DOI: 10.20103/j.stxb.202311132467

高炜,杜以鑫,朱丹瑶,万鲁河.小兴安岭沼泽湿地时空演变特征及其驱动机制.生态学报,2024,44(22):10271-10286. Gao W, Du Y X, Zhu D Y, Wan L H.Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of wetlands in Xiaoxing' an Mountains. Acta Ecologica Sinica,2024,44(22):10271-10286.

小兴安岭沼泽湿地时空演变特征及其驱动机制

高 炜^{1,2,3},杜以鑫^{1,3},朱丹瑶^{1,3,4},万鲁河^{1,3,*}

1哈尔滨师范大学地理科学学院,哈尔滨 150025

2 哈尔滨金融学院计算机与数学学院,哈尔滨 150030

3 黑龙江乌伊岭湿地生态系统国家定位观测研究站,伊春 153000

4 牡丹江师范学院地理系,牡丹江 157012

摘要:以小兴安岭草本沼泽湿地、灌丛沼泽湿地、森林沼泽湿地为研究对象,选取 1975、1985、1995、2005、2015 年 5 个时间截面, 利用标准差椭圆、地理探测器等分析方法探究小兴安岭三类沼泽湿地损失的驱动机制,研究表明:①1975—2015 年小兴安岭草 本沼泽、灌丛沼泽、森林沼泽湿地面积均减少,灌丛沼泽湿地沼泽率最低,草本沼泽面积损失最大;②三类沼泽湿地质心均不同 程度地向西北偏移,森林沼泽质心迁移距离最长;③沼泽湿地损失具有时空分异性,1975—1995 年沼泽湿地损失主要是人类活 动干扰造成的,小兴安岭北部和中部沼泽湿地损失的主要驱动因素是耕地面积增加、放牧以及人口增长造成的;耕地面积增加、 煤炭开采以及人口数量增长是小兴安岭南部沼泽湿地损失的主要驱动因素。1995—2015 年自然环境变化对沼泽损失的解释 力变大,年冻融厚度、年降水量等自然环境因素对沼泽湿地损失的影响逐渐增强。40 年间,草本沼泽损失是人类活动干扰以及 自然环境变化共同驱动的产物;④不同驱动因子间的交互作用促进沼泽湿地的损失。研究结果为我国北方高寒地区沼泽湿地 的保护提供理论支撑。

关键词:小兴安岭;沼泽湿地;驱动机制;地理探测器

Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of wetlands in Xiaoxing' an Mountains

GAO Wei^{1,2,3}, DU Yixin^{1,3}, ZHU Danyao^{1,3,4}, WAN Luhe^{1,3,*}

1 College of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 College of Computer and Mathematics, Harbin Finance University, Harbin 150030, China

3 Heilongjiang Wuyiling Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Yichun 153000, China

4 Department of Geography, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157012, China

Abstract: Wetlands are known as the "kidneys of the earth" and play an important role in regulating climate, preventing floods and storing water, protecting biodiversity and purifying water sources. In recent years, with global environmental changes and interference from human activities, wetlands around the world are experiencing rapid and large-scale degradation. The degradation and loss of wetlands will have a negative impact on the human living environment, and are also an important reason for the frequent occurrence of natural disasters such as floods and typhoons. Therefore, wetland protection has become a hot issue of concern around the world. Xiaoxing'an Mountains are located in the mid-temperate zone of China and have developed many wetlands with unique ecological functions. However, over the past few decades, wetlands have been damaged by a series of production and construction activities such as agricultural reclamation and deforestation,

基金项目:国家自然科学基金项目(42071079);黑龙江省哲学社会科学扶持共建项目(22GLE385);哈尔滨金融学院校级项目(E022023008); 黑龙江省自然科学基金(TD2023D005)

收稿日期:2023-11-11; 网络出版日期:2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wanluhe@163.com

http://www.ecologica.cn

as well as the impact of environmental changes. The spatio-temporal changes and driving mechanism of the herbaceous wetlands, shrub wetlands, and forest wetlands were explored in the Xiaoxing'an Mountains in 1975, 1985, 1995, 2005, and 2015, using the methods of standard deviation ellipses and geographical detectors. Results indicated that: ① The areas of herbaceous wetlands, shrub wetlands, and forest wetlands in Xiaoxing'an Mountains has decreased during forty years. The shrub wetlands had the lowest wetland rate and the area of herbaceous wetland lost the most. 2 The wetland centroids of herbaceous wetlands, shrub wetlands, and forest wetlands all were shifted to the northwest by varying degrees, and the centroid of forest wetland had the longest migration distance. 3 The wetland loss had spatiotemporal differentiation. The wetland loss was mainly caused by the interference of human activities from 1975 to 1995, and the increase of cultivated land area, grazing, and population growth were the main wetland loss drivers in the northern and central part of the Xiaoxing'an Mountains, and the southern wetlands loss in the Xiaoxing'an Mountains was caused by the increase in the cultivated land area, coal mining, and population growth. From 1995 to 2015, the explanatory power of changes in the natural environment for wetland loss became more important, and the impact of natural environmental factors such as annual freeze-thaw thickness and annual precipitation on the loss of wetlands gradually increased. During forty years, the loss of wetland was driven by the interference of human activities and changes in the natural environment. ④ The interaction between different driving factors promoted the loss of wetlands. The results provide theoretical support for the protection of wetlands in the alpine regions of northern in China.

