

东北黑土带土地利用变化特征及生态敏感性评价

晋一然, 澹腾辉, 唐琪, 华丽, 郭忠录

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 东北黑土带是我国重要的商品粮生产基地, 土壤质量退化、水土流失等问题直接影响生态与粮食供给安全, 为明晰东北黑土带土地利用变化特征及评价生态敏感性, 以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年东北黑土带 5 期土地利用数据为基础, 采用转移矩阵、地理探测器、综合生态风险评价等方法, 研究景观格局及生态风险变化趋势。结果表明: (1) 2000—2020 年, 研究区未利用地面积增加 1 035.7 km², 水域面积减少 975.8 km², 土地利用变化最明显, 耕地是阶段性变化较为剧烈的土地利用方式; (2) 不同自然因子对研究区土地利用方式的解释力存在显著差异, 气温是土地利用方式变化的主导因素, 风速与高程、气温、蒸发量、地温、气压、相对湿度、日照时间的交互作用对土地利用方式变化具有显著的协同增强作用; (3) 随时间推移, 研究区生态敏感性整体改善, 高度敏感区域减少, 轻度敏感区域增加, 并且出现生态敏感高值区向北移动、低值区向南移动趋势, 研究区生态敏感性高值区的形成可能与以风蚀为主的侵蚀作用有关。宏观尺度景观格局变化分析与生态风险评价对区域生态环境保护政策制定及实施具有重要意义。

关键词: 土地利用变化; 地理探测器; 生态风险评价; 聚类分析; 东北黑土带

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0341-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2023.06.043

Land Use Change Characteristics and Ecological Sensitivity Evaluation in the Black Soil Belt in Northeast China

JIN Yiran, TAN Tenghui, TANG Qi, HUA Li, GUO Zhonglu

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: The Northeast Black Soil Belt is a crucial commercial grain production base in China, in recent years, soil quality degradation, soil erosion and other issues have a direct impact on the security of ecology and security of food supply. In order to clarify the characteristics of land use change and evaluate the ecological sensitivity of the Northeast Black Soil Belt, we take the five periods of land use data of the Northeast Black Soil Belt in the years of 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020 as the basis, and use the methods such as transfer matrices, geodetector, and comprehensive ecological risk evaluation to study the landscape pattern and ecological risk change trends. The results were as follows: (1) During the period of 2000—2020, unused land and water land use in the study area changed most obviously, increasing and decreasing by 1 035.7 and 975.8 km², respectively, and arable land was the land use with more drastic changes in phases; (2) Different natural factors exhibited significant differences in explaining land use types in the study area. Temperature was the dominant factor influencing land use changes, while wind speed showed significant synergistic enhancement when interacting with elevation, temperature, evaporation, geothermy, atmospheric pressure, humidity and daylight duration factors in land use changes. (3) Over time, the overall ecological sensitivity of the study area has improved. Highly sensitive regions had decreased, mildly sensitive regions had increased. Additionally, there was a trend of high-value ecological sensitivity areas moving northward and low-value areas moving southward, the high-value ecological sensitivity regions may be related to erosion which dominated by wind erosion. The analysis of macro-scale landscape pattern changes and ecological risk assessment are of great significance to the formulation and implementation of regional ecological environmental protection policies.

收稿日期: 2023-06-07

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500803)

第一作者: 晋一然 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与 GIS 空间分析研究。E-mail: Ulisses623@163.com

通信作者: 郭忠录 (1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与土壤质量研究。E-mail: zlguohzau@163.com

Keywords: land use change; Geodetector; ecological risk assessment; cluster analysis; the black soil belt in Northeast China

21 世纪以来,随着经济快速发展,人类对生活空间的需求也在随之增长,其中最为明显的特征是土地利用方式的转变^[1]。在土地利用方式变化的过程中,往往出现生态空间被挤压、生态过程被干扰的现象,导致水土流失、生物多样性下降等一系列问题产生。党的二十大报告强调,必须牢固树立与践行生态环境保护的理念与措施,站在人与自然和谐共生的角度谋求发展。东北黑土带是中国重要的粮食生产基地,但耕地、建设用地对林地、草地的侵占导致生态用地占比下降,人类改变土地利用方式严重制约自然生态系统发挥其应有的功能。因此,进行景观生态风险评估可以将区域已存在或潜在生态风险可视化^[2],为进一步生态环境保护与优化工作提供科学依据。

景观生态风险评价指以景观格局指数为依据,建立区域景观结构与生态过程间的相关关系,反映此区域景观格局中的生态风险^[3]。不同于传统生态风险评价,景观生态风险评价在景观生态过程与空间格局的耦合机制下,更注重风险的时空异质性与尺度效应所产生的结果,成为区域生态风险评价的重要部分^[4]。国外研究集中于探究生态过程与空间分布格局间的关联,有学者^[5-6]通过结合生态指标与其他指标,建立基于生态视角的评价体系,也有学者^[7-8]在物种群落层面研究特定种群对生态系统的敏感性及其响应机制;国内有学者^[9]针对黄土高原生态环境恶化现状,使用地理探测器探究植被覆盖度与地理因子的耦合机制;诸多学者针对国内东北沙地^[10]、青藏高原^[11]等进行生态风险评估,探究不同自然本底下的生态风险时空分异规律,为宏观生态环境治理提供参考依据。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,以生态视角进行区域环境风险评估具有重要意义。松嫩平原地处我国东北内陆,与大、小兴安岭以及长白山脉接壤,中部地势平缓,边缘地势起伏多变,生态环境极易发生变化。以东北黑土带作为研究区,探究 2000—2020 年间土地利用时空分异及驱动因素,进一步结合景观指数与土壤流失量进行生态敏感性评价,揭示生态风险时空特征,为松嫩平原生态环境保护以及水土流失防治提供理论支撑,为我国东北黑土区科学管理规划提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国东北典型黑土区包括蒙东黑土区、松嫩黑钙土区、松嫩典型黑土区(即东北黑土带)与三江黑土区,研究区(42°58′—50°15′N,122°22′—127°59′E)位

