	0.064	0.097	0.051	0.093	−0.069	−0.031	0.732
平均斑块面积	0.679	−0.152	0.067	0.131	0.058	0.133	−0.051	−0.104	−0.678

表 5 耕地景观生态风险影响因子权重

Table 5 Weights of Influence Factors for Landscape Ecological of Cultivated Land

指标类型	评价因子	权重
自然	坡度	0.009 5
	土壤有机碳	0.069 5
	荒漠化程度	0.053 8
	距水源距离	0.144 3
社会	农业化学品投入量	0.038 4
	距工矿距离	0.217 8
	生境质量	0.130 5
景观	景观分割指数	0.161 3
	平均斑块面积	0.174 8

兴安岭山麓区域靠近森林生境质量较好,其他耕地多位于农牧交错带或城市空间,生境质量较为低下。总之,耕地景观破碎化、工矿污染、水资源胁迫和生境质量差等四大因素对内蒙古耕地景观生态风险的影响权重高达0.828 7,保障未来的耕地安全需重点解决这四大生态问题。

3.1.2 耕地景观生态风险综合评价

通过式(1)对前 6 个主成分进行栅格叠加运算,并用自然断点法对输出栅格进行分级处理,所得即为内蒙古耕地景观生态风险评价分级空间分布(图 3)。综合评价结果的空间分布特征主要表现为:①耕地景观生态低风险和较低风险区域各占耕地总面积的13.46%和 25.07%,主要分布在嫩江流域右岸、西辽河流域沿岸地区以及河套—土默川平原,其分布较为集中,局部斑块面积大且完整[图 4(a)],多沿河流分布;②耕地景观生态中风险区域占耕地总面积的25.16%,分布零星,主要分布在呼伦贝尔、通辽、赤峰和兴安盟;③耕地景观生态较高风险和高风险区域各占内蒙古耕地总面积的 23.40% 和 12.91%,主要分布在赤峰、通辽、呼和浩特以及阴山一带,耕地景观总体分布零散,局部斑块破碎或是处于大面积耕地的边缘[图 4(b)]。出现上述特征的原因可能是破碎化的耕地与周围生态系统产生了过多的边缘效应,尤其是在工矿密集(阴山一带、赤峰南部)或是城市周边(呼和浩特、赤峰、通辽等)的耕地,其与周围环境交互作用强烈,边际效应的负向影响强烈,易受到诸如工矿污染、生境质量下降等生态风险威胁,进而影响农田生态系统的功能与稳定性^[44]。

3.2 生态修复分区

分析耕地景观生态风险的空间聚集特征,有助

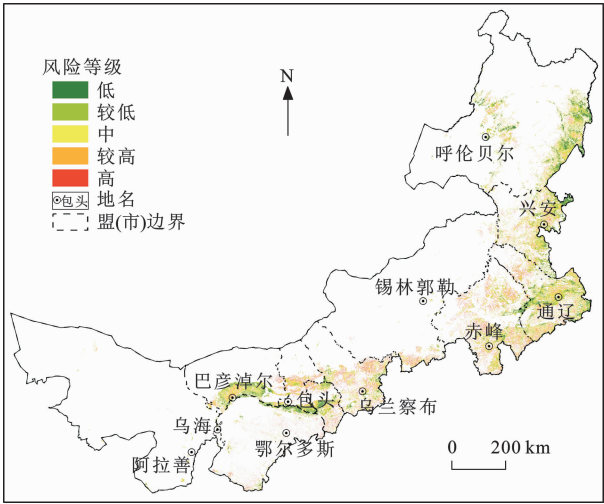


图 3 耕地景观生态风险评价分级空间分布

Fig. 3 Grading Spatial Distribution of Landscape Ecological Risk Assessment of Cultivated Land

于空间分区和生态修复,冷、热点识别结果如图 5 所示。大兴安岭沿麓、西辽河流域中东部、沿黄干流平原大部是显著的冷点区域。这些区域耕地斑块面积普遍较大、分布集中,景观破碎化程度低,距离水源地近,工矿污染风险相对较低,但局部地区仍存在农业化学品投入过量、土壤有机碳不足等问题。热点区域主要分布在内蒙古南部,自通辽北部,经赤峰、锡林郭勒盟、乌兰察布南部,沿阴山山麓至鄂尔多斯。这些区域耕地斑块面积通常较小且零碎,景观破碎化严重,受工矿污染威胁相对较大,且局部存在坡耕地、沙化等问题。

