

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.011

基于 InVEST 模型的北京市延庆区自然保护地生境质量评估

岳建兵¹, 胡理乐²

(1. 国家林业和草原局野生动物保护监测中心, 北京 100714; 2. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714)

摘要:采用 InVEST 模型, 选取生境质量和生境退化风险两个指标, 分析北京市延庆区生境质量空间分布特征; 通过莫兰指数与 ArcGIS 软件结合, 揭示两个生境指标的冷热点覆盖区; 探究生境质量、生境退化风险与不同类型自然保护地间的关系。研究表明: 延庆区生境质量东北部、西北部和东南部较高, 西南部部分区域生境质量较低, 生态退化风险从东北向西南呈升高趋势, 各类自然保护地生境质量指数均高于 0.9, 且均高于全区均值(0.834 2); 自然保护地内生境热点较少, 生境退化风险热点主要集中在西南部城区, 东北和东南部也有零星分布; 不同类型保护地之间生境退化风险存在一定差异, 其中湿地公园退化风险高于其他类型, 需要强化对湿地公园的规划和管理, 减少人为活动的干扰。

关键词:自然保护地; 生境质量; 生境退化风险; InVEST 模型; 热点分析; 北京市延庆区

中图分类号: S759.9; S718.53; S711 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2023)03-0059-08

引文格式: 岳建兵, 胡理乐. 基于 InVEST 模型的北京市延庆区自然保护地生境质量评估[J]. 林业调查规划, 2023, 48(3): 59-66. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.011

YUE Jianbing, HU Lile. Assessment of Habitat Quality of Natural Protected Areas Based on InVEST Model in Yanqing District of Beijing[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(3): 59-66. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.03.011

Assessment of Habitat Quality of Natural Protected Areas Based on InVEST Model in Yanqing District of Beijing

YUE Jianbing¹, HU Lile²

(1. Center for Wildlife Protection and Monitoring, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 2. Academy of Forestry and Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: The InVEST model was used to analyze the spatial distribution characteristics of habitat quality in Yanqing District of Beijing by selecting two indicators of habitat quality and habitat degradation risk; the cold and hot spot coverage areas of the two habitat indexes were revealed based on Moran's I and ArcGIS software; the relationship between habitat quality, habitat degradation risk and different types of natural protected areas was discussed. The results showed that the habitat quality in the northeast, northwest and southeast of Yanqing District was higher than that in the southwest, the ecological degradation risk increased from northeast to southwest, and the habitat quality indexes of various natural protected areas was higher than 0.9, and higher than the average value of the whole region (0.834 2); there were few habitats hot spots in natural protected area, and the habitat degradation risk hot spots were mainly concentrated in the southwest urban area, and sporadically distributed in the northeast and southeast. ; there were certain differences in habitat degradation risks among different types of natural protected areas, with

收稿日期: 2021-12-16.

第一作者: 岳建兵(1976-), 男, 山西忻州人, 硕士, 高级工程师. 主要从事自然保护地和野生动植物研究工作. Email: yuejianbing2008@sina.com

wetland parks having a higher risk of degradation than other types. Therefore, this paper suggested to strengthen the planning and management of wetland parks to reduce human interference.

Key words: natural protected area; habitat quality; ecological degradation risk; InVEST model; hot spot analysis; Yanqing District

自然保护地在维护国土生态安全、建设生态文明、实现美丽中国过程中具有重要地位^[1]。在过去的数十年中,人类频繁的活动干扰导致土地利用的剧烈变化,进而促使大范围的生境破碎化,生物多样性丧失,生态系统服务功能下降,人类福祉遭受严重威胁^[2]。为解决这一广泛存在的问题,我国从国家到地方政府陆续建立各种类型的自然保护地,以保护生物多样性,维持生态系统功能^[3-4],并于党的十九大进一步提出“建立以国家公园为主体的自然保护地体系”,又于2019年6月印发《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》。相关研究也表明,建立自然保护地,在保护生物多样性、提高生态系统服务功能、维持生态系统健康、提供优质生态产品等方面起到关键作用^[5-7]。自1956年开始,我国自然保护地体系逐步完善,数量不断增加,类型丰富多样,但不可避免地自然保护地建设和管理过程中存在诸多问题,如各部门间竞相圈地、管理上分割分治、顶层设计不够等^[6]。为此,自然资源部及国家林业和草原局通过对自然保护地进行整合,在解决一些历史遗留问题的同时,使得自然保护地的空间布局进一步优化^[6]。新的历史时期,构建自然保护地体系、加强自然保护地规划和管理以及明确自然保护地对保护生态环境的有效性显得至关重要。