于东北黑土带^[12](图 1)。东北黑土带位于松嫩平原东部,总面积 10.1 km²,北至大、小兴安岭,南至长白山脉,地貌类型主要由较低海拔的台地(即漫川漫岗)构成,西北、东北以及南部存在低海拔丘陵^[13]。气候类型属温带大陆性气候,年降水量 400~600 mm,年均气温 2~6℃,土地利用方式以耕地为主,是中国商品粮生产基地之一。研究区主要位于全国水土保持区划表(试行)二级区划中,由北到南分别为大兴安岭东南低山丘陵水土保持区、东北漫川漫岗水土保持区(黑龙江省)、东北漫川漫岗水土保持区(吉林省)。

1.2 数据来源

使用 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用、高程、坡度、气象数据(年降水量、年均气温、年均相对湿度、0 cm 年均地温、年日照时间、年蒸发量、年均气压、年均风速)、土壤侵蚀数据以及研究区基础信息数据。土地利用数据与气象数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),其中,土地利用数据分辨率为 30 m×30 m,对原始数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地一级地类,气象数据分辨率为 1 km×1 km;高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m×30 m;坡度数据使用 ArcGIS Pro 软件以 DEM 数据为基础进行计算提取。

1.3 研究方法

1.3.1 风险小区划分 为更准确地计算各区域具体景观生态指数,根据研究目的,将研究区划分为风险小区进行生态风险评估,参考前人^[14]研究并结合区域尺度及数据精度,最终将研究区划分为 1.5 km×1.5 km 的格网,基于 ArcGIS 软件进行采样提取,并使用 Fragstats 软件进行景观指数计算。

1.3.2 地理探测器 地理探测器以统计学原理为基础,探究事物间的空间分异性并揭示其背后的驱动因素,包括因子探测、风险探测、交互探测、生态探测 4 种探测模式。选用因子探测和交互探测来解析影响研究区土地利用方式的自然因子,因子探测公式为:

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

式中: q 为地理因子的解释力(%),取值范围为[0,1], q 值越大,说明地理因子对土地利用方式的解释力越大; L 为因变量或地理因子的分区分类; h 为分区变量($h=1, \dots, L$); N_h 和 σ_h^2 分别为研究区整体的单元数和方差。 q 交互探测用于识别地理因子间的交互作用,评估 2 个

地理因子共同作用时是否增加或减弱对土地利用方

式的解释力,或对其影响是相互独立的。

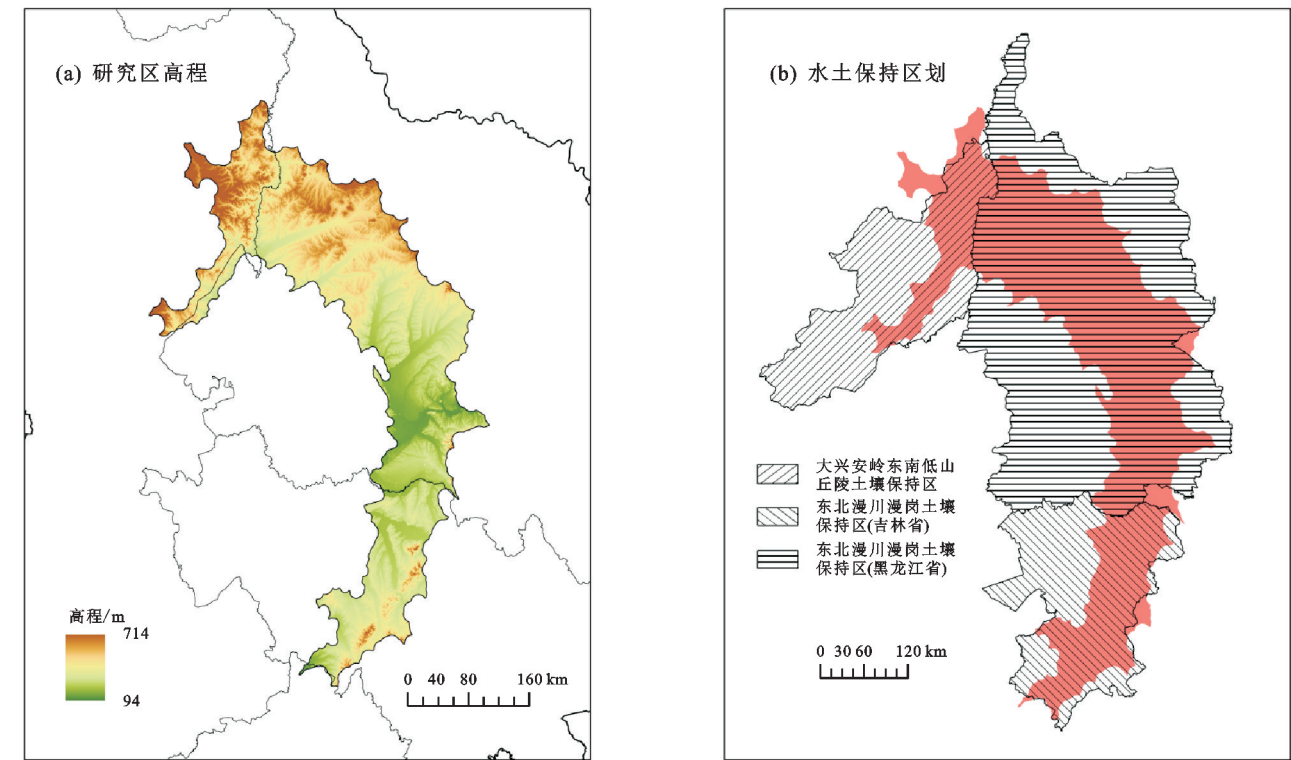


图 1 研究区概况

1.3.3 景观生态风险指数 景观生态风险指数(ecological risk index, ERI)用来反映外界环境对不同景观类型的影响程度,不同景观类型对区域生态环境的作用存在差异。使用景观结构反映研究区生态风险敏感性,表达式为:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \tag{2}$$

$$R_i = E_i \times V_i \tag{3}$$

$$E_i = aC_i + bN_i + cF_i \tag{4}$$

式中:ERI_i为第*i*类景观生态风险指数;*n*为景观类型;*A_{ki}*为第*k*个风险小区中第*i*类景观类型的面积;*A_k*为第*k*个风险小区总面积;*R_i*为景观损失度指数;*E_i*为景观干扰度指数;*V_i*为景观脆弱指数,在借鉴前人研究成果^[15]的基础上采用专家打分法^[14],将景观类型的易损度分为 6 级,荒地、草地、耕地、林地、水域、建设用地分别为 6,5,4,3,2,1,并进行归一化得到景观脆弱度指数的权重;*C_i*为景观破碎度指数;*N_i*为景观分离度指数;*F_i*为景观分维数指数;*a*、*b*、*c*分别为*C_i*、*N_i*和*F_i*的权重,且*a*、*b*、*c*之和为 1,结合实际情况分别赋值为 0.5,0.3 和 0.2。