Key Words: Xiaoxing'an Mountains; wetlands; drive mechanism; Geodetector

湿地是全球最重要的三大生态系统之一,在净化水质、调节径流、涵养水源、保护生物多样性、维护区域生态安全等方面有不可替代的作用^[1-4]。自1900年以来,全球天然湿地损失过半,全球湿地消失速度是森林的三倍,造成超过四分之一的湿地物种濒临灭绝^[5-6]。1978—2008年以及2009—2013年两个时期,我国天然湿地分别减少了33%和9.33%^[7-8]。湿地面积减少和湿地生态功能的退化对区域生态系统的安全以及气候产生重要影响,因此分析沼泽湿地时空演变和湿地损失的驱动因素,对沼泽湿地的保护至关重要^[9-10]。

湿地变化驱动力研究揭示湿地变化的内部机理,以往湿地变化驱动力研究多以定性分析为主,不能量化 单个驱动因子的贡献[11-15]。当前,对湿地变化的驱动机制研究更多集中在定量研究上,主要利用主成分分 析^[16]、多元回归分析^[17]、Logistics 回归分析^[18]、地理加权逻辑回归分析^[19—20]、灰色关联分析^[21]、增强回归 树^[22]等方法进行定量分析,这些方法侧重分析单个因素对湿地变化的贡献,但多因子间的相互作用研究较 少。地理探测器模型可以根据空间关联性探测各因子对模型的贡献,而且能够识别因子间的相互关系[23],在 定量分析湿地驱动机制方面具有优势,但未广泛应用于湿地变化驱动力研究领域。小兴安岭是我国沼泽湿地 主要分布区之一[24-25],自 20 世纪 50 年代以来,小兴安岭经历了变湿地为耕地、排水造林等破坏湿地的生产 建设活动,使得湿地生态系统受到严重破坏^[26-27];2003 年黑龙江省率先出台《黑龙江省湿地保护条例》,并于 2015年重新修订,2016年1月1日起在全省正式施行,重新修订的保护条件从湿地保护、湿地利用、监督管 理、法律责任等方面对湿地进行科学管理,使得小兴安岭沼泽湿地得到有效保护,而 2015 年前小兴安岭沼泽 湿地动态变化、沼泽湿地损失驱动机制的研究却鲜有文献报道。又由于 1975 年之后 Landsat 系列卫星可获取 稳定的影像数据,因此,明确小兴安岭沼泽湿地 1975—2015 年时空演变以及湿地损失的驱动因素,对进一步 揭示沼泽湿地发育和沼泽湿地的可持续发展有重要的意义。本研究以我国寒温带高纬度的小兴安岭作为研 究区,运用标准差椭圆分析方法以及地理探测器方法,定量分析1975—2015年自然环境要素和人类活动对小 兴安岭沼泽湿地损失的影响,深入分析40年间小兴安岭沼泽湿地对环境变化的响应。为沼泽湿地的保护提 供科学依据和数据支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

小兴安岭位于黑龙江省东北部(45.50°—51.10°N,125.20°—131.20°E),呈西北—东南走向,面积约11.51 万 km²(图1)。该地区属于温带大陆季风气候区,四季分明,冬季寒冷而漫长,夏季温热而短暂。水资源丰 富,河流纵横密布,主要有汤旺河、库尔滨河、乌云河、嘉荫河、呼兰河等,分属黑龙江、松花江两大水系。年均 降水量约为 550—700mm,6—8 月的降水量约为全年降水量的 80%。小兴安岭海拔多在 500—800m 左右,最 高为1419m,由于山势浑圆平缓,河谷宽展,土壤水分过饱和,叠加多年冻土存在,沼泽广泛发育,有森林沼泽、 灌丛沼泽、草本沼泽等丰富的湿地类型;森林沼泽以乔木为建群种,生长在地表过湿或积水的地段上,一般由 耐冷湿条件的针叶树种—云杉(Picea asperata Mast)、冷杉(Abies fabri (Mast.) Craib)、兴安落叶松(Larix gmelinii)和落叶阔叶乔木树种白桦(Betula platyphylla)和毛赤杨(Alnus hirsute Turcz.)构成乔木层。灌丛沼泽 以喜湿灌木为优势种,柴桦(Betula fruticosa)、沼柳(Salix rosmarinifolia var. brachypoda)、笃斯越橘(Vaccinium uliginosum)为优势种占主导地位,面积较大,而以卵叶桦(Betula ovalifolia Rupr.)、柳叶绣线菊(Spiraea salicifolia L.)为优势种处于次要位置,面积较小。草本沼泽以草本植物为主要植被,盖度大于20%。主要建群 植物有修氏苔草(Carex schmidtii Meinsh.)、乌拉苔草(Carex meyeriana Kunth)、灰脉苔草(Carex appendiculata (Trautv.) Kükenth.)、小叶章(Deyexia angustifolia (Kam.) Chang)、羊胡子苔草(Carex callitrichos V. Krecz.) 等[28]。小兴安岭是我国北方重要的生态屏障,保护着东北黑土地不受风沙的侵蚀,在国家生态建设全局中具 有特殊重要地位^[29]。黑河市、伊春市和鹤岗市分别位于小兴安岭的北部、中部和南部,是沼泽湿地的主要分 布区,因此本文将分析这三座城市沼泽湿地的变化。





1.2 数据来源及处理

研究数据包括基础地理数据、遥感影像数据、专题数据、地形数据、野外采样数据、统计年鉴、地方政府国 民经济和社会发展统计公报以及政府工作报告。基础地理数据比例尺为1:30万,数据格式为 shapefile。 Landsat MSS/TM/ETM 数据来源于 Google Earth Engine 平台(https://code.earthengine.google.com/),分别为 1975年、1985年、1995年、2005年、2015年共5期数据,利用随机森林分类方法解译出水体、草本沼泽、灌丛沼 泽、森林沼泽、林地、草地、耕地以及建筑用地,总体分类精度达到80%。专题数据包括冻融、气温、降水、地温 数据,地温为地表(Ocm)温度数据;气温、地温、降水数据来源于中国气象数据科学共享服务网(http://data. cma.cn/),利用 R3.5.1 工具对黑龙江省 36 个气象站点 1975—2015 年气温、降水量、地温数据进行预处理,以 黑龙江省数字高程模型数据(DEM)作为协变量,进行 Anusplin 空间插值,裁剪出研究区的空间气候数据,得 到小兴安岭地区年平均气温,年降水量、年平均地温数据。冻融观测数据来源于黑龙江省气象信息中心,选取 1975—2015 年黑龙江省 24 个冻融气象观测站数据,运用普通克里金方法对黑龙江年冻融厚度做空间插值, 裁剪出小兴安岭年冻融厚度数据。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)。在 ArcGIS 10.2 环境下利用 DEM 数据提取坡度和坡向数据。最后,利用 R3.5.1 统 一所有空间数据的分辨率(100m)、边界和坐标系(WGS_1984_UTM_zone_52N)。1986—2015年的人口数量、 耕地面积、年生产用水量、年生活用水量、羊以及大牲畜数量(牛、马、驴、骡)的数据来源于黑龙江统计年鉴, 羊和大牲畜的数量能反映小兴安岭放牧情况。利用黑龙江省统计年鉴获取1975—2015年黑龙江省煤炭开采 数据,根据2014年、2015年鹤岗市国民经济和社会发展统计公报以及政府工作报告获取鹤岗煤炭产量,计算 当年鹤岗煤炭产量占黑龙江产煤量的比重,推算出1975—2015年鹤岗的煤炭产量。2000—2015年水资源总 量、地表水资源量、地下水资源与地表水资源不重复量数据来自于黑龙江统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 沼泽率