为了表征人类活动与生态环境之间的关系,通常选用生境质量作为替代指标来评估生态环境保护状况,该方法具有一定的有效性和普适性^[8]。近年来,国外相关学者利用生境质量指标从洲际、国家、区域等不同尺度针对生态环境状况开展了大量研究工作^[9-11],其研究结果一致认为生境质量是一种能够有效评估生态环境状况的有效替代指标。国内相关学者也从不同尺度(流域、区域、自然保护区等)开展了生境质量研究^[12-21],但大部分工作偏向于揭示其时空变化特征,对自然保护地的生境质量及二者之间的关系研究相对较少。Myers(1988)在研究热带雨林地区时,为了分析其受到的威胁程度,首次提出“热点”这一概念,用于识别物种丰富度高、特有性强或极具威胁性的区域^[22]。随后,“热点”成为分析特殊区域生物多样性受到严重威胁和表征生境质量的直观有效方法。该方法能够有效地对生物

多样性保护规划及管理进行改进^[23],同时国内学者也将其运用到了省级尺度的生境质量分析^[24]。

延庆区作为首都西北重要的生态屏障,多年来坚定不移地实施生态文明发展战略,牢固树立“两山”理念,持续加大生物多样性保护力度,通过自然保护区、湿地公园建设,加强区域范围内的生境质量提升和生物多样性保护。截至目前,延庆区共有5类15处自然保护地(表1),其中自然保护区10处、森林公园2处、湿地公园1处、地质公园1处、风景名胜1处,总面积达97 041.96 hm²^[25],占全区国土面积的48.67%,远高于北京市自然保护区的面积比例(22%)。延庆区保护地数量居北京市各区第一,占北京市保护地数量的近20%,保护地面积居北京市各区第二,约占北京市保护地面积的26%。由此可见,延庆区自然保护地规模在北京市自然保护地中占有重要位置。

表 1 延庆区自然保护地

Tab. 1 Natural protected areas in Yanqing District

序号	自然保护地名称	级别	批准年代	面积/hm ²
1	松山国家级自然保护区	国家级	1985年	6213.0
2	野鸭湖市级湿地自然保护区	市级	1999年	6873.0
3	玉渡山区级自然保护区	区级	1999年	9082.6
4	莲花山区级自然保护区	区级	1999年	1256.8
5	大滩区级自然保护区	区级	1999年	15432.0
6	金牛湖区级自然保护区	区级	1999年	1243.5
7	白河堡区级自然保护区	区级	1999年	7973.1
8	太安山区级自然保护区	区级	1999年	3682.1
9	龙庆峡—松山—古崖居风景名胜区	市级	2000年	22300.0
10	朝阳寺市级木化石自然保护区	市级	2001年	2050.0
11	北京延庆硅化木国家地质公园	国家级	2002年	14140.0
12	八达岭国家森林公园	国家级	2005年	2940.0
13	北京野鸭湖国家湿地公园	国家级	2006年	283.4
14	莲花山森林公园	市级	2011年	2210.0
15	水头区级自然保护区	区级	2017年	1362.5

虽然延庆区近些年来在自然保护地建设、生境质量提升及生物多样性保护方面取得了一定成效,但这些举措对其生境质量的保护和改善并未得到及时评估,不同保护地类型的优缺点尚未获得充分认识,区域相关威胁与保护规划和管理也未很好地联系起来。因此,研究和评估北京市延庆区自然保护地生境质量,对于生态环境保护及自然保护地管理具有重要参考意义。为了有效评估延庆区自然保护地对生态环境的影响,本研究运用 InVEST 模型结合莫兰指数,对该区域生境质量和生境退化风险空间分布格局进行分析,识别生境冷热点区域,探讨研究区生境质量和生境退化风险及其冷热点与不同类型自然保护地间的关系。

1 研究区概况

延庆区地处北京市西北部,地理位置为北纬 40°16'~40°47',东经 115°44'~116°34',北东南三面环山,西临官厅水库的延庆八达岭长城小盆地,即延怀盆地,延庆位于盆地东部,全境平均海拔约 500 m,生态环境优良,是首都西北重要的生态屏障。其中,山区面积占 72.8%,平原面积占 26.2%,水域面积占 1%。延庆区属大陆性季风气候,属温带与中温带、半干旱与半湿润带的过渡带。气候冬冷夏凉,年均降水量约 500 mm,年均温 8℃,最热月份气温比承德低 0.8℃,是著名的避暑胜地,有北京“夏都”的美誉。延庆区土地利用类型和自然保护地空间分布如图 1 所示;延庆区生境质量主要威胁因子空间分布如图 2 所示。