1.3.4 水土流失敏感性指数 采用修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)计算的土壤流失量表征水土流失敏感性,其表达式为:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \tag{5}$$

式中:*A*为土壤侵蚀量[t/(hm²·a)];*R*为降水侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];*K*为土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(hm²·a·MJ·mm)];*LS*为地形起伏度因子(无量纲);*C*为植被覆盖因子(无量纲);*P*为水土保持措施因子(无量纲)。

1.3.5 综合生态敏感性指数 通过计算其他点到敏感性最高点之间的距离来构建综合生态敏感性指数(comprehensive ecological sensitivity index, CESI),指数越小,则表示生态敏感性越高。生态敏感性最高点以景观生态风险敏感性指数、水土流失敏感性指数各自归一化后的最大值表示。计算公式为:

$$CESI = \sqrt{(ERI - ERI_{\max})^2 + (A - A_{\max})^2} \tag{6}$$

式中:ERI为像元的景观生态风险敏感性指数;*A*为像元的水土流失敏感性指数。

1.3.6 空间自相关分析 空间自相关分析可以衡量空间数据之间的相互依赖程度。使用全局 Moran's *I* 指数与局部 Moran's *I* 指数对研究区综合生态敏感性空间特征进行分析,公式为:

全局 Moran's *I* 指数:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{7}$$

局部 Moran's *I* 指数:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \tag{8}$$

式中: I 代表 Moran's I 指数; x_i, x_j 代表第 i, j 个格网的综合生态敏感性指数均值; $\bar{x}$ 为全部格网敏感性均值; w_{ij} 为生态敏感性空间邻接权重; S 为空间权重矩阵之和。全局 Moran's I 指数采用 Z 检验, 当 $|Z| > 2.58$ 时, 说明通过 $p < 0.01$ 显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土地利用空间格局变化

东北黑土带 2000—2020 年土地利用空间格局未发生较大变化, 具有较为明显的空间差异性。总体来看, 2000—2020 年研究区内耕地、林地、水域 3 类土地利用面积占比呈下降趋势, 水域、耕地面积变化较大, 分别减少 975.8, 727.1 km², 林地面积减少 172.9 km²; 草地、建设用地、未利用地 3 类土地利用面积占比呈上升趋势, 未利用地、建设用地面积变化较大, 分别增加 1 035.7, 791.2 km², 草地面积增加 48.9 km²; 水域面积下降幅度最大, 其中 110.2 km² 净转化为耕地, 942.0 km² 净转化为未利用地; 东北黑土带中扎兰屯市、绥化市、齐齐哈尔市、黑河市以及松原市耕地面

积呈上升趋势, 阿荣旗、鄂伦春自治旗、莫力达瓦达斡尔族自治旗、哈尔滨市、四平市以及长春市耕地面积呈下降趋势(图 2, 图 3)。分时段来看, 研究区在 2000—2005 年、2010—2015 年土地利用方式未发生明显变化, 2000—2005 年未利用地面积降幅最大, 减少 105 km², 2010—2015 年耕地减少面积最多, 减少 80.4 km², 2 个时期内面积增加最多的均为建设用地, 分别增加 98.7, 159.9 km²。2005—2010 年、2015—2020 年研究区土地利用方式变化剧烈, 2005—2010 年, 研究区北部出现聚集状土地利用变化, 南部土地利用变化分布相对均匀, 净转化量最大的为草地与耕地, 分别增加、减少 931.9, 930.5 km², 转入转出变化最大的为耕地, 耕地转为草地 2 112.3 km², 林地转为耕地 1 875.8 km²。2015—2020 年, 研究区南部出现小规模聚集性转化, 北部转化分布则相对均匀, 净转化量最大的为未利用地与水域, 分别增加、减少 1 285.2, 1 644.5 km², 转入转出变化最大的为耕地, 耕地转为未利用地 1 711.8 km², 草地转为耕地 2 066.8 km²。