沼泽率是指研究区沼泽湿地面积与研究区总面积的百分比,沼泽率公式为:

$$R = \frac{a}{A} \times 100\% \tag{1}$$

式中, *a* 为研究区沼泽湿地面积, *A* 为研究区总面积, 通过沼泽率反映不同时期小兴安岭沼泽湿地的损失。 **1.3.2** 标准差椭圆分析方法

标准差椭圆主要包括中心点、长半轴、短半轴,利用标准差椭圆分析方法分析小兴安岭不同时期三类沼泽 湿地的时空演变,其公式为^[30–31]:

$$\tan \phi = \frac{X + Y}{Z}$$

$$X = \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_{i}^{2}$$

$$Y = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_{i}^{2}\right)^{2} + 4\left(\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i} \bar{y}_{i}\right)^{2}}$$

$$Z = 2\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_{i} \bar{y}_{i}$$
(2)

式中, x_i 与 y_i 是第 i 个子区域与中心的偏差。长半轴表示沼泽湿地在主方向的离散程度,短半轴表示沼泽湿地在次方向上的离散程度。

1.3.3 地理探测器

地理探测器模型中用q值衡量某个自变量对因变量的解释力,模型的公式为^[23]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}}$$
(3)

式中, $h = 1, \dots, L$, 为沼泽湿地减少的主要驱动因子的分层; N_h 和 N 分别为 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分 别是 h 层和全区沼泽湿地减少值的方差, SSW 和 SST 分别是层内方差之和以及全区总方差, q 的值域为[0,

1],q值越大表示自变量对因变量的影响程度越大;地理探测器模型主要包括4个探测器,即:分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测、生态探测^[23]。本研究利用地理探测器的因子探测以及交互作用探测分析影 响沼泽湿地损失的主要驱动因子。

本研究仅对森林沼泽、灌丛沼泽和草本沼泽湿地损失区域进行分析,模型要求自变量为类别变量,因此, 对连续型自变量离散化处理,在 ArcGIS 10.2 平台下,利用自然间断法将自变量分为9级,并将所有空间数据 统一成 1000m 分辨率的数据,根据栅格转点功能提取自变量与因变量。最后利用地理探测器软件 (Geodetector)进行数据计算分析。

2 研究结果与分析

2.1 小兴安岭沼泽湿地时空变化

40a 小兴安岭草本沼泽、灌丛沼泽、森林沼泽的面积波动下降。森林沼泽、灌丛沼泽面积减少主要集中在 1975—1985年,1985—1995年草本沼泽湿地面积减少最多,1975—1995年是三类沼泽湿地面积减少的高峰 期。1995—2015年沼泽湿地面积减少放缓,特别是相对于 2005年,2015年草本沼泽和灌丛沼泽面积略有增 加(表1)。40年间灌丛沼泽的沼泽率最低,草本沼泽的面积损失最多。

	Table 1 Areas and rates	of wettands from 1975 to 20	15 In Alaoxing an Wouldan	15		
年份 Year	统计项目 Statistics items	森林沼泽 Forest wetlands	灌丛沼泽 Shrub wetlands	草本沼泽 Herbaceous wetlands		
1975	沼泽湿地面积/km ²	1670.401	5148.981	21116.843		
1985		528.760	689.234	27048.161		
1995		555.525	1051.427	13746.259		
2005		68.721	464.869	6979.856		
2015		162.706	227.509	7041.124		
1975	沼泽率/%	5.192	1.684	21.294		
1985		0.695	0.533	27.275		
1995		1.060	0.560	13.862		
2005		0.469	0.069	7.038		
2015		0.229	0.164	7.100		

表 1 1975—2015 年小兴安岭沼泽湿地面积、沼泽率

5个时期沼泽湿地的空间分布如图 2 所示,1975 年灌丛沼泽、森林沼泽集中分布在小兴安岭北部和南部, 1985 年及以后灌丛沼泽、森林沼泽呈现零星分布。2005 年以前草本沼泽分布范围广,小兴安岭的北部、中部 和南部都有集中分布,2005 年及以后草本沼泽主要分布在小兴安岭中部和北部。

2.2 小兴安岭沼泽湿地标准差椭圆分析

运用 ArcGIS 10.2 软件中的"标准差椭圆"工具分别得到 1975 年、1985 年、1995 年、2005 年、2015 年小兴 安岭地区草本沼泽湿地、灌丛沼泽湿地、森林沼泽湿地的标准差椭圆(图3)。标准差椭圆中的 X、Y 轴分别反 映小兴安岭地区南北和东西方向湿地的分布广度。从 5 个年代标准差椭圆轨迹变化情况看,森林沼泽湿地、 灌丛沼泽湿地的长、短轴标准差持续缩小,森林沼泽湿地、灌丛沼泽湿地收缩明显。1975 年、1985 年、1995 年 草本沼泽的长轴标准差变化较小,短轴标准差略有增加,2005 年、2015 年草本沼泽湿地的长、短轴标准差均减 小,草本沼泽湿地也呈现收缩变化。与 1975 年沼泽湿地的质心相比,1985 年、1995 年草本沼泽、灌丛沼泽、森 林沼泽湿地的质心不同程度地向东南移动;相对于 1975 年沼泽湿地质心,2005 年、2015 年草本沼泽、灌丛沼泽、灌 对了泽湿地的质心而西北移动;相对于 1975 年森林沼泽质心,森林沼泽 2005 年质心向东南移动,2015 年质心又 向西北移动。