2 数据与方法

2.1 数据来源

选取 2015 年分辨率为 30 m 的土地利用数据,来源于中科院地理所,根据实际情况将研究区土地利用类型整合为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用土地等 6 个类型。道路(铁路、公路)数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)的 1:250 000 全国基础地理信息库。延庆区自然保护地数据(边界、级别、类型)来源于北京市园林绿化局。与本研究相关的空间数据主要在 ArcGIS 10.2 中完成,生境质量计算结果在 InVEST 3.6 模型中处理得到。

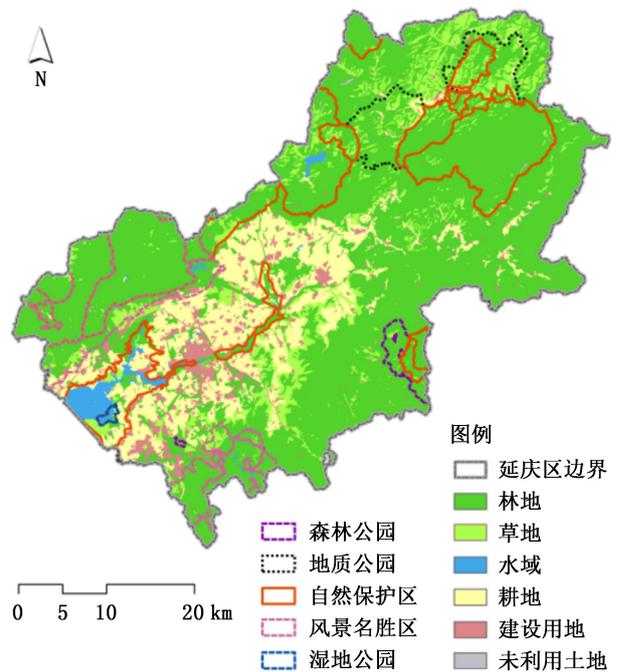


图 1 延庆区土地利用类型和自然保护地空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of land use types and natural protected areas in Yanqing District

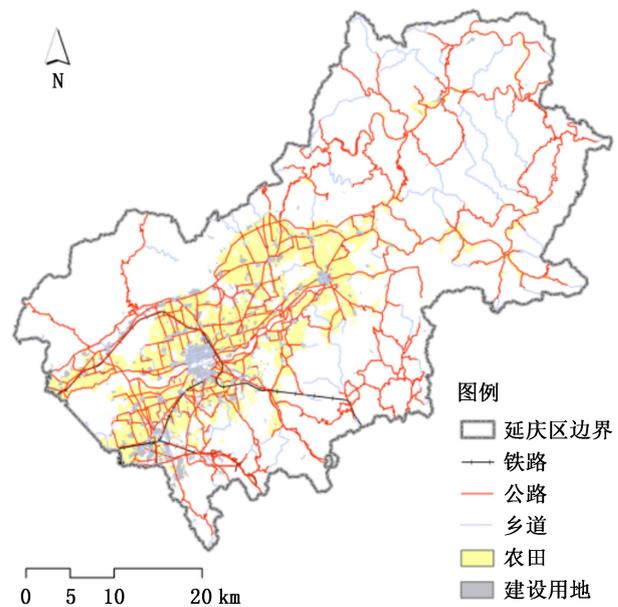


图 2 延庆区生境质量主要威胁因子空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of main threat factors of habitat quality in Yanqing District

2.2 研究方法

2.2.1 生境质量评估

本研究采用 InVEST 模型,选取生境质量指数和生境退化风险指数对延庆区生境质量进行评估。生境质量指数往往用来综合表征区域各类环境

因子,假设物种栖息地质量较高的区域其丰富度也较高,而栖息地质量和面积的降低对应区域的物种也将下降^[26],因此,生境质量指数的大小可作为生物多样性评估指标^[27],并能够判别生态系统的承载力和生产力。生境质量指数可在 InVEST 模型中进行计算,模型根据不同区域受威胁的敏感程度来判定其受到外部环境影响的大小,进而判别不同区域生境退化风险的高低。