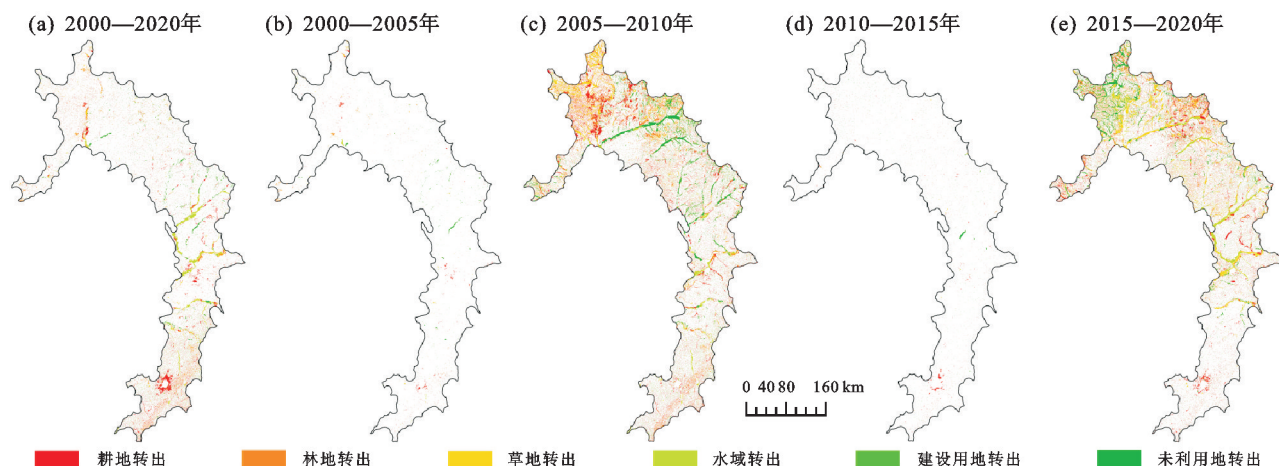


图 2 2000—2020 年土地利用方式转移

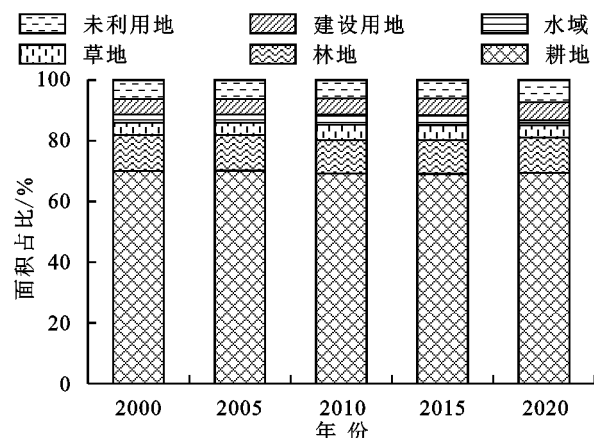


图 3 2000—2020 年各土地利用方式占比

2.2 地理因子对土地利用格局变化的贡献

从自然条件角度分析, 选取高程、坡度、年均气温、年蒸发量、年均地温、年降水量、年均气压、年均相对湿度、年日照时间、年均风速 10 个自然因子, 利用

自然间断点法进行分类, 使用地理探测器模型计算自然因子对土地利用方式的解释力。

因子探测结果(表 1)表明, 东北黑土带的自然因子对土地利用方式的解释力(%)从大到小依次为年均气温(1.49) > 年均相对湿度(1.29) > 年均地温(1.15) > 年日照时间(1.04) > 年蒸发量(0.99) > 年均气压(0.84) > 高程(0.51) > 年均风速(0.35) > 坡度(0.27) > 年降水量(0.07)。其中, 年均气温、年均相对湿度、年均地温和年日照时间对土地利用方式的解释力 > 1%, 为主要驱动因子, 年蒸发量、年均气压、高程的解释力 > 0.5%, 为次要驱动因子, 年均风速的因子解释力相对较弱, 坡度、年降水量未通过 0.05 显著性检验。

根据交互探测结果(表 2), 选取主要驱动因子与次要驱动因子间探测结果发现, 高程 ∩ 年均气压、高程 ∩ 年日照时间与年均气温 ∩ 年均气压表现为非线性

性增强,其余因子交互探测结果表现为双因子增强。年均气温与各因子交互探测的解释力除年均地温外,均大于其余因子间交互探测的解释力,年蒸发量、年均气压、高程与不同因子间的交互探测解释力相比其

单因子解释力有较为明显的提高,年均风速与各因子交互作用结果均表现为非线性增强。不同自然因子对研究区土地利用方式空间分布的影响差异较为显著,且因子间存在增强影响效果的协同作用。

表 1 地理探测器因子探测结果 单位:%

	DEM	TEM	EVP	GST	PRE	PRS	RHU	SLOPE	SSD	WIN
<i>q</i> statistic	0.51	1.49	0.99	1.15	0.07	0.84	1.29	0.27	1.04	0.35
<i>P</i> value	0	0	0	0	0.602	0	0	0.139	0	0.001

表 2 地理探测器交互探测结果 单位:%

	DEM	TEM	EVP	GST	PRS	RHU	SSD	WIN
DEM	—	—	—	—	—	—	—	—
TEM	1.87 [*]	—	—	—	—	—	—	—
EVP	1.42 [*]	2.26 [*]	—	—	—	—	—	—
GST	1.56 [*]	2.15 [*]	2.06 [*]	—	—	—	—	—
PRS	1.44 [#]	2.40 [#]	1.76 [*]	2.00 [*]	—	—	—	—
RHU	1.70 [*]	2.17 [*]	1.92 [*]	2.14 [*]	1.18 [*]	—	—	—
SSD	1.62 [#]	2.35 [*]	1.77 [*]	1.93 [*]	1.56 [*]	1.95 [*]	—	—
WIN	1.10 [#]	2.13 [#]	2.03 [#]	2.37 [#]	1.35 [#]	2.14 [#]	2.02 [#]	—

注: * 表示双因子增强,即 $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$; # 表示非线性增强,即 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$; — 表示无数值。

2.3 生态敏感性时空变化特征分析

2.3.1 单一指标生态敏感性时空变化特征 本研究将单因子指标归一化,采用自然间断点法进行分级,得到各生态指标敏感性时空分布图。

由图 4 可知,研究区景观生态风险敏感性分布呈北高南低的模式,高敏感区集中分布在研究区北部大、小兴安岭山地丘陵与松嫩平原的交错地带,地形较为复杂,土地开发利用受到的限制条件较多,景观系统分布较为破碎;长白山脉与松嫩平原交汇处整体高程变化不大,以平原、台地和低丘陵为主^[16],地势

较为单一,景观系统种类丰富且分布均匀,导致其景观生态风险敏感性较低。2005—2010 年间,研究区景观生态风险敏感性呈下降趋势,主要表现为北部高敏感区范围缩小,南部较高敏感区转变为中、低敏感区;2015—2020 年间,研究区北部高敏感区由聚集状向条带状转化,存在向中部移动的趋势。总体而言,2000—2020 年研究区景观生态风险敏感性存在显著的阶段性变化,敏感性与地势的空间分布一致,地势较为复杂的区域敏感性较高。