热点区域的耕地面积占比为 27.60%,是生态风险高值显著聚集区,需将实施耕地生态修复作为首要任务;冷点区域的耕地面积占比为 62.70%,是生态风险低值显著聚集区,可重点发展农业;不显著区域没有显著的生态风险高值聚集,空间上多位于冷点和热点区域之间,是缓冲地带,但仍然存在一定的生态风险,未来需在发展农业的同时加强生态风险监测与防范。因此,本文将热点区域内的耕地划分为重点修复区,不显著区域划分为农田保育区,冷点区域划分为农业发展区,分区详情如表 6 所示。

4 讨 论

景观生态风险的诊断与识别服务于保障生态安全的实践。利用遥感和 GIS 技术,在景观尺度上对耕地进行综合生态风险评价是研究区域耕地生态环境的有效手段。考虑到空间邻近效应^[45],若不对高值聚集区实施生态修复,可能会导致周围区域生态风险的加剧。本文基于Getis-Ord Gi* 热点分析进

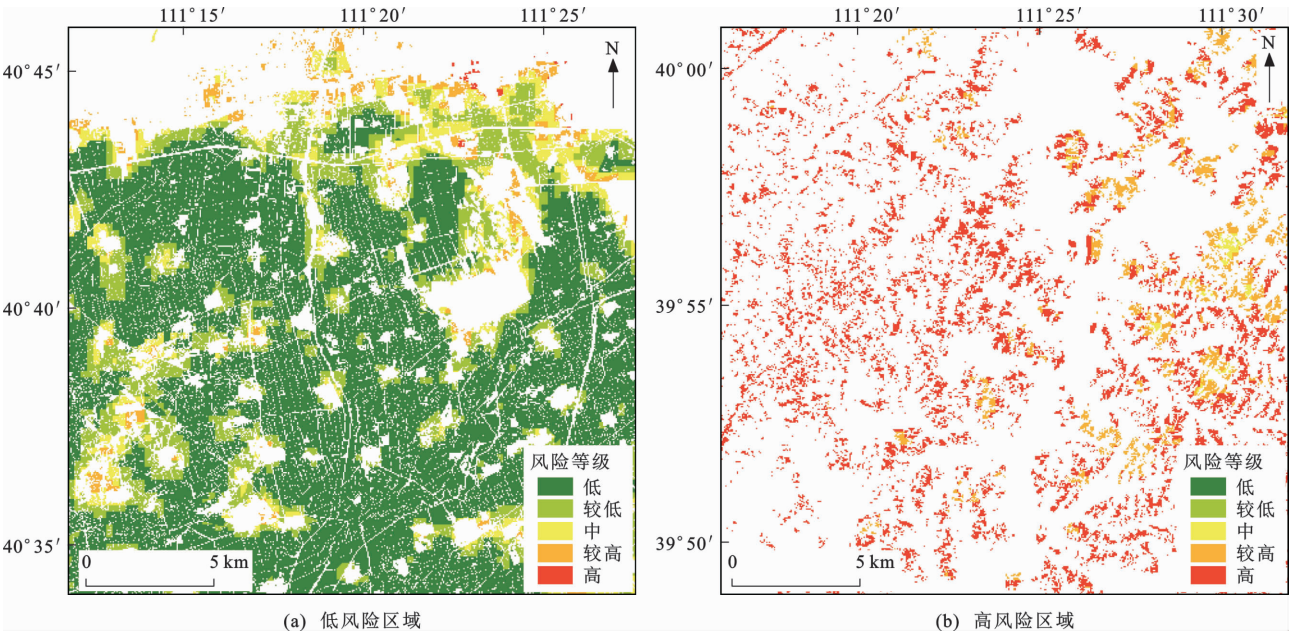


图 4 耕地景观生态风险低风险区域与高风险区域局部特征

Fig. 4 Local Characteristics of Low-risk and High-risk Areas of Landscape Ecological Risk of Cultivated Land