物种栖息地的生境质量取决于所处区域的特点和受威胁程度,不同区域类型的生境质量数值可能相似,但其生境适宜度和受威胁程度各有差异,如果只单一采用生境质量指数进行评估,则可能会低估生境的威胁影响^[24]。那么此时应考虑生境退化风险指数,其代表的是区域物种受到各类环境因子总的威胁程度。

因此,本研究综合考虑生境质量指数和生境退化风险指数来评估研究区生境质量。计算公式为:

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

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} \right) \quad (2)$$

式(1)中: D_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境退化风险指数; y 为威胁因子 r 下的栅格; r_y 用于判断栅格 y 是否提供威胁源 r ; W_r 为威胁因子 r 具有的威胁权重; β_x 为栅格 x 在社会、法律和物理保护水平下威胁因子的可达性,取值介于 0 和 1,取值越大表明可达性越高; S_{jr} 为地类 j 对威胁因子 r 的敏感系数,取值介于 0 和 1,取值越接近 1 表示越敏感; i_{rxy} 为来源于栅格 x 的威胁因子 r 对栅格 y 的影响。

式(2)中: Q_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度; k 为半饱和常数,在生境质量分析中一般设为 0.5^[28]。

受不同威胁因子影响, i_{rxy} 在空间上存在线性衰减和指数衰减两种情况。计算公式为:

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \quad (\text{线性衰减}) \quad (3)$$

$$i_{rxy} = e^{-2.99 \times \frac{d_{xy}}{d_{rmax}}} \quad (\text{指数衰减}) \quad (4)$$

式(3)中: d_{xy} 是栅格 x 和 y 之间的线性距离; d_{rmax} 是威胁 r 的最大影响距离。

综合相关研究^[17,20,29-31]和专家意见,得到威胁因子参数和威胁敏感度参数(表 2,表 3)。

表 2 威胁因子参数

Tab. 2 Threat factor parameters

威胁因子	最大作用距离/km	权重	衰减函数
耕地	8.0	0.6	线性
铁路	2.5	0.6	指数
建设用地	10.0	1.0	指数
公路	2.0	0.6	指数
乡道	1.0	0.4	线性

表 3 不同土地类型对威胁因子的敏感度参数

Tab. 3 Sensitivity parameters of different land types to threat factors

地类名称	生境适宜度	耕地	铁路	城区	裸地	公路	乡道
森林	1.0	0.60	0.9	1.00	0.7	0.7	0.5
草地	0.9	0.45	0.9	0.65	0.6	0.6	0.4
湿地	1.0	0.70	0.8	0.90	0.5	0.8	0.5
耕地	0.3	0	0.5	0.50	0.4	0.7	0.4
建设用地	0	0	0	0	0	0	0
未利用土地	0.01	0	0.2	0	0	0	0

对研究区涉及的自然保护地类型的可达性参数 β_x 进行赋值。其中,研究区自然保护地主要分为两大类(自然保护区、自然公园)5 小类(自然保护区、森林公园、湿地公园、地质公园、风景名胜区)。将自然保护区(核心区、缓冲区和试验区)的可达性值分别设为 0.2、0.5 和 0.8;将自然公园(森林公园、湿地公园、地质公园和风景名胜区)的可达性值均设为 0.8;其他区域可达性值均设为 1。

2.2.2 生境热点与冷点分析

由特定指标的高密度簇来表示其特征区域,称之为热点,反之称为冷点^[32]。本研究利用 ArcGIS 10.2 中“聚类 and 异常值分析”工具实现基于空间分析和空间关联的 local Moran's I 算法^[33],进而对研究区热点和冷点进行分析。通过软件识别,根据像素的簇/离群点类型来体现空间相似性或空间差异性。最终将研究区生境质量指数和生境退化风险指数分为 5 种类型:“HH”为由高值包围的更高值区,“LH”为由高值包围的低值区域,“HL”为由低值包围的高值区域,“LL”为由低值包围的更低值区域,“N”为无显著异常。其中“HH”和“HL”为热点区域,“LH”和“LL”为冷点区域。

3 结果与分析

3.1 生境质量和生境退化风险指数空间分布格局

延庆区生境质量指数平均值为 0.834 2(表 4),高值区主要集中在东北部、西北部和东南部的山区(图 3(a)),这些区域海拔较高,土地利用类型以森林为主,植被覆盖度较高,生态环境条件相对较好,人口密度小;但在高值区也存在生境质量指数较低的小部分区域,呈带状分布,主要因为在道路附近受威胁影响所致。中值区主要分布于环延庆城区的城乡结合地带,该区域由山地向平原过渡,地形较为平缓,以草地或耕地为主要土地利用类型。低值区主