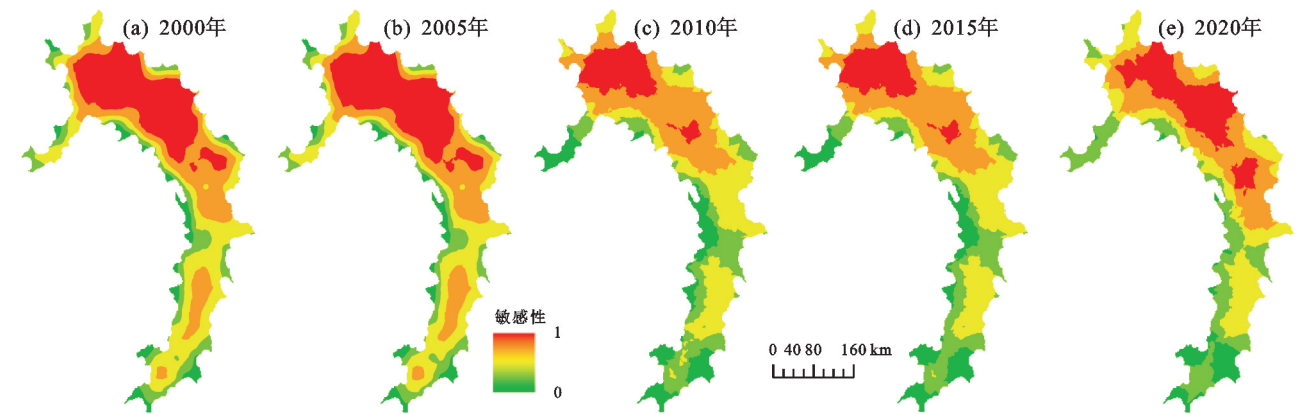


图 4 2000—2020 年景观生态风险敏感性分布

研究区水土流失敏感性时空变化(图 5)表明,水土流失敏感性空间分布受到年降水量、高程的影响,研究区南北两端水土流失敏感度相对较高。由于大兴安岭、小兴安岭与长白山脉海拔较高,阻挡水汽输送,研究区内形成了 3 个年降水量高值区,分布于研究区北部、中部和南部,年降水量高值区中存在山地丘陵与平原的过渡地带,地形较为复杂,高程变化较

大。上述区域长期受降水径流冲刷,水土流失情况最为严重。水土流失敏感性较低的区域主要分布于松嫩平原,此区域地形起伏小、年降水量较低,受径流冲刷的影响较小。2000—2005 年,大兴安岭山麓水土流失敏感性普遍降低,长白山脉附近出现水土流失敏感性升高的区域。2005—2010 年,研究区中部敏感性普遍下降,南北两端高敏感聚集区出现向中部移动

的趋势。2010—2015 年,大兴安岭山麓敏感性回升,其余地区敏感性总体呈下降趋势。2015—2020 年,研究区内高值区域向内收缩,在西、南两端出现小范围敏感性高值区域。

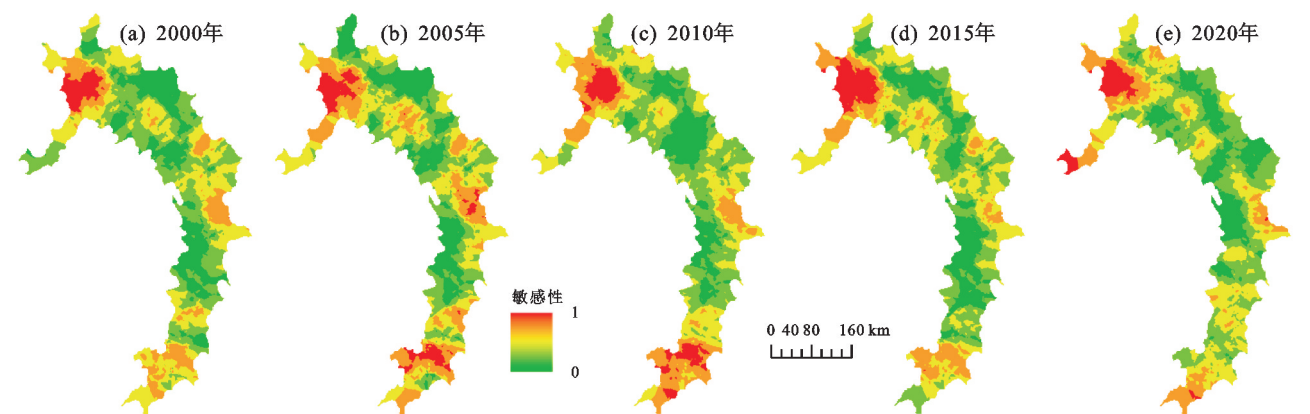


图 5 2000—2020 年水土流失敏感性分布

2.3.2 综合生态敏感性时空变化特征 将研究区各年份综合生态敏感性采用自然间断点^[17]法进行分级,将生态敏感性分为高度敏感、较高敏感、中度敏感、较轻敏感、轻度敏感 5 个等级(图 6),统计各年份不同敏感程度的面积及比例表明(表 3),2000—2020 年,研究区内轻度敏感、较轻敏感区面积之和占比在 44%左右波动,轻度敏感区主要分布于松嫩平原地带,为常年低敏感区;中度敏感、较高敏感区面积之和在 2005—2020 年出现下降趋势,高度敏感区面积呈先增加后减少趋势,在 2005—2015 年面积呈增加趋势,2015—2020 年面积大幅下降,减少 2 184.4 km²,生态环境整体呈改善趋势。