表 6 耕地生态修复分区面积占比

Table 6 Area Proportions of Ecological Restoration of Cultivated Land

冷、热点识别	分区	面积占比	面积占比合计
热点区域(99%置信度)	重点修复区	25.47%	27.60%
热点区域(95%置信度)	重点修复区	1.44%	
热点区域(90%置信度)	重点修复区	0.69%	
不显著区域	农田保育区	9.70%	9.70%
冷点区域(90%置信度)	农业发展区	0.88%	62.70%
冷点区域(95%置信度)	农业发展区	2.26%	
冷点区域(99%置信度)	农业发展区	59.57%	

行生态修复分区,确定了生态风险高值区和低值区在空间上发生聚类的位置,将原本分散、不便于管理的高值耕地斑块生成大的空间集聚区,有利于提高空间管理效率^[46],为保障区域未来的生态安全奠定了基础。当前景观生态风险评价对象多为行政区、流域尺度下的综合景观,而鲜有单独对耕地景观进行评估的研究^[5,39]。传统研究对耕地的生态风险评价多关注土壤侵蚀、重金属污染、面源污染等单一风险源^[5-7],但是农业生态系统作为特殊的“自然-社会”景观综合体,不仅受自然、人为因素影响强烈,景观格局对其生态过程的影响同样不可忽略。本文融合多源风险因子空间数据,将自然、社会、景观格局等 3 个因素纳入评价体系,使评价结果更具综合性。基于此结果进行生态修复分区,划定耕地生态修复的重点区域,能为未来耕地的可持续利用和农业绿色发展提供科学参考。但由于环境中影响因子众

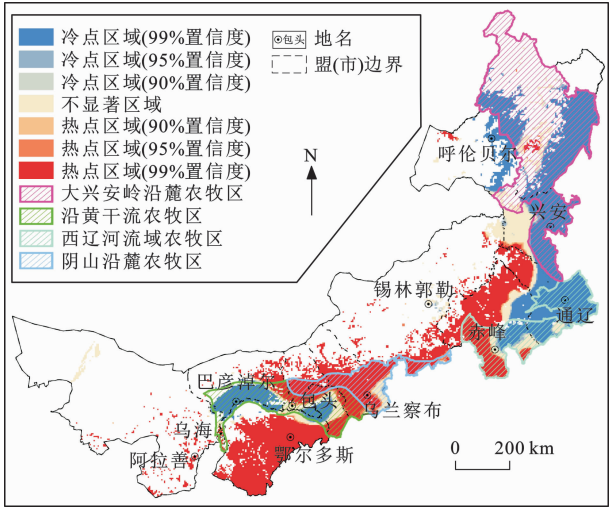


图 5 耕地景观生态风险空间聚集特征

Fig. 5 Spatial Aggregation Characteristics of Landscape Ecological Risk of Cultivated Land

多、相互作用复杂,一些指标存在难以实现空间量化的问题^[47],未来若要实现更加精确的评估,还需更多地结合研究区实际情况,进一步优化评价指标,或者完善空间化指标的获取途径。基于当前的耕地生态修复分区,结合内蒙古耕地质量现状,针对不同分区的管理对策作如下建议。

(1)在重点修复区管理针对耕地景观破碎化、工矿污染、水资源胁迫和生境质量差及土壤有机碳低的问题,开展如下生态修复:①降低耕地景观破碎化。调整耕地空间布局,引导破碎化耕地整合,推进土地流转和高标准农田建设^[20];对于不适宜耕作的

耕地逐步实施退耕还林还草工程。②解决工矿污染风险。加强监督管理,对废弃矿山实施生态修复,做好复垦、复绿工程;对现有矿山进行“绿色矿山”建设。③缓解水资源供需矛盾。加大农业节水灌溉工程建设,强化末级渠系的节水改造力度,推广喷、滴灌等高效节水灌溉技术,推广水肥一体化滴灌技术。④优化种植结构,推行轮作模式,改善养分循环;实施保护性耕作,推行少免耕、深耕等技术,增加秸秆覆盖还田比例^[48-49],提升土壤健康水平。