要集中于西南部的城区,建设用地比重大,人口密集,人为活动频繁。

延庆区生境退化风险指数平均值为 0.027 5,从东北向西南呈升高趋势(图 3(b)),西北部有少部分区域属低值区。高值区集中分布于延庆区西南部的城区及环城区周边,该区域人类活动频繁,对生境的威胁较为集中。低值区主要分布于东北部及西北小部分植被覆盖度较高,人为干扰少,自然保护地相对集中区域。从总体来看,延庆区生境质量指数均值高于 0.8,生境退化风险指数均值低于 0.1,因此,延庆区生态环境质量整体较好。

表 4 不同类型自然保护地生境质量和生境退化风险指数均值

Tab. 4 Mean value of habitat quality and habitat degradation risk indexes in different types of natural protected areas

项目	全区	非保护地	自然保护区	森林公园	湿地公园	地质公园	风景名胜区
生境质量指数	0.8342	0.7657	0.9485	0.9855	0.9418	0.9454	0.9611
生境退化风险指数	0.0275	0.0363	0.0106	0.0196	0.0525	0.0044	0.0183

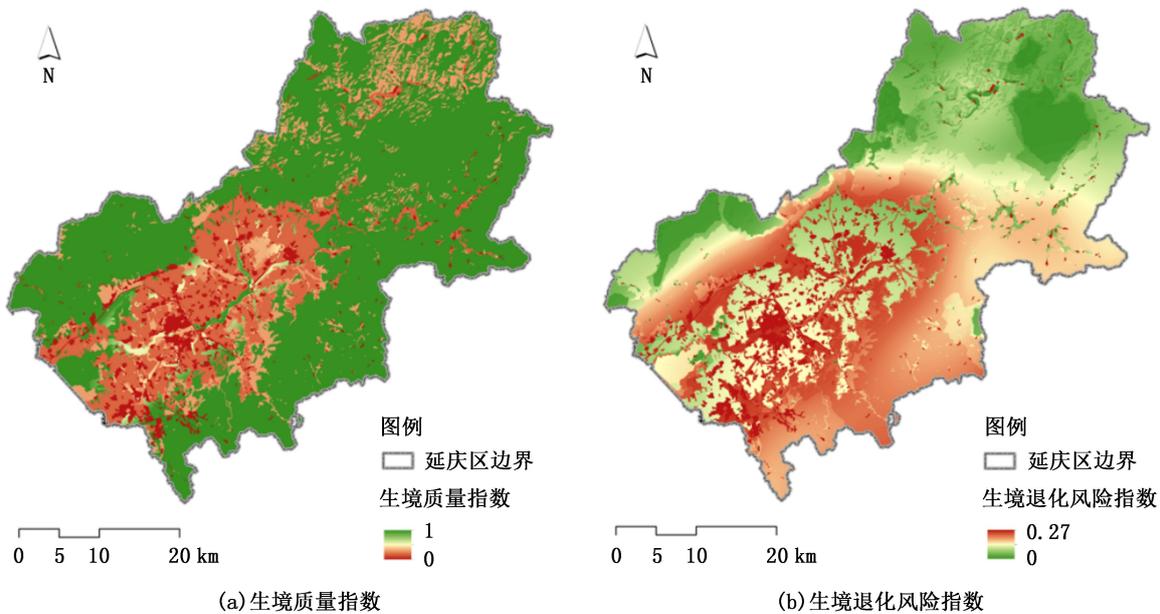


图 3 延庆区生境质量和生境退化风险指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of habitat quality and habitat degradation risk indexes in Yanqing District

延庆区非保护地区域生境质量指数(0.765 7)低于全区均值;自然保护区的生境质量指数整体较高,不同类型保护地之间差异不大,数值均在 0.9 以上,其中森林公园最高(0.985 5)。

延庆区非保护地区域生境退化风险指数(0.036 3)高于全区均值。自然保护区的生境退化风险指数整体较低,但不同类型保护地之间存在一定差异。其

中,地质公园最低(0.004 4);湿地公园最高(0.052 5),且高于全区平均水平;自然保护区(0.010 6)、森林公园(0.019 6)和风景名胜区(0.018 3)这三种保护地类型基本接近。