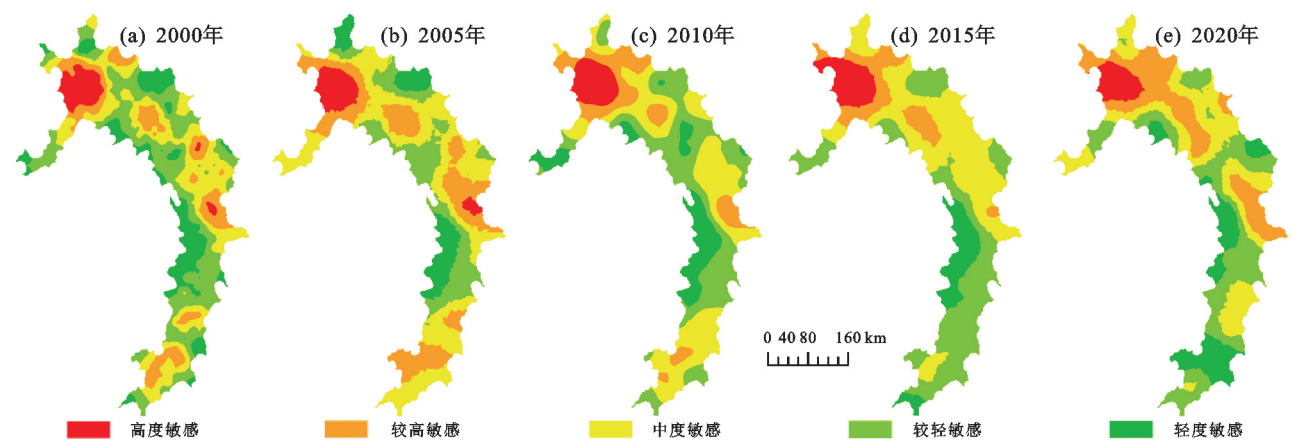


图 6 2000—2020 年综合生态敏感性分布

表 3 2000—2020 年综合生态敏感性面积占比

综合生态 敏感性	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积	占比/%	面积	占比/%	面积	占比/%	面积	占比/%	面积	占比/%
高度敏感	6051.0	6.0	6672.6	6.6	6788.5	6.7	7490.8	7.4	5306.4	5.2
较高敏感	15248.6	15.0	24516.4	24.2	14837.7	14.6	12312.6	12.1	22454.9	22.1
中度敏感	28874.6	28.5	38012.5	37.5	34037.1	33.6	36969.5	36.5	29141.5	28.7
较轻敏感	34936.1	34.5	21187.1	20.9	32969.5	32.5	34764.1	34.3	29721.0	29.3
轻度敏感	16274.0	16.1	10995.7	10.8	12751.6	12.6	9847.3	9.7	14760.4	14.6

从空间分布来看,2000 年研究区高度敏感区主要集中于大兴安岭山麓,较高、中度敏感区呈聚集状均匀分布,轻度、较轻敏感区呈条带状分布。2005 年研究区内轻度、较轻敏感区出现收缩趋势,中度、较高敏感区出现向四周扩散的现象,高度敏感区略微扩张,长白山脉及大、小兴安岭区域生态敏感性上升。2010 年研究区高度敏感区域基本没有变化,较高敏感区向大、小兴安岭山麓转移,研究区轻度、较轻敏感区增多,中度敏感区分布趋于集中。2015 年研究区南、北两端的较轻敏感区、中度敏感区均出现向外扩张趋势,整体分布结构趋于单一。2020 年研究区低敏感区向南转移,中部较轻、中度、较高敏感区穿插分布,高度敏感区范围收缩较为明显,小兴安岭以及长白山脉区域生态敏感性得到改善。

2.4 生态敏感性空间聚集特征

2.4.1 全局空间自相关分析 使用 ArcGIS Pro 软件对研究区多年份生态敏感性进行全局空间自相关分析,由表 4 可知,各年份综合生态敏感性 Moran's I 指数均>0,表明综合生态敏感性在空间上呈现正相关。检验全局 Moran's I 指数,*p* 值均为 0,通过 99%置信度检验,说明综合生态敏感性空间自相关显著,相邻度高的区域综合生态敏感性较为相似。*Z* 统计量均>2.58,说明可拒绝零假设。研究区综合生态敏感性的空间分布存在正相关关系,表现出聚集分布模式,*Z* 得分随时间变化先上升后略微下降,说明聚集程度总体升高,空间趋同性相对升高。

表 4 2000—2020 年研究区综合生态敏感度全局 Moran's I 指数统计量

指标	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran's I	0.982	0.987	0.994	0.995	0.992
Z 统计量	85.045	85.505	86.071	86.166	85.921
<i>p</i> 值	0	0	0	0	0

2.4.2 局部空间自相关分析 使用 ArcGIS Pro 软

件在计算研究区综合生态敏感度 Moran's I 指数的基础上进行空间聚类,得到 LISA 空间聚类图。在 99%置信区间内,划分为 5 种不同聚集类型,分别为高高聚集区(H-H)、高低聚集区(H-L)、低高聚集区(L-H)、低低聚集区(L-L)和不显著区(Not Significant),最终得到研究区 4 041 个分区,2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的综合生态敏感性局部空间自相关聚类图(图 7)。

总体而言,研究区生态敏感性在空间尺度呈聚集状分布,聚集程度随时间推移出现升高趋势。综合生态敏感性低值聚集区主要分布于大、小兴安岭区域,2000 年、2005 年、2010 年长白山脉附近存在小部分低值聚集区,低低聚集区与高度、较高敏感区域存在空间分布轻度、较轻相似性。高值聚集区主要分布于松嫩平原部分,高高聚集区与轻度、较轻敏感区域存在空间格局上的相似性。由 LISA 聚类图可知,研究区生态敏感性随时间推移表现出同一化趋势,生态敏感性高值区向北部聚集,低值区向南部聚集。