(2)在农田保育区重点防范生态风险扩散。具体对策建议如下:在区域内整合农田生态缓冲带、生态沟渠等生态修复技术,提高农业生态系统周围的林草覆盖率,通过源头控制和过程阻控,防控污染,提高其整体持续防护功能,提升农田生物多样性和生态系统服务功能^[50-51]。

(3)农业发展区由于暂不存在生态风险高值聚集现象,重点发展绿色农业、保障粮食安全,防控农业化学品投入过量、土壤有机碳下降。具体的管理对策建议如下:①推进高标准农田建设,推进农药化肥“双减”,促进农业化学品高效利用,降低农业面源污染风险;②优化种植结构,种养结合,改善养分循环,整合有机肥、秸秆还田等农田管理措施,改善土壤质量。

5 结 语

本文基于“自然-社会-景观”三维视角,结合内蒙古耕地景观特点,选取了耕地景观9个生态风险源,利用空间自相关分析对研究区耕地景观生态风险做出综合评价和重点生态问题的识别;通过热点分析进行生态修复分区并提出管理对策。

(1)内蒙古耕地景观生态风险是多因素共同影响的结果。相较于自然环境因素,人为干扰和景观格局因素对于耕地生态风险影响更大。从权重角度分析,耕地景观破碎化、工矿污染、水资源胁迫和生境质量差是内蒙古耕地面临的四大主要生态问题。

(2)内蒙古耕地分布集中、局部斑块面积大且完整,沿河流分布的区域生态风险较低;耕地分布零散,局部斑块破碎或是处于大面积耕地边缘的区域风险较高。

(3)内蒙古耕地景观生态风险存在显著的空间聚集现象。嫩江流域、西辽河流域、河套平原以及土默川平原西部是显著的冷点区域;热点区域主要分布在内蒙古南部。将热点区域划分为重点修复区,重点实施耕地破碎化整治、农田生态基础设施建设、

节水灌溉工程建设、退耕还林还草等生态修复工程;不显著区域划分为农田保育区,主要加强农田生态基础设施建设,扩大农业空间植被覆盖率;冷点区域划分为农业发展区,主要发展绿色农业,推进种养结合。

参 考 文 献:

References:

- [1] CHEN L L, ZHAO H S, SONG G, et al. Optimization of Cultivated Land Pattern for Achieving Cultivated Land System Security: A Case Study in Heilongjiang Province, China[J]. Land Use Policy, 2021, 108: 105-589.
- [2] 周忠学. 城市化背景下农业景观变化对生态服务影响:以西安都市圈为例[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 1004-1013.
ZHOU Zhong-xue. Impact of the Agricultural Landscape Change on Ecosystem Services in the Process of Rapid Urbanization Region: A Case Study of Xi'an Metropolitan Zone[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(5): 1004-1013.
- [3] ZHANG L, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Integrative Effects of Soil Tillage and Straw Management on Crop Yields and Greenhouse Gas Emissions in a Rice-wheat Cropping System[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 63: 47-54.
- [4] 张天华, 王 彤, 黄琼中, 等. 西藏高原拉萨河流域生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 9012-9020.
ZHANG Tian-hua, WANG Tong, HUANG Qiong-zhong, et al. Ecological Risk Assessment of Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 9012-9020.
- [5] LI K, WANG J, ZHANG Y. Heavy Metal Pollution Risk of Cultivated Land from Industrial Production in China: Spatial Pattern and Its Enlightenment[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154382.
- [6] 徐新良, 陈建洪, 张雄一. 我国农田面源污染时空演变特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 157-165.
XU Xin-liang, CHEN Jian-hong, ZHANG Xiong-yi. Analysis on the Spatiotemporal Evolution Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12): 157-165.
- [7] ZHANG J L, SHI D M, JIN H F, et al. Characteristics of Cultivated Layer Soil Shear Strength for Sloping Farmland in Response to Soil Erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2022, 215:

- 106304.
- [8] 肖 巍. 科尔沁沙地南缘退化耕地风沙危害状况[J]. 江西农业, 2019(12):84.
XIAO Wei, Damage of Aeolian Sand on Degraded Cultivated Land in the Southern Margin of Horqin Sandy Land[J]. Jiangxi Agriculture, 2019(12):84.
- [9] WANG X. Changes in Cultivated Land Loss and Landscape Fragmentation in China from 2000 to 2020[J]. Land, 2022, 11(5):684.
- [10] PENG J, ZONG M L, HU Y N, et al. Assessing Landscape Ecological Risk in a Mining City: A Case Study in Liaoyuan City, China [J]. Sustainability, 2015, 7(7):8312-8334.
- [11] 陈利顶, 吕一河, 赵文武, 等. 区域生态学的特点、学科定位及其与相邻学科的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(13):4593-4601.
CHEN Li-ding, LYU Yi-he, ZHAO Wen-wu, et al. The Characteristics and Subject Orientation of Regional Ecology and Its Relationship with the Other Subjects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13):4593-4601.
- [12] CHEN J, DONG B, LI H R, et al. Study on Landscape Ecological Risk Assessment of Hooded Crane Breeding and Overwintering Habitat[J]. Environmental Research, 2020, 187:109649.
- [13] RAN P L, HU S G, FRAZIER A E, et al. Exploring Changes in Landscape Ecological Risk in the Yangtze River Economic Belt from a Spatiotemporal Perspective[J]. Ecological Indicators, 2022, 137:108744.
- [14] CAO Q W, ZHANG X W, LEI D M, et al. Multi-scenario Simulation of Landscape Ecological Risk Probability to Facilitate Different Decision-making Preferences[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227:325-335.
- [15] LIU L, SONG W, ZHANG Y J, et al. Zoning of Ecological Restoration in the Qilian Mountain Area, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23):12417.
- [16] 苏 珊, 姚爱静, 赵庆磊, 等. 国家公园自然资源保护分区研究: 以北京长城国家公园体制试点区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(22):8319-8326.
SU Shan, YAO Ai-jing, ZHAO Qing-lei, et al. Natural Resource Protection Zoning in a Pilot Area of the Beijing Great Wall National Park System[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22):8319-8326.
- [17] CHEN J, XIAO H B, LI Z W, et al. Threshold Effects of Vegetation Coverage on Soil Erosion Control in Small Watersheds of the Red Soil Hilly Region in China[J]. Ecological Engineering, 2019, 132:109-114.
- [18] 高 建, 李 彤, 贾宝全, 等. 生态用地空间稳定性及其格局分析: 以咸阳市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(23):9843-9856.
GAO Jian, LI Tong, JIA Bao-quan, et al. Ecological Land and Its Spatial Stability Analysis: Taking Xianyang City as an Example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9843-9856.
- [19] XU Z H, PENG J, DONG J Q, et al. Spatial Correlation Between the Changes of Ecosystem Service Supply and Demand: An Ecological Zoning Approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 217:104258.
- [20] 隋虹均, 宋 戈, 高 佳. 东北黑土区典型地域耕地生态退化时空分异: 以富锦市为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9):2277-2291.
SUI Hong-jun, SONG Ge, GAO Jia. Spatio-temporal Differentiation of Cultivated Land Ecological Degradation in Typical Black Soil Regions of Northeast China: A Case Study of Fujin City [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9):2277-2291.
- [21] 内蒙古自治区自然资源厅. 内蒙古自治区国土空间生态修复规划(2021~2035 年)[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区自然资源厅, 2022.
Department of Natural Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. Territorial Space Ecological Restoration Planning of Inner Mongolia Autonomous Region(2021—2035)[R]. Huhhot: Department of Natural Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, 2022.
- [22] 彭 建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(4):664-677.
PENG Jian, DANG Wei-xiong, LIU Yan-xu, et al. Review on Landscape Ecological Risk Assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4):664-677.
- [23] EL KATEB H, ZHANG H F, ZHANG P C, et al. Soil Erosion and Surface Runoff on Different Vegetation Covers and Slope Gradients: A Field Experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. Catena, 2013, 105:1-10.
- [24] WITZGALL K, VIDAL A, SCHUBERT D I, et al. Particulate Organic Matter as a Functional Soil Component for Persistent Soil Organic Carbon[J]. Nature Communications, 2021, 12:4115.
- [25] 赵媛媛, 高广磊, 秦树高, 等. 荒漠化监测与评价指标研究进展[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(5):81-87.
ZHAO Yuan-yuan, GAO Guang-lei, QIN Shu-gao, et al. Desertification Detection and the Evaluation Indicators: A Review[J]. Journal of Arid Land Resources