3.2 生境质量和生境退化风险指数冷热点分析

不同保护地类型生境质量和生境退化度及其热点、冷点覆盖率见表 5,图 4。

延庆区生境质量热点覆盖区域较少(0.04%) (表 5),零星分布在人类活动频繁城区(图 4(a));冷点覆盖区(16.83%)明显高于热点区,在西南部城区集中连片分布,在东北部山区道路附近有带状

或零星分布(图 4(b))。生境退化风险热点区(5.21%)分布较为明显,主要集中在西南部城区,东北和东南部也有零星分布;由于覆盖面积较小,冷点区(0.04%)则分布不明显。

表 5 不同保护地类型生境质量和生境退化度及其热点、冷点覆盖率

Tab. 5 Hot spot and cold spot coverage rate of habitat quality and degradation in different types of natural protected areas

项目	类型	全区	非保护地	自然保护区	森林公园	湿地公园	地质公园	风景名胜区	%
生境质量指数	热点覆盖率	0.04	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	
	冷点覆盖率	16.83	27.14	5.44	0.68	6.22	3.12	3.42	
生境退化风险指数	热点覆盖率	5.21	8.62	1.01	0.91	1.71	0.60	1.83	
	冷点覆盖率	0.04	0.06	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	

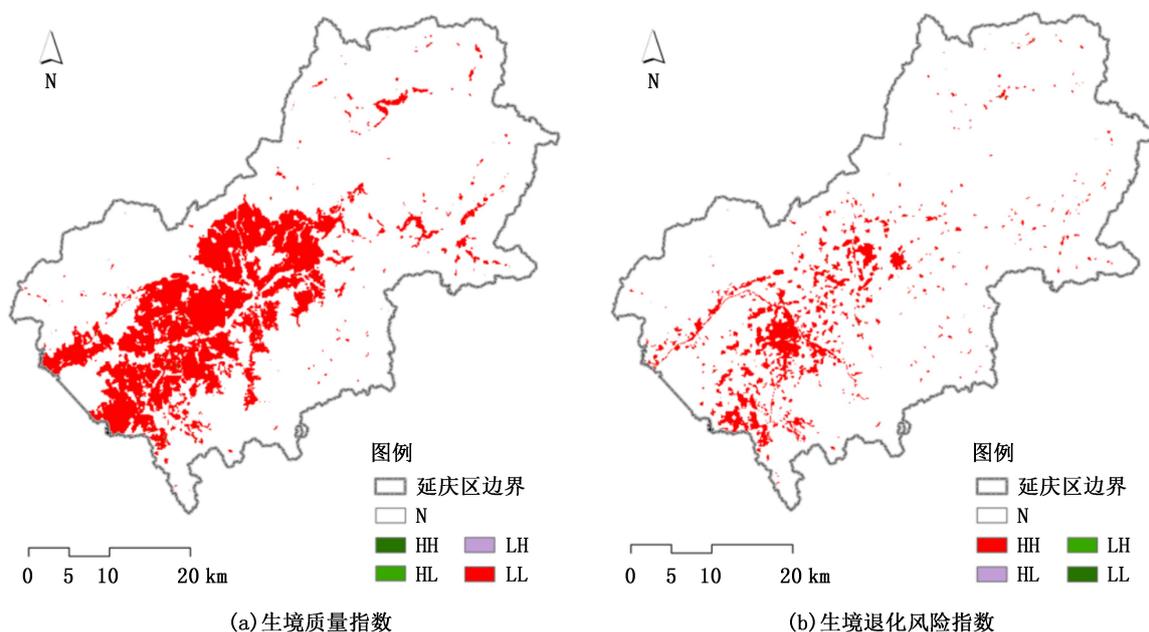


图 4 延庆区生境质量和生境退化风险指数冷、热点空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cold and hot spots of habitat quality and habitat degradation risk indexes in Yanqing District

延庆区非保护地区域的生境质量冷热点覆盖率均高于全区平均水平。各类保护地生境质量热点覆盖率基本接近,均为较低水平(接近或少于 0.02%);但冷点覆盖率存在一定差异,湿地公园冷点覆盖率(6.22%)最高,森林公园冷点覆盖率最低(0.68%)。

延庆区非保护地区域生态退化冷热点覆盖率均高于全区均值。各类保护地生境退化风险热点覆盖率存在一定差异,风景名胜区热点覆盖率(1.83%)略高于其他集中保护地类型。各类保护地生境退化风险冷点覆盖率均较低(接近或少于 0.02%)。

