

DOI: 10.5846/stxb202108202319

王子尧, 黄楚梨, 李惊, 林箐. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5789-5798.

Wang Z Y, Huang C L, Li L, Lin Q. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5789-5798.

耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估

——以博尔塔拉蒙古自治州为例

王子尧, 黄楚梨, 李 惊*, 林 箐

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要:生态分区规划是平衡区域生态保护与发展建设, 促进区域可持续发展的重要手段。以博尔塔拉蒙古自治州为例, 通过耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型, 在评估研究区生境质量与人类足迹指数的基础上, 进行生态分区规划。利用 2005 年与 2020 年两期土地利用数据, 借助 PLUS 模型模拟自然发展与规划保护两种情景下研究区 2035 年的土地利用状况, 并动态评估不同情景下的生态系统服务水平, 对比分析不同情景的实际效益。结果表明: (1) 研究区整体生境质量较好, 有 56% 的区域生境质量等级为高; 研究区人类足迹指数呈现四周低、中部高的分布格局。(2) 综合生境质量与人类足迹指数, 可以将研究区划分为重点保护区、重点修复区以及适度开发区三个生态管制分区, 其中重点保护区面积占比为 52.8%, 重点修复区面积占比为 42%, 适度开发区面积占比为 5.2%。(3) 对 2035 年两种情景下的土地利用模拟与生态系统服务价值评估表明, 规划保护情景下生态系统服务总价值较自然发展情景下提升 4.16 亿元, 研究区生态条件有明显改善。

关键词:生境质量; 人类足迹指数; PLUS 模型; 生态分区规划; 生态系统服务

Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture

WANG Ziyao, HUANG Chuli, LI Liang*, LIN Qing

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Ecological zoning planning is an important means to balance regionally ecological protection and development, and to promote regional sustainable development. Taking Bortala Mongolian Autonomous Prefecture as an example, the ecological zoning planning was carried out on the basis of assessing the habitat quality and human footprint index in the study area by coupling the InVEST-HFI-PLUS model. Based on the land use data of 2005 and 2020, the PLUS model was used to simulate the land use status in 2035 under the two scenarios with natural development and planned protection, to evaluate the ecosystem service level under different scenarios, and to compare and analyze the actual benefits of different scenarios. The results indicated that: (1) the overall habitat quality of the study area was good, and 56% of the regions had high habitat quality grade. The HFI (Human footprint index) showed a pattern of low in the periphery and high in the middle of the study area. (2) Based on the combination of habitat quality and human footprint index, the study area could be divided into three ecological control zones: key protection area, key restoration area, and moderate development area. The key protection area accounted for 52.8%, the key restoration area accounted for 42%, and the moderate development

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32071833); 北京林业大学热点追踪项目(2021BLRD25)

收稿日期:2021-08-20; **网络出版日期:**2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lilian@bjfu.edu.cn

area accounted for 5.2%. (3) Based on the land use simulation and ecosystem service value assessment in 2035 under the two scenarios, the total value of ecosystem services under the planned conservation scenario would be 416 million yuan higher than that under the natural development scenario, and the ecological conditions in the study area would be significantly improved.

Key Words: habitat quality; human footprint index; PLUS model; ecological zoning planning; ecosystem services

改革开放以来,伴随着经济的飞速发展及城市化进程的不断加快,以城市与耕地扩张为代表的人类活动导致了区域生境的破碎与退化,也对区域生态系统服务水平产生了深刻影响^[1-2]。不合理的人类活动对自然界的破坏,被认为是生境质量下降和生物多样性丧失的最大动因^[3-4]。随着我国生态文明建设的推进,如何科学地配置有限的空间资源,合理协调生态保护与经济发展的关系,成为决策者与相关学者关注的热点问题^[5-8]。

生态分区规划由于具有较强的前瞻性,并且能够辅助决策者明确地区生态保护与建设重点,已逐渐成为制定地区科学发展规划的重要手段之一^[9]。目前国内外关于生态分区规划的研究大多通过选取可以合理评价研究区域生态保护与经济发展等多方面价值的指标,运用矩阵分析法^[10,11]、聚类分析法^[12]、阈值法^[13]、多准则决策分析法^[14]、动态分析法^[8]等方法进行生态分区的划定,并在此基础上确定不同分区的主导功能与管控措施。然而,这些研究大多仅以明确分区的范围与功能为目标,对于分区规划实施后,研究区域未来的生态环境能否得到切实的改善,缺乏科学的动态情景模拟与效益评估。

本文以新疆博尔塔拉蒙古自治州为例(以下简称博州),利用 InVEST 模型对博州的生境质量进行量化评估,通过人类足迹指数(HFI)表征人类活动对场地生态环境影响的分布信息,在此基础上对研究区进行生态分区规划。此外,本研究使用 Liang 等^[15]开发的 PLUS 模型,以博州 2005 年与 2020 年两期土地利用数据为基础,动态模拟研究区在自然发展与规划保护两种情境下 2035 年的土地利用变化,并通过对比不同情境下的生态系统服务价值,合理评估生态分区规划的实际效益。本文通过耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型,既合理地划定了研究区域的生态分区,明确了不同分区的管控措施,也通过未来土地利用情景模拟的方法验证了分区规划的可行性,弥补了该领域研究的空白。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