- and Environment, 2019, 33(5): 81-87.
- [26] 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等. 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3774-3782.
- ZHOU Shu-qin, JING Yao-dong, ZHANG Qing-feng, et al. Vegetation Landscape Pattern Change and Characteristics of Spatial Distribution in South Edge of Mu Us Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3774-3782.
- [27] 特力格尔, 那仁满都拉, 郭恩亮, 等. 锡林郭勒盟 2000~2019 年土地荒漠化及对气候因子的响应[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2021, 37(1): 42-47.
- TELIGEER, NARENMANDULA, GUO En-liang, et al. Land Desertification and Its Response to Climatic Factors in Xilin Gol League from 2000 to 2019[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2021, 37(1): 42-47.
- [28] 潘竟虎, 刘 晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126-3136.
- PAN Jing-hu, LIU Xiao. Assessment of Landscape Ecological Security and Optimization of Landscape Pattern Based on Spatial Principal Component Analysis and Resistance Model in Arid Inland Area: A Case Study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126-3136.
- [29] 孙婧雯, 刘彦随, 戈大专, 等. 平原农区土地综合整治与乡村转型发展协同机制[J]. 地理学报, 2022, 77(8): 1971-1986.
- SUN Jing-wen, LIU Yan-sui, GE Da-zhuan, et al. Co-ordinated Mechanism Between Comprehensive Land Consolidation and Rural Transformation Development in Plain Agricultural Areas of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(8): 1971-1986.
- [30] 张勇荣. 基于空间量化模型的人类活动强度对喀斯特筑坝河流水质影响研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- ZHANG Yong-rong. Effects of Intensity of Human Activities on Water Quality of River of Karst Damming Based on the Spatial Quantitative Model[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [31] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 等. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3940-3951.
- ZHANG Xue-mao, DONG Ting-xu, DU Hua-ming, et al. Optimization of Landscape Pattern in Fujiang River Basin Based on Landscape Ecological Risk Assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3940-3951.
- [32] ZHANG X R, SONG W, LANG Y Q, et al. Land Use Changes in the Coastal Zone of China's Hebei Province and the Corresponding Impacts on Habitat Quality[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 104957.
- [33] ANESEYEE A B, NOSZCZYK T, SOROMESSA T, et al. The InVEST Habitat Quality Model Associated with Land Use/Cover Changes: A Qualitative Case Study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1103.
- [34] 王乐志. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖流域土壤保持和生境质量变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- WANG Le-zhi. Research on Soil Conservation and Habitat Quality Changes in Poyang Lake Basin Based on InVEST Model[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [35] RAHMAN S, RAHMAN M. Impact of Land Fragmentation and Resource Ownership on Productivity and Efficiency: The Case of Rice Producers in Bangladesh[J]. Land Use Policy, 2009, 26(1): 95-103.
- [36] 尹登玉, 张全景, 翟腾腾. 基于景观指数的耕地细碎化空间特征研究[J]. 国土资源情报, 2017(11): 30-38.
- YIN Deng-yu, ZHANG Quan-jing, ZHAI Teng-teng. Study on the Spatial Characteristics of Cultivated Land Fragmentation Based on the Landscape Index[J]. Land and Resources Information, 2017(11): 30-38.
- [37] CHANG Y, HOU K, WU Y P, et al. A Conceptual Framework for Establishing the Index System of Ecological Environment Evaluation: A Case Study of the Upper Hanjiang River, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105568.
- [38] WEI S M, PAN J H, LIU X. Landscape Ecological Safety Assessment and Landscape Pattern Optimization in Arid Inland River Basin: Take Ganzhou District as an Example[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2020, 26(3): 782-806.
- [39] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- LI Qing-pu, ZHANG Zheng-dong, WAN Lu-wen, et al. Landscape Pattern Optimization in Ningjiang River Basin Based on Landscape Ecological Risk Assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1420-1437.