4 讨论

4.1 不同区域生境质量的差异

相关研究结果表明,生境质量与人类活动有着直接关系,人口密度高、人类活动频繁、离威胁源更近的区域,其生境质量明显低于其它区域,这与国内外相关学者的研究基本一致^[12,17,34]。延庆区西南部生境质量较低,生境退化风险较高,主要因为该区域以城镇为主,道路网密集,人口相对集中,存在着各种威胁影响因素,对生境干扰较大。延庆区东北部、西北部和东南部生境质量较高,生境退化风险较

低,主要因为这些区域以山地和森林为主,植被覆盖度较高,自然保护地相对集中,生态环境条件较好,人为等其他威胁因子较少。通过近些年的不断努力,延庆区自然保护地面积已占到全区国土面积的48.67%,因此,这些区域的生物多样性将在可预期的情况下得到有效保护。

4.2 不同类型保护地生境退化风险的差异

无论从地区、国家或全球范围,自然保护地对生物多样性保护的积极作用都已达成共识,而且生境质量和生境退化风险的相关研究也很好解释了这一点^[35-37],同时也表明了生境的高退化风险和来自人为的高压力之间存在相关性^[38-39]。延庆区不同类型保护地之间生境退化风险存在一定差异,其中湿地公园退化风险高于其他类型。其他保护地类型中,如自然保护区有核心区和缓冲区,对人为的可达性有极强的限制,威胁影响较少;森林公园主要以森林生态系统为主,植被覆盖率高,物种丰富,稳定性强;地质公园中的一些存在基础,形成年代久远,具备一定的抗干扰能力;因此,这些保护地类型生境退化风险相对较低。湿地公园成立相对较晚,且其内部存在一定比例的耕地和建设用地等,干扰因子较多,因此生境退化风险较高。

4.3 生境质量和退化风险的热点

热点分析经常被用来研究要素的空间分布问题,主要判断某要素在空间分布上存在统计意义上显著的高值或低值^[40],同时也能很好地识别和解释区域内生境质量高低的聚集或离散分布^[24,41]。延庆区自然保护地区域内生境质量和生境退化风险的热点覆盖率均低于非保护地区域;各类型保护地生境质量热点覆盖率基本接近,均为较低水平;生境退化风险热点区分布较为明显,主要集中在西南部城区,东北和东南部也有零星分布。综上所述,延庆区自然保护地内生境热点较少,这可能是由于整体环境较好,均为高值,所以不存在明显的热点。

5 结 论

本研究基于 InVEST 模型,通过较高分辨率的土地利用数据,引入生境质量和生境退化风险两个指标,并运用区域冷热点分析方法探讨生境质量、生境退化风险与各自然保护地类型的关系,得出以下主要结论:

1) 延庆区生境质量东北部、西北部和东南部较高,生境退化风险较低;西南部部分区域生境质量较低,生境退化风险较高;生态退化风险从东北向西南

呈升高趋势。

2) 延庆区自然保护地内生境热点较少;生境退化风险热点主要集中在西南部城区,东北和东南部也有零星分布。

3) 延庆区不同保护地类型的生境质量整体较高,差异不大,但不同类型保护地之间生境退化风险存在一定差异,其中湿地公园退化风险高于其他类型。今后延庆区需要强化对湿地公园的规划和管理,减少人为活动的干扰。

参考文献:

- [1] 唐小平,蒋亚芳,刘增力,等. 中国自然保护地体系的顶层设计[J]. 林业资源管理,2019(3):1-7.
- [2] HADDAD N M, BRUDVIG L A, CLOBERT J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems [J]. *Science Advances*, 2015, 1(2): 1-9.
- [3] 马克平. 当前我国自然保护区管理中存在的问题与对策思考[J]. 生物多样性, 2016, 24(3): 249-251.
- [4] 朱彦鹏,王伟,罗建武,等. 在建设国家公园体制下加强自然保护区综合管理[J]. 环境保护, 2016, 44(18): 53-55.
- [5] GRAY C L, HILL S L L, NEWBOLD T, et al. Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide [J]. *Nature Communications*, 2016, 28(7): 12306.
- [6] 高吉喜,刘晓曼,周大庆,等. 中国自然保护地整合优化关键问题[J]. 生物多样性, 2021, 29(3): 290-294.
- [7] 高吉喜,徐梦佳,邹长新. 中国自然保护地70年发展历程与成效[J]. 中国环境管理, 2019, 11(4): 25-29.
- [8] STEPHENS P A, PETTORELLI N, BARLOW J, et al. Management by proxy? The use of indices in applied ecology [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52: 1-6.
- [9] MAES J, PARACCHINI M L, ZULIAN G, et al. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe [J]. *Biological Conservation*, 2012, 155: 1-12.
- [10] SALLUSTIO L, DE T A, STROLLO A, et al. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 129-137.
- [11] BERGLUND M, JACOBI M N, JONSSON P R. Optimal selection of marine protected areas based on connectivity and habitat quality [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 240: 105-112.
- [12] 巩杰,马学成,张玲玲,等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 191-196.