40年间,小兴安岭地区三类沼泽湿地质心不同程度地向西北方向偏移,与1975年相比,草本沼泽湿地质



图 2 5个时期小兴安岭草本沼泽、灌丛沼泽、森林沼泽湿地分类图 Fig.2 Classifications of herbaceous wetlands, shrub wetlands, and forest wetlands during 5 periods in the Xiaoxing'an Mountains

心向西北迁移的距离最短(46.64km),灌丛沼泽和森林沼泽的质心分别向西北迁移164.04km、168.33km;三类 沼泽湿地呈收缩变化。三类沼泽湿地呈东南—西北分布,南北方向沼泽湿地的变化大于东西方向沼泽湿地的 变化,1995—2015年南部沼泽湿地变化强于北部沼泽湿地。草本沼泽的稳定性相对较好,而灌丛沼泽、森林 沼泽的稳定性下降,损失严重。

2.3 小兴安岭沼泽湿地损失驱动机制分析

本文主要运用地理探测器模型分析小兴安岭森林沼泽、灌丛沼泽、草本沼泽湿地损失的驱动因素。结合 空间数据的可获取性与研究需要选取 DEM(X1)、坡度(X2)、坡向(X3)、年冻融厚度(X4)、年平均地表温度 (X5)、年平均气温(X6)、年降水量(X7)、距离水的欧式距离(X8)、距离耕地的欧式距离(X9)、距离建筑的欧 式距离(X10)作为地理探测器模型的输入因子,定量分析地形、气候、水文等自然环境因素以及人为因素对沼 泽湿地损失的影响。辅助利用水资源、人口数量与用水量、放牧与煤炭开采等数据定性分析其对沼泽湿地损 失的影响。

2.3.1 因子探测结果

地理探测器因子探测的结果如表 2 所示, 1975—2015 年, 草本沼泽湿地损失的 q 值排在前三的因子是距



图 3 研究区三类沼泽湿地质心及标准差椭圆分布图

Fig.3 Distribution of centroid and standard deviation ellipse of wetlands in the study area

离耕地的欧式距离(X9)>年降水量(X7)>DEM(X1);灌丛沼泽湿地损失 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>年降水量(X7)>年平均地表温度(X5);森林沼泽湿地损失 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>年平均地表温度(X5)>年降水量(X7)。1975—1995年,草本沼泽湿地损失 q 值排在前三的因子是距离耕地的欧式距离(X9)>DEM(X1)>年平均气温(X6);灌丛沼泽湿地损失的 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>步向(X1)>年平均气温(X6);灌丛沼泽湿地损失的 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>步向(X3)>年降水量(X7)。1995—2015年,草本沼泽湿地损失 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>步向(X3)>年降水量(X7)。1995—2015年,草本沼泽湿地损失 q 值排在前三的因子是年冻融厚度(X4)>少向(X3)>年降水量(X7);灌丛沼泽湿地损失的 q 值排在前三的因子依次是年冻融厚度(X4)>DEM(X1)>年平均地表温度(X5);森林沼泽湿地损失的 q 值排在前三的因子依次是年降水量(X7)>DEM(X1)>年平均地表温度(X5)。

表 2	小兴安岭沼泽湿地损失驱动要素地理探测器结果
-----	-----------------------

	Tuble 2	Geodetteeto	i icouito o	une union	is inclusion i	or wething	1055 111 211	aoang un	incumums		
年份 Year	湿地类型 Wetland types	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1975—2015	草本沼泽	0.499	0.254	0.065	0.111	0.358	0.340	0.596	0.199	0.601	0.343
	灌丛沼泽	0.062	0.034	0.016	0.295	0.092	0.028	0.164	0.041	0.084	0.078
	森林沼泽	0.027	0.010	0.022	0.101	0.088	0.012	0.053	0.020	0.015	0.011
1975—1995	草本沼泽	0.527	0.388	0.049	0.335	0.448	0.472	0.162	0.054	0.757	0.436
	灌丛沼泽	0.109	0.056	0.020	0.736	0.076	0.095	0.277	0.024	0.043	0.029
	森林沼泽	0.029	0.025	0.034	0.065	0.021	0.022	0.033	0.021	0.010	0.015
1995—2015	草本沼泽	0.071	0.253	0.335	0.646	0.212	0.219	0.330	0.210	0.099	0.149
	灌丛沼泽	0.031	0.017	0.016	0.060	0.030	0.019	0.028	0.026	0.009	0.008
	杰林辺泽	0.032	0.020	0.018	0.022	0.021	0.020	0.022	0.025	0.011	0.007

Table 2 Geodetector results of the driving factors for wetland loss in Xiaoxing'an Mountains

X1:数字高程模型 Digital elevation model;X2:坡度 Slope;X3:坡向 Slope aspect;X4:年冻融厚度 Annual freeze-thaw thickness;X5:年平均地表 温度 Annual average surface temperature;X6:年平均气温 Annual average temperature;X7:年降水量 Annual precipitation;X8:距离水的欧式距离 The Euclidean distance from water;X9:距离耕地的欧式距离 The Euclidean distance from cultivated land;X10 距离建筑的欧式距离 The Euclidean distance from the building