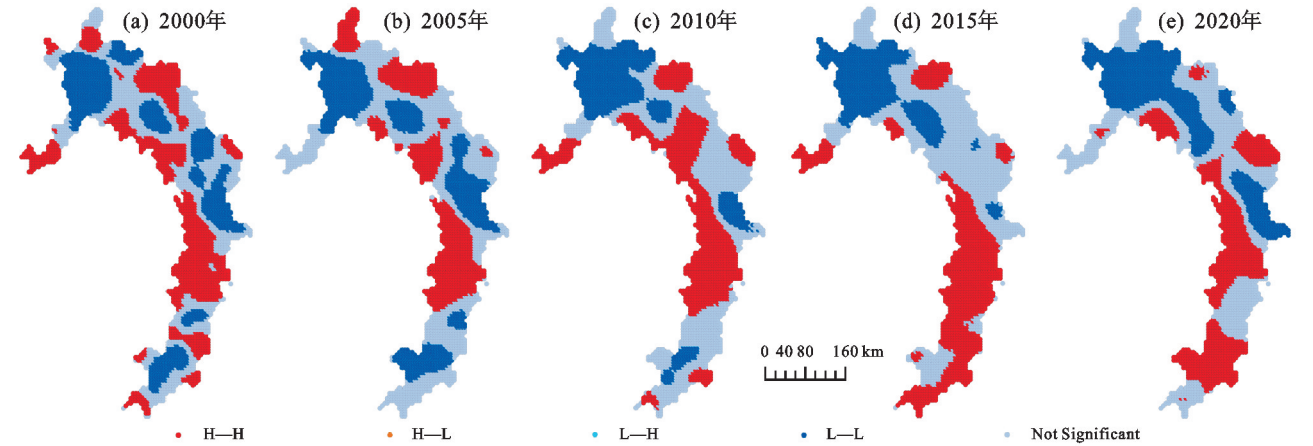


图 7 2000—2020 年综合生态风险指数

3 讨论

东北黑土带综合生态风险敏感性的空间分布格局由 2000 年的总体分散、局部聚集转变为 2020 年的南北分段、交错穿插,随时间推移聚集程度出现上升趋势,表明研究区生态环境可能受到规律性的调控。中华人民共和国水利部从 2003 年起针对东北地区实行水土流失综合防治工程,对东北黑土区提供工程以及生态修复方面的技术支持;与此同时,中央及地方政府陆续出台关于东北地区土地利用方式的调控政策以及针对耕地土壤质量的保护政策^[18],对东北地区的生境质量产生积极影响。

3.1 综合生态敏感性时空分异特征及归因

2000—2010 年间,研究区内高度敏感区主要集中于大兴安岭东南低山丘陵土壤保持区中,东北漫川漫岗土壤保持区(黑龙江省)以中度敏感及以下区域

为主,存在少量高度敏感区域,东北漫川漫岗土壤保持区(吉林省)内中度、较高敏感区占比较大;2010—2020 年间,东北漫川漫岗土壤保持区(吉林省)内生态风险明显降低,以中度、较轻敏感为主,东北漫川漫岗土壤保持区(黑龙江省)内高度敏感区逐渐减少,较高敏感区域面积相对升高,中度敏感区域面积呈先升高,后降低趋势,较轻及轻度敏感部分变化不明显,大兴安岭东南低山丘陵土壤保持区内高度敏感区呈收缩趋势,中度、较轻敏感区稍有改善。

综合生态高度敏感区持续存在于大兴安岭东南低山丘陵土壤保持区,可能由于其地处山脉与平原之间的过渡地带,地形较为复杂,导致自然因素、人为干扰对生态环境的影响被扩大;东北漫川漫岗土壤保持区(黑龙江省)与东北漫川漫岗土壤保持区(吉林省)由于地形相对简单,地势较为平缓,综合生态敏感程

度相对较低。国家发改委于 2015 年出台《农业环境突出问题治理总体规划(2014—2018)》^[19],将黑土地区域土壤质量保护工程纳入重点项目,大兴安岭区域综合生态高敏感区得到有效控制,松嫩平原区域综合生态敏感程度得到改善。

根据聚类图可知,2000—2020 年综合生态敏感性高值区出现南移趋势,低值区出现北移趋势,并且均趋于聚集。说明研究区南部生态环境改善程度高于北部,且生态敏感性可能受到周围地区影响,出现同化趋势。2005—2010 年、2015—2020 年研究区北部土地利用方式转化区域较为集中,不同景观类型间相互转化导致景观格局稳定性下降,生态敏感性上升^[11]。

3.2 土地利用方式及综合生态敏感性变化归因

土地作为地表景观的宏观表征,景观生态风险的时空分布与其构成或动态变化具有高度的关联性^[4]。土地利用方式是人类可以宏观调控的过程因子,反映景观生态对人类活动的响应。2000—2020 年,研究区土地利用转移较为剧烈的部分为东北漫川漫岗土壤保持区(黑龙江省)区域北部与大兴安岭东南低山丘陵土壤保持区相交的地带,以及南部与东北漫川漫岗土壤保持区(吉林省)相交的地带(图 1、图 2)。北部发生剧烈变化的原因可能是此部分处于 2 个水土保持功能区划的交界处,其土地利用方式易发生变化,导致景观格局稳定性下降,出现景观生态高敏感性聚集区;南部发生剧烈变化可能由于城镇的城市化进程加快,不同土地利用方式转化为建设用地的过程中破坏原本较稳定的景观格局体系,从而导致该区域景观破碎度升高,出现景观生态高敏感区域。

本研究根据地理探测器结果,将年均气温、年均相对湿度、年均地温和年日照时间划分为主要驱动因子,对土地利用方式改变产生较为显著的独立影响;年蒸发量、年均气压、高程与其他因子交互探测结果相比于其单因子探测结果有明显提高,表明次要因子之间存在较为显著的协同作用关系;年均气温与除年均地温外各因子交互作用解释力均为最大,侧面表明土地利用方式对年均气温的响应较为明显;年均风速与各因子交互探测结果均表现为非线性增强,说明年均风速与其他因子的交互作用对研究区土地利用方式变化存在较为显著的影响,针对土地利用方式变化导致景观生态恶化升高的状况,中央政府出台《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020 年)》^[20]等相关政策,结合各地区自然因素,因地制宜,以土地利用为媒介,对生态风险进行动态调控。