博尔塔拉蒙古自治州位于新疆维吾尔自治区西北部,地处亚欧大陆腹地。博州西、北、南三面环山,中部是扇形河谷平原,整个地形呈喇叭状,由南、北、西逐渐向中、东部逐渐开阔。博州具有“两湖三山”的独特地貌,森林、草原、绿洲、沙漠、戈壁、冰川、湖泊、湿地等各种自然资源一应俱全,素有“西来之异境,世外之灵壤”之称^[16]。同时,博州作为与哈萨克斯坦接壤的“西部门户”,是天山北坡经济带最重要的生态安全屏障。随着“生态立州”战略地深入实施,经济发展与生态改善的良性互动逐渐成为博州未来发展中的关键问题。

1.2 数据来源

本研究中所使用的 2 期土地利用数据(2005 年、2020 年)来源于中国科学院资源环境数据共享中心,土地利用类型分为 6 类:耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地;DEM 高程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30m;气象数据(包括年均温度、年均降水量、干燥度等)、土壤数据(土壤类型与侵蚀强度)以及社会经济数据(GDP 与人口密度)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1km;放牧数据来自于世界粮农组织(FAO)的 Gridded Livestock Density 数据集(<https://data.apps.fao.org/>),空间分辨率为 1km;夜间灯光数据来源于地球观测组织(EOG)的 VIIRS_DNB_VNLV2 数据集(<https://eogdata.mines.edu>),空间分辨率为 500m;现状道路、铁路、河流水域、主要城镇以

及村庄点位等矢量数据来源于 BIGEMAP 地图下载器。以上数据在 Arc GIS 中进行投影变换、裁剪、重采样等一系列数据预处理工作后,统一转化为 30m×30m 的栅格数据。

2 研究方法

2.1 生境质量评价

生境质量反映了生态系统能够提供物种生存繁衍条件的潜力^[17]。生境质量被视为区域生物多样性和生态系统服务水平的重要表征,也是保障区域生态安全和提升人类福祉的关键环节^[18–20]。

InVEST 模型中的生境质量模块是目前应用较为广泛的生境质量评估模型,有数据较易获取、评估准确度高、空间可视化能力强的特点^[21]。该模型通过量化不同土地利用类型对动植物的生境适宜度以及生境威胁因子的威胁强度,模拟生境质量的空间分布。具体公式如下:

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

式中, Q_{xj} 表示土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 表示土地利用类型 j 的生境适宜度; D_{xj} 表示土地利用类型 j 中栅格 x 的受威胁度; k 为半饱和常数, z 为常数 2.5,受威胁度 D_{xj} 由以下公式计算可得:

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

式中, r 为威胁因子; y 是 r 威胁栅格总数; Y_r 为 r 威胁因子中的一组威胁栅格数; w_r 为威胁因子 r 的权重; r_y 为栅格 y 的威胁因子值; i_{rxy} 为威胁栅格 y 的威胁因子 r_y 对栅格 x 的威胁度; β_x 为栅格 x 的可达性水平; S_{jr} 是土地利用类型 j 对于威胁因子 r 的敏感度。

本文的生境质量评价以 2020 年为分析基准年,2020 年博州土地利用分布如图 1 所示。根据博州的实际状况,本文选择受人类活动干扰较大的耕地、建设用地以及未利用地作为博州生境质量的威胁因子。依据 InVEST 模型用户手册推荐的参考值,参考前人在新疆地区进行的研究^[22–23],初步确定研究所需的各项参数。在此基础上,通过咨询新疆本地的生态学专家,考虑到受自然条件限制,博州境内的建设用地规模较小,城镇开发对于生境质量有较大的威胁这一事实,对上述参数中建设用地的影响距离、权重以及敏感度进行调整,最终确定了本研究中 InVEST 模型的各项参数(表 1、表 2)。

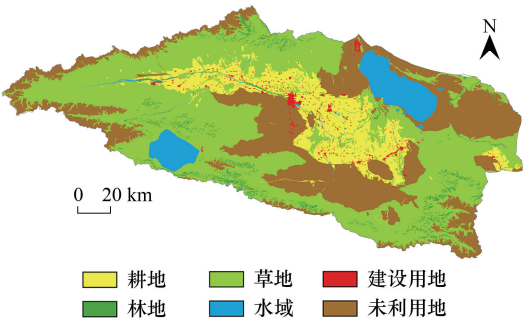


图 1 2020 年博州土地利用分布图
Fig.1 Land use map of Bozhou in 2020

表 1 威胁因子权重及影响距离
Table 1 