2.3.2 模型交互探测结果

利用模型交互功能分析 1975—2015 年各环境因子交互作用对三类沼泽湿地损失的影响,三类沼泽湿地 的各因子间的交互作用为双因子增强和非线性增强,任意两因子间的相互作用促进沼泽湿地损失。年冻融厚 度(X4)与年降水量(X7)的交互作用对草本沼泽湿地损失影响最大(0.941),年冻融厚度(X4)与 DEM 交互作 用(0.905)、年平均地表温度(X5)与年降水量(X7)的交互作用(0.896)紧随其后。DEM(X1)与年冻融厚度 (X4)的交互作用对灌丛沼泽湿地损失影响最大(0.617),其次是 DEM(X1)与年平均地表温度(X5)的交互作 用(0.59)以及坡向(X3)与年冻融厚度(X4)的交互作用对灌丛沼泽湿地损失也有较大的影响。年冻融厚度 (X4)与年平均地表温度(X5)的交互作用对森林沼泽湿地损失的影响最大(0.374),其次对森林沼泽湿地损 失产生较大影响的是年冻融厚度(X4)与坡向(X3)的交互作用(0.31)以及年冻融厚度(X4)与年平均气温 (X6)的交互作用(0.307)(图4)。



图 4 驱动因子的交互探测结果



X1:数字高程模型 Digital elevation model;X2:坡度 Slope;X3:坡向 Slope aspect;X4:年冻融厚度 Annual freeze-thaw thickness;X5:年平均地表 温度 Annual average surface temperature;X6:年平均气温 Annual average temperature;X7:年降水量 Annual precipitation;X8:距离水的欧式距离 The Euclidean distance from water;X9:距离耕地的欧式距离 The Euclidean distance from cultivated land;X10:距离建筑的欧式距离 The Euclidean distance from the building

2.3.3 环境因素分析

从地理探测器结果看,年冻融厚度、年降水量、距离 耕地的欧式距离解释力 q 值较大,是沼泽湿地损失的重 要驱动因子;另外,小兴安岭的水资源、人口数量、年生 产用水量、年生活用水量、煤炭开采量、大牲畜以及羊的 数量对沼泽湿地的损失密切相关,因此对上述因素做如 下分析。

(1)年冻融厚度

1975—2015年小兴安岭年冻融厚度变化呈下降趋 势,下降速率为-17.85mm/10a (P < 0.05),通过显著 性检验。40a 平均年冻融厚度为 200—430mm,由北向 南年冻融厚度逐渐减少(图5)。1975—2015年平均年 冻融厚度空间数据与 1975—2015 年三类沼泽湿地损失 的空间数据叠加(图6),从图6可知年冻融厚度为 350—430mm、200—350mm的区域是森林沼泽、灌丛沼 泽湿地的主要损失区域:草本沼泽湿地的损失范围较 广,年冻融厚度为 200—300mm、350—430mm 的区域是 草本沼泽湿地损失最集中的区域(图6)。小兴安岭冻 土在冻结和融化过程中储存和释放大量的水分,年冻融 厚度下降,冻土储存水分的能力减少,地表水文循环发 生变化,导致湿地的水位下降,减少湿地的水源,破坏湿 地生态系统稳定性。年冻融厚度下降可能导致永久冻 土的融化加速,影响湿地土壤的水、热状态。

(2)年降水量

1975—2015年小兴安岭年降水量呈现波动上升趋 势,年降水量倾向率为13.5mm/10a,年降水量5a滑动 平均值由 1975 年 474.6mm 增加到 1981 年的 612.4mm, 随后波动上升:1990—1998 年年降水量呈现下降趋势, 随后开始增加(图7)。40a平均年降水量南部大于北 部,南部平均年降水量为550—650mm,北部平均年降 水量为 480—550mm。灌丛沼泽减少区域主要分布在 北部平均年降水量为 500—550mm 的区域以及南部平 均年降水量为550—600mm的区域;草本沼泽湿地减少 主要分布在平均年降水量 480—600mm 的区域(图 8)。

(3)水资源



(4)耕地面积

1986—2015 年黑河、伊春、鹤岗的耕地面积分别从 1986 年的 9097km²、1071km²、456km²增加到 2015 年的

年冻融厚度 Annual freeze-thaw thickness/mm 350 300 250 785x + 362.03= 0.2183 R^2 200 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 年份 Year 图 5 年冻融厚度随时间变化趋势图 Fig.5 Annual freeze-thaw thickness Trend N 森林沼泽减少的位置 灌丛沼泽减少的位置 草本沼泽减少的位置 40 a年平均冻融厚度/cm 20-25 -30 25 -30-35 35-40 40-43 110 km



---- 线性(年冻融厚度)

年冻融厚度 5a滑动平均值

450

400

12610km²、2399km²、2013km²,黑河市的耕地面积最大, 鹤岗市耕地面积增速最快,2015 年耕地面积是 1986 年 耕地面积的 4.4 倍(图 10)。将草本沼泽湿地损失的空 间分布图与距离耕地的欧式距离叠加(图 11),从图 11 可知距离耕地 3km 以内的区域是草本沼泽湿地损失的 聚集区。

(5)人口数量与用水量

1986—2015 年小兴安岭人口数量呈上升趋势,人 口数量从 1986 年的 288 万人增长到 2002 年 417 万人, 随后人口数量逐年减少,到 2015 年人口数为 395 万人 (图 12)。黑河市、伊春市、鹤岗市的人口变化与小兴安 岭总人口变化一致。1986 年黑河、伊春、鹤岗的人口数 量分别为 150 万人、80 万人,58 万人,2015 年三个城市 的人口数量分别为 168 万人、121 万人、106 万人,鹤岗 人口增加最多。

黑河市年生活用水量缓慢增加,黑河市 1986— 1991年年生活用水量在 60—76t 左右,1992—2009年 年生活用水量增加到 100—200t 之间,2010年起年生活 用水量持续增加,到 2015年年生活用水量为 361t。伊 春市、鹤岗市年生活用水量均是先增后降,年生活用水 量高峰是在 2000年,然后年生活用水量开始波动下降。 鹤岗年生活用水量最大(图 12)。