- [13] 钟莉娜,王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(1):250-255.
- [14] 刘春艳,朱康文,刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. 农业工程学报,2017,33(19):258-267.
- [15] 顾羊羊,黄贤峰,邹长新,等. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(6):764-772.
- [16] 刘园,周勇,杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(10):2429-2440.
- [17] 梁晓瑶,袁丽华,宁立新,等. 基于 InVEST 模型的黑龙省生境质量空间格局及其影响因素[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):864-872.
- [18] 武丹,李欢,艾宁,等. 基于 CA-Markov 的土地利用时空变化与生境质量预测——以宁夏中部干旱区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(12):1969-1978.
- [19] 奥勇,蒋嶺峰,白召弟,等. 基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理,2022,45(1):164-175.
- [20] 景晓玮,赵庆建. 基于 InVEST 模型的贵州省生境质量时空变化研究[J]. 国土与自然资源研究,2021(5):1-5.
- [21] 王军,严有龙,王金满,等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J]. 生态学报,2021,41(14):5837-5848.
- [22] MYERS N. Threatened biotas: "Hot spots" in tropical forests[J]. Environmentalist, 1988, 8:187-208.
- [23] SCHROTER M, REMME R P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: Comparing hotspots with heuristic optimization[J]. Landscape Ecology, 2016, 31:431-450.
- [24] 赵晓同,王建,苏军德,等. 基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. 农业工程学报,2020,36(18):301-308.
- [25] 北京市园林绿化局,北京市自然保护地基本情况[EB/OL]. http://yllhj.beijing.gov.cn/ztxx/zrbhd/202010/t20201029_2124812.shtml.
- [26] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN-KRAMER B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the Total Environment, 2016, 540:63-70.
- [27] SHARP R, DOUGLASS J, WOLNY S, et al. InVEST 3. 8. 9 user's guide[M/OL]. [2020-06-01]. <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/>.
- [28] 陈永国,刘维军,荣月静,等. 基于土地利用与植被覆盖度的大通北川河源区自然保护区生境质量评估[J]. 水土保持研究,2020,27(6):332-337,393.
- [29] 白健,刘健,余坤勇,等. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量十年变化评价[J]. 林业勘察设计,2015(2):5-12.
- [30] 刘智方,唐立娜,邱全毅,等. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J]. 生态学报,2017,37(13):4538-4548.
- [31] 徐丹丹,侯光雷,董凯凯,等. 基于参照基准的湿地生物多样性保护成效区域对比评估[J]. 湿地科学,2018,16(2):120-129.
- [32] HARTIGAN J A. Clustering Algorithms; John Wiley & Sons [J]. Science, 1918, 47(3):100.
- [33] ANSELIN L. Local indicators of spatial association d LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27:93-115.
- [34] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L, et al. Global effects of landuse on local terrestrial biodiversity[J]. Nature, 2015, 520(7545):45-50.
- [35] 薛达元,蒋明康. 中国自然保护区对生物多样性保护的贡献[J]. 自然资源学报,1995,10(3):286-292.
- [36] GELDMANN J, BARNES M, COAD L, et al. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines [J]. Biological Conservation, 2013, 161:230-238.
- [37] 欧阳志云,杜傲,徐卫华. 问题与对策:我国生物多样性格局与自然保护地体系建设[J]. 人与生物圈,2018(5):42-43.
- [38] RIVIECCIO R, SALLUSTIO L, PAOLANTI M, et al. Where landuse changes occur: Using soil features to understand the economic trends in agricultural lands [J]. Sustainability, 2017, 9(1):20.
- [39] 刘雪华,靳强. 秦岭中段南坡 NDVI 格局与生境质量变化研究[J]. 林业调查规划,2008,33(3):8.
- [40] 刘春芳,王川,刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制——以榆中县为例[J]. 地理研究,2018,37(2):419-432.
- [41] 彭建,吴见,徐飞雄,等. 基于价值评估的黄山市生境质量时空演变特征分析[J]. 生态学报,2021,41(2):665-679.

责任编辑:许易琦