- [40] 翟 俊,邵全琴,刘纪远. 内蒙古高原土地利用/覆被变化对气温变化的影响分析[J]. 自然资源学报, 2014,29(6):967-978.
ZHAI Jun, SHAO Quan-qin, LIU Ji-yuan. Impact Analysis of Climate Change from Land Use/Cover Change in Inner Mongolia Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(6):967-978.
- [41] 张 婷,侍 昊,徐雁南,等. 退耕还林对喀斯特地区土地利用景观格局影响的量化评价[J]. 北京林业大学学报,2015,37(3):34-43.
ZHANG Ting, SHI Hao, XU Yan-nan, et al. Quantitative Evaluation on the Impact of the Sloping Land Conversion Program on Landscape Pattern of Land Use in Karst Area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015,37(3):34-43.
- [42] 李慧杰,王 兵,牛 香. 大兴安岭南麓山区退耕还林工程生态系统服务功能空间格局研究[J]. 温带林业研究,2019,2(4):23-29.
LI Hui-jie, WANG Bing, NIU Xiang. Ecological Benefit Assessment of Grain for Green Project in the Southern Piedmont Region of Daxing'an Mountains [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2019,2(4):23-29.
- [43] 丁青坡,李孟楠. 农牧交错带工矿废弃地生态修复为人工牧草地的可行性研究:以阿鲁科尔沁旗绍根镇乌丹陶海矿区为例[J]. 西部资源,2021(5):57-59.
DING Qing-po, LI Meng-nan. Study on the Feasibility of Ecological Restoration of Abandoned Industrial and Mining Land into Artificial Grassland in Agro-pastoral Ecotone: A Case Study of Wudan Taohai Mining Area in Shaogen Town, Alukelqin Banner[J]. Western Resources, 2021(5):57-59.
- [44] 张国剑. 生态用地吸收雾霾服务价值时空变异研究:以环杭州湾城市群为例[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017.
ZHANG Guo-jian. Spatial and Temporal Variations of Ecosystem Service Value in Haze Absorption by Ecological Land: A Case Study of the Urban Agglomeration Around Hangzhou Bay, China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [45] SCHRÖTER M, REMME R P. Spatial Prioritisation for Conserving Ecosystem Services: Comparing Hot-spots with Heuristic Optimisation [J]. Landscape Ecology, 2016,31(2):431-450.
- [46] 占 瀚,于 洋,吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J]. 生态学报,2021,41(18):7260-7272.
ZHAN Tian, YU Yang, WU Xiu-qin. Supply-demand Spatial Matching of Ecosystem Services in the Huangshui River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(18):7260-7272.
- [47] 李航鹤,马腾辉,王 坤,等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020,36(8):1036-1045.
LI Hang-he, MA Teng-hui, WANG Kun, et al. Construction of Ecological Security Pattern in Northern Peixian Based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020,36(8):1036-1045.
- [48] 张四海,曹志平,张 国,等. 保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2012,21(2):199-205.
ZHANG Si-hai, CAO Zhi-ping, ZHANG Guo, et al. Effects of Conservation Tillage on Soil Organic Carbon Pool [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(2):199-205.
- [49] SOSIBO N Z, MUCHAONYERWA P, DUBE E, et al. Soil Carbon and Phosphorus After 40 Years of Contrasting Tillage and Straw Management in Dryland Wheat Production Under Semi-arid Temperate Climate[J]. Land, 2022,11(8):1305.
- [50] 刘云慧,宇振荣,罗 明. 国土整治生态修复中的农业景观生物多样性保护策略[J]. 地学前缘, 2021,28(4):48-54.
LIU Yun-hui, YU Zhen-rong, LUO Ming. Strategies for Biodiversity Conservation in Agricultural Landscape During Land Rehabilitation and Ecological Restoration[J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(4):48-54.
- [51] 刘云慧,张 鑫,张旭珠,等. 生态农业景观与生物多样性保护及生态服务维持[J]. 中国生态农业学报, 2012,20(7):819-824.
LIU Yun-hui, ZHANG Xin, ZHANG Xu-zhu, et al. Ecoagricultural Landscape for Biodiversity Conservation and Ecological Service Maintenance[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012,20(7):819-824.