1986—1990 年黑河年生产用水量缓慢增加,伊春、 鹤岗的年生产用水量波动较大,伊春年生产用水量在 1993 年达到峰值的 3500t,除 1994 年和 2006 年年生产 用水量低于 1000t 外,其余年份年生产用水量均超过 1000t,鹤岗年生产用水的高峰期是 1988—2002 年,年 生产用水量超过 3000t,2003—2015 年年生产用水量在 1000—2000t 之间。伊春、鹤岗年生产用水量均是先增 加后降(图 13)。

(6)放牧与煤炭开采情况

通过羊和大牲畜数量反映小兴安岭的放牧情况, 1986—2015 年黑河羊及大牲畜的数量呈增加趋势, 1986 年羊和大牲畜数量分别为 10.9 万头和 19 万头, 2015 年其数量分别为 103 万头和 60.7 万头,分别增长



图 7 年降水量随时间变化趋势图

Fig.7 Trend of annual precipitation with time





了 8 倍和 2 倍。黑河羊和大牲畜数量远超过伊春与鹤岗的总和。伊春羊及大牲畜数量在 2005 年以前逐年增加,2006—2008 年短暂下降,随后又增加。鹤岗羊及大牲畜数量波动增多(图 14)。1986—2015 年小兴安岭 羊及大牲畜数量呈增加趋势。

1975—2015年鹤岗煤炭开采量呈上升趋势,1996年前煤炭产量逐年增加,1996年后开始下降,2000年达到极低值,随后煤炭产量又逐年增加,2006年达到最大值,然后煤炭产量逐年下降(图15)。







图 10 1986—2015 年小兴安岭耕地面积 Fig.10 Areas of arable land from 1986 to 2015

3 讨论

3.1 小兴安岭沼泽湿地损失驱动因素的空间分异特征 分析

14000

伊春

1975—2015年,小兴安岭草本沼泽、灌丛沼泽、森 林沼泽湿地损失的主要因素是距离耕地欧式距离、冻融 厚度、年降水量。一方面,冻融厚度对小兴安岭草本沼 泽湿地、灌丛沼泽湿地、森林沼泽湿地的损失均表现出 较高的解释力,冻融厚度是三类沼泽湿地损失的主要自 然驱动因子,冻融厚度下降促进小兴安岭沼泽湿地的损 失。另一方面,小兴安岭耕地面积、人口数量、年生产用 水量、年生活用水量、放牧呈增长趋势。与伊春市、鹤岗 市相比,黑河市人口数量多、耕地面积大,黑河市羊与大 牲畜数量远超过伊春、鹤岗市羊和大牲畜数量的总和; 黑河市沼泽湿地的损失与耕地面积、放牧密切相关。伊 春市的耕地、放牧情况与黑河市相似,但伊春的地下水 资源与地表水资源不重复量减少,伊春沼泽湿地损失与 耕地、放牧增加、地下水资源与地表水重复量减少有关。 鹤岗的生活用水、生产用水量最多,煤炭开采量大,加之 鹤岗的地下水资源与地表水资源不重复量下降强度最 大;鹤岗的沼泽湿地损失不仅与耕地面积增加、人口增 长有关,还与用水量、煤炭开采、地下水资源减少有关。





Fig.11 Overlapping results of cultivated land and herbaceous wetlands loss



图 12 1986—2015 年人口数量、年生活用水总量 Fig.12 Population size and total annual volume for domestic water from 1986 to 2015

40a,小兴安岭沼泽湿地面积呈波动下降,草本沼泽湿地 面积损失最多,1975—1995年是小兴安岭沼泽湿地损 失的高峰期;小兴安岭沼泽湿地损失是人类活动干扰与 自然环境变化共同作用的结果,人类活动对沼泽湿地干 扰具有空间分异性,北部沼泽湿地受耕地、放牧影响,中 部受耕地、放牧、地下水资源下降影响,南部受煤炭开 采、用水量、地下水资源、耕地面积影响较大。已有研究 表明气候变暖造成多年冻土活动层变厚、冻土南界北移 等冻土退化问题,使得与之共生的沼泽湿地水热条件发 生变化^[32-33]。大、小兴安岭是我国第二大冻土分布 区^[34],是气候变化的敏感区^[35-36]。大兴安岭冻土由南 向北逐渐退化,冻土退化是大兴安岭湿地面积萎缩、湿 地生态系统功能受损主要自然因素^[37]。农业开垦、放 牧、排水造林以及人口增加是大兴安岭地区湿地退化的 主要人为因素^[38-39],大兴安岭森林沼泽面积变化较小,





to 2015

灌丛沼泽、草本沼泽湿地面积变化大,1990—2016 年是大兴安岭草本沼泽面积减少的高峰期^[40]。大、小兴安 岭沼泽湿地损失驱动因素既有相似之处又有不同点,本文研究是对我国高寒地区沼泽湿地研究的补充。 **3.2** 小兴安岭沼泽湿地损失驱动因素的时间分异特征分析

1975—1995年,小兴安岭沼泽湿地损失是距离耕地的欧式距离、年冻融厚度、年降水量等综合作用的结果,距离耕地的欧式距离对小兴安岭草本沼泽湿地损失的解释值为0.757,是草本沼泽湿地损失的主要驱动因素。已有研究表明农业耕种等人为干扰是导致东北沼泽湿地损失的主要驱动因素^[41-43],此阶段小兴安岭草本沼泽损失的驱动因素与东北沼泽湿地损失的驱动因素一致。1975—1995年是小兴安岭经济增长期,人口数量增多、耕地面积增加,煤炭开采量大,加之缺乏对湿地保护的意识,此阶段人类活动干扰对湿地损失作用较大,是沼泽湿地损失的主要因素。1995—2015年,年冻融厚度、年降水量等自然环境要素对草本沼泽湿地损失的解释值增加;小兴安岭的年冻融厚度下降,年降水量增加但分布不匀,南多北少,虽然 2000—2015年,兴安岭的水资源总量、地表水资源量波动上升;但小兴安岭地下水资源与地表水资源不重复量呈下降趋势,此