导致东北地区土壤侵蚀的因素通常有冻融侵蚀、风力侵蚀、水力侵蚀等,更主要的情况是由多种外营力复合侵蚀导致水土流失^[21]。地理探测器结果显示,年均气温的单因子解释力显著,年均风速、年均气温同其他各因子共同作用的解释力均出现升高趋势,说明气温与风速在景观层面与土壤侵蚀层面均存在较为显著的复合影响作用。杨婉蓉等^[22]对东北地区风蚀现象进行长时间序列的研究发现,东北地区发生风蚀较为严重的区域与本文中大兴安岭东南低山丘陵土壤保持区重合;任景全等^[23]研究结果表明,吉林省风蚀程度自西向东逐渐减弱。研究区南北两端出现生态风险高值区的原因可能是受以风蚀为主的侵蚀作用,而吉林省颁布《吉林省耕地质量保护条例》^[24]《黑土耕地土壤肥力评价技术规范》^[25]等针对黑土地保护的专项政策,使得东北漫川漫岗土壤保护区(吉林省)在 2010—2020 年综合生态敏感度显著下降,生态环境质量得到明显改善。现有研究^[26-27]表明,土地利用方式是土壤保持功能变化的主导因子,通过影响土壤结构改变土壤侵蚀情况。总体来说,研究区综合生态敏感性变化由土地利用方式及土壤侵蚀的复合作用导致,人类通过政策调控^[18]、技术支持^[28]等宏观、微观结合的方式均可以对综合生态敏感性进行有效改善。

4 结论

(1)研究区 2000—2020 年土地利用整体格局未发生较大变化,转化最明显的是未利用地和水域,未利用土地面积增加 1 035.7 km²,水域面积减少 975.8 km²,水域与未利用地之间发生明显的转化。2005—2010 年、2015—2020 年 2 个时期土地利用方式发生较为剧烈的变化,且变化主要发生于耕地部分,2005 年—2010 年间,耕地主要转为林地、草地与建设用地,转出总面积 5 386.2 km²,耕地由林地转入最多,转入面积 1 875.8 km²;2015—2020 年,耕地主要转出为林地、建设用地与未利用地,转出总面积 4 951.0 km²,耕地由草地转入最多,转入面积 2 066.8 km²。

(2)不同自然因子对研究区土地利用方式的解释力存在显著差异,年均气温、年均相对湿度、年均地温和年日照时间是土地利用变化的主要驱动因子,因子解释力均>1%;气温是土地利用方式变化的主导因素,风速与高程、气温、蒸发量、地温、气压、相对湿度、日照时间的交互作用对土地利用方式变化均具有显著的协同增强作用。

(3)随时间推移,研究区生态敏感性整体改善,高度敏感区域减少,轻度敏感区域增加;高度敏感区域

向研究区北部转移聚集,轻度敏感区域向研究区南部转移聚集,区域生态敏感性随时间推移表现出同一化趋势;以风蚀主导的复合侵蚀可能是生态风险高值区出现的主要因素。

参考文献:

- [1] 刘海龙,王伟桥,王跃飞,等.汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J].生态学报,2021,41(10):3952-3964.
- [2] 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.
- [3] 刘可喧,王冬梅,魏源送,等.密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J].生态学报,2023,43(1):105-117.
- [4] 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.
- [5] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data[J].Ecological Indicators,2011,11(2):676-687.
- [6] Rossi P, Pecci A, Amadio V, et al. Coupling indicators of ecological value and ecological sensitivity with indicators of demographic pressure in the demarcation of new areas to be protected: The case of the Oltrepo Pavese and the Ligurian-Emilian Apennine area (Italy) [J]. Landscape and Urban Planning,2008,85(1):12-26.
- [7] Briceno-Elizondo E, Garcia-Gonzalo J, Peltola H, et al. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions[J].Forest Ecology and Management, 2006,232(1/3):152-167.
- [8] Carrington D P, Gallimore R G, Kutzbach J E. Climate sensitivity to wetlands and wetland vegetation in mid-Holocene North Africa[J].Climate Dynamics,2001,17(2/3):151-157.
- [9] 王一,郝利娜,许强,等.2001—2019年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J].生态学报,2023,43(6):2397-2407.
- [10] 张丽,刘佳雨.近30年东北沙地生态系统服务动态[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(1):139-148.
- [11] 王洁,摆万奇,田国行.青藏高原景观生态风险的时空特征[J].资源科学,2020,42(9):1739-1749.
- [12] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
- [13] 李坤衡,张岩,陈昶,等.松嫩典型黑土区耕地切沟密度分布特征及影响因子[J].农业工程学报,2023,39(6):130-138.
- [14] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.
- [15] 高宾,李小玉,李志刚,等.基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J].生态学报,2011,31(12):3441-3450.
- [16] 李炳元,潘保田,韩嘉福.中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J].第四纪研究,2008(4):535-543.
- [17] 石三娥,魏伟,杨东,等.基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J].生态学杂志,2018,37(4):1152-1163.
- [18] 王桂霞,杨义风.当代中国农村耕地资源保护的实践探索与策略优化:以黑土地保护为中心兼及其他[J].河北学刊,2021,41(6):117-124.
- [19] 国家发展和改革委员会.大力发展生态循环农业[EB/OL].[2023-06-07].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/gdzt/zncsls/201511/t20151130_1201242.html.
- [20] 中国政府网.全国土地利用总体规划纲要(2006—2020年)[EB/OL].[2023-06-07].https://www.gov.cn/jrzq/2008-10/24/content_1129693.html.
- [21] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.
- [22] 杨婉蓉,刘志娟,高伟达,等.近39年东北地区风蚀气候侵蚀力及其对气候变化的响应[J].水土保持学报,2023,37(3):132-138.
- [23] 任景全,郭春明,李建平,等.气候变化背景下吉林省风蚀气候侵蚀力时空特征[J].水土保持研究,2017,24(6):233-237.
- [24] 吉林省农业农村厅.吉林省耕地质量保护条例[EB/OL].[2023-06-07].http://agri.jl.gov.cn/zwgk/zcfg/fg/201904/t20190415_5792961.html.
- [25] 吉林省质量技术监督局.DB22/T 1776—2013 黑土耕地土壤肥力评价技术规范[S].长春:吉林省标准研究院,2013:1-5.
- [26] 王勇,杨彦昆,程先,等.土壤保持功能对土地利用变化的敏感性研究[J].水土保持学报,2020,34(6):22-29,36.
- [27] 张晓敏,张东梅,王莉,等.降雨、积雪以及土地利用复合影响下的额尔齐斯河流域土壤侵蚀分析[J].水土保持学报,2022,36(5):104-111.
- [28] 魏哈梅,郑粉莉,冯志珍,等.薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀—沉积的响应[J].水土保持学报,2021,35(4):49-54.