阶段耕地面积增长变缓、人口数量下降,年生产用水量 减少,煤炭开采量下降,人类活动对沼泽湿地的干扰强 度降低;加之,1998年黑龙江省委、省政府颁布实施的 《关于加强湿地保护的决定》,全面停止开垦湿地,抢救 性地建立湿地自然保护区,先后建立公别拉、翠北、友 好、大沾河、新青、乌伊岭、红星、细鳞河、库尔滨河、嘉荫 平阳河、刺尔滨河、都尔滨河、干岔子、孙吴红旗、平山、 南北河等国家级、省级湿地保护区,2003年,黑龙江省 率先在全国实施的《黑龙江省湿地保护条例》。草本沼 泽、森林沼泽湿地在2005—2015年相较于1995—2015 年略有增加应该与相关法律法规的实施、建立保护区以 及黑龙江湿地保护与恢复工程的执行密切相关。虽然



此阶段沼泽湿地受人类活动的干扰强度降低,但冻融厚度下降、温度升高、地下水资源减少等自然环境要素对 沼泽湿地的影响增加。因此,40年来,不同时期小兴安岭湿地损失的主要因素不同,具有空间分异性。本文 的研究结果既与其他学者的研究一致又有不同之处,丰富了小兴安岭沼泽湿地研究。

3.3 研究的不足之处

虽然小兴安岭南部年降水量大于北部年降水量,但南部的沼泽湿地损失大于北部。降水的增加并未对小 兴安岭沼泽湿地保护起到促进作用,这可能小兴安岭南部的鹤岗煤炭开采有关,煤炭开采不可避免地造成土 地塌陷等破坏湿地等生态环境的问题;同时鹤岗的地下水资源下降,也是小兴安岭南部沼泽湿地的损失的重 要因素。小兴安岭是我国重要的木材生产基地,建国以来累计输送木材 2.7 亿 m³,但由于缺乏相关历史数 据,本研究未能将上述因素作为模型的输入因子,这也可能是模型结果未能体现出人类干扰是造成森林沼泽、 灌丛沼泽损失的原因。

黑龙江统计年鉴是从 1987 年出版,本研究所用的人口数量、耕地面积、年生活用水量、年生产用水量、羊及大牲畜数量等数据最早的记录时间是 1986 年,比所用的遥感数据滞后 10 年,但 1995 年以前是黑龙江蓬勃

发展期,1975—1985年变化趋势与1986—1995年变化趋势大体一致,因此,本文的分析结果应该是合理的。 在黑龙江山区,羊及大牲畜常见饲养方式是白天放养,夜晚圈养,因此,用羊及大牲畜的数量反映放牧情况是 合理的。黑龙江的煤炭主要来自于鹤岗市、双鸭山市、七台河市和鸡西市,鹤岗作为黑龙江四大煤城之一,具 有百年的产煤历史,其煤炭产量占黑龙江总产煤量的比重相对稳定,因此本文的推算虽不精确,但利用本文的 推算分析鹤岗市 40a煤炭产量变化趋势也是合理的。本研究可能存在一定的不确定性,本文所用的遥感数据 来自 Landsat MSS/TM/ETM,数据源本身可能包含一些不确定性因素,可能会对本研究中的沼泽湿地分布的 结果产生一定的影响。

4 结论

(1)1975—2015年小兴安岭草本沼泽、灌丛沼泽、森林沼泽湿地的面积减少,1975—1995年是三类沼泽湿地面积减少的高峰期。灌丛沼泽湿地损失率最高,草本沼泽湿地面积减少最多。

(2)40年间,小兴安岭地区三类沼泽湿地质心不同程度地向西北方向偏移,三类沼泽湿地空间分布呈东 南—西北分布,南部沼泽湿地受到人为干扰更强。

(3)年冻融厚度与年降水量等自然环境因素以及人类活动干扰是三类沼泽湿地损失的主要驱动因素。 沼泽湿地的损失是由人类活动干扰和自然环境变化共同作用的结果并且具有时空分异性。

参考文献(References):

- [1] 吕宪国. 地球之"肾"——湿地系统的性质、功能问题. 今日国土, 2002(Z2): 37-40.
- [2] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. Hydrology and Earth System Sciences, 2003, 7(3): 358-389.
- [3] Salimi S, Almuktar S A A A N, Scholz M. Impact of climate change on wetland ecosystems: a critical review of experimental wetlands. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112160.
- Xu X B, Chen M K, Yang G S, Jiang B, Zhang J. Wetland ecosystem services research: a critical review. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e01027.
- [5] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. Marine and Freshwater Research, 2014, 65(10): 934.
- [6] Moomaw W R, Chmura G L, Davies G T, Finlayson C M, Middleton B A, Natali S M, Perry J E, Roulet N, Sutton-Grier A E. Wetlands in a changing climate: science, policy and management. Wetlands, 2018, 38(2): 183-205.
- [7] 牛振国,张海英,王显威,姚文博,周德民,赵魁义,赵惠,李娜娜,黄华兵,李丛丛,杨军,柳彩霞,刘爽,王琳,李展,杨镇钟,乔飞, 郑姚闼,陈炎磊,盛永伟,高小红,朱卫红,王文卿,王红,翁永玲,庄大方,刘纪远,罗志才,程晓,郭子琪,宫鹏. 1978—2008年中国 湿地类型变化.科学通报,2012,57(16):1400-1411.
- [8] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观——第二次全国湿地资源调查结果公布. 绿色中国, 2014(3): 8-11.
- [9] Wu X L, Zhao H, Wang M H, Yuan Q Z, Chen Z J, Jiang S Z, Deng W. Evolution of wetland patterns and key driving forces in China's drylands. Remote Sensing, 2024, 16(4): 702.
- [10] Mao D H, Yang H, Wang Z M, Song K S, Thompson J R, Flower R J. Reverse the hidden loss of China's wetlands. Science, 2022, 376(6597): 1061.
- [11] El-Hamid H T A, Wei C Y, Zhang Y T. Geospatial analysis of land use driving force in coal mining area: case study in Ningdong, China. GeoJournal, 2021, 86(2): 605-620.
- [12] Kerschbaumer L, Köbbing J, Ott K, Zerbe S, Thevs N. Development scenarios on Hetao irrigation area (China): a qualitative analysis from social, economic and ecological perspectives. Environmental Earth Sciences, 2014, 73: 815-834.
- [13] 宫宁, 牛振国, 齐伟, 张海英. 中国湿地变化的驱动力分析. 遥感学报, 2016, 20(2): 172-183.
- [14] 卢晓宁,黄玥,洪佳,曾德裕,杨柳青. 基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324.
- [15] Liu G L, Zhang L C, Zhang Q, Musyimi Z, Jiang Q H. Spatio-temporal dynamics of wetland landscape patterns based on remote sensing in Yellow River Delta, China. Wetlands, 2014, 34, 787-801.
- [16] 赵志强,许晓龙,袁青,吴妍.哈尔滨段松花江湿地景观格局演变及驱动因素分析.南京林业大学学报:自然科学版,2024,48(2): 219-226.
- [17] 洪佳,卢晓宁,王玲玲. 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力. 生态学报, 2016, 36(4): 924-935.

- [18] 张猛,曾永年.长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析.农业工程学报,2018,34(1):241-249.
- [19] 袁艺,周立志.城市化背景下小微湿地景观动态变化及其驱动因素.生态学报,2022,42(17):7028-7042.
- [20] Ren Y J, Lü Y H, Fu B J, Comber A, Li T, Hu J. Driving factors of land change in China's Loess Plateau: quantification using geographically weighted regression and management implications. Remote Sensing, 2020, 12(3): 453.
- [21] Li Y M, Li Y T, Yang X, Feng X J, Lv S B. Evaluation and driving force analysis of ecological quality in Central Yunnan Urban Agglomeration. Ecological Indicators, 2024, 158: 111598.
- [22] 吴金华,房世峰,刘宝军,盛芝露,杜加强.乌裕尔河-双阳河流域湿地景观格局演变及其驱动机制.生态学报,2020,40(13): 4279-4290.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 宫鹏,牛振国,程晓,赵魁义,周德民,虢建宏,梁璐,王晓风,李丹丹,黄华兵,王毅,王坤,李文宁,王显威,应清,杨镇钟,叶玉芳,李展,庄大方,迟耀斌,周会珍,闫军.中国1990和2000基准年湿地变化遥感.中国科学:地球科学,2010,40(6):768-775.
- [25] Che L N, Zhang H H, Wan L H. Spatial distribution of permafrost degradation and its impact on vegetation phenology from 2000 to 2020. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162889.
- [26] 刘恩泽. 对小兴安岭森林资源与发展区域经济问题的探讨. 林业勘查设计, 1995(1): 1-6.
- [27] 申忠奇,韩丽冬,姜宁,郝丽,牟长城.采伐对温带小兴安岭岛状冻土区森林湿地碳源/汇的影响.中南林业科技大学学报,2020,40 (4):80-92.
- [28] 赵魁义,何舜平,李伟.中国湿地生物多样性研究.中国科学院院刊,2010,25(6):659-667.
- [29] 赵魁义. 中国沼泽志. 北京:科学出版社, 1999: 181-201.
- [30] Yuill R S. The standard deviational ellipse; an updated tool for spatial description. Geografiska Annaler Series B, Human Geography, 1971, 53 (1): 28.
- [31] Moore T W, McGuire M P. Using the standard deviational ellipse to document changes to the spatial dispersion of seasonal tornado activity in the United States. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2019, 2: 21.
- [32] Li X, Cui Y Q, Ma D L, Song D D, Liu L. Vertical distribution of bacterial community diversity in the Greater Khingan Mountain permafrost region. Ecology and Evolution, 2022, 12(7); e9106.
- [33] 周幼吾,郭东信,邱国庆,程国栋,李树德.中国冻土.北京:科学出版社,2018.
- [34] 毛德华,王宗明,罗玲,任春颖,贾明明. 1990—2013年中国东北地区湿地生态系统格局演变遥感监测分析. 自然资源学报, 2016, 31 (8): 1253-1263.
- [35] Wang X W, Song C C, Sun X X, Wang J Y, Zhang X H, Mao R. Soil carbon and nitrogen across wetland types in discontinuous permafrost zone of the Xiao Xing'an Mountains, northeastern China. Catena, 2013, 101: 31-37.
- [36] An S, Tian Z Q, Cai Y, Wen T, Xu D L, Jiang H, Yao Z, Guan B, Sheng S, Ouyang Y, Cheng X L. Wetlands of Northeast Asia and High Asia: an overview. Aquatic Sciences, 2012, 75: 63-71.
- [37] 孙广友,金会军,于少鹏. 沼泽湿地与多年冻土的共生模式——以中国大兴安岭和小兴安岭为例. 湿地科学, 2008, 6(4): 479-485.
- [38] 那平山, 张明如, 徐树林. 大兴安岭林区湿地生态水环境失调机理探析. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 120-122.
- [39] 张文芬. 大小兴安岭沼泽及其林业利用. 地理科学, 1985, 5(4): 364-372.
- [40] 冯晓琳,张艳林,常晓丽.大兴安岭湿地多年冻土区活动层水热特征分析.冰川冻土,2021,43(5):1468-1479.
- [41] 王国栋,姜明,盛春蕾,吕宪国.湿地生态学的研究进展与展望.中国科学基金,2022,36(3):364-375.
- [42] Song F, Su F L, Mi C X, Sun D. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: a case in Northeast China. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141778.
- [43] 任慧鑫,任春颖,王宗明,刘盼. 1990年以来长春市湿地面积和分布动态及其影响因素分析.湿地科学, 2023, 21(4): 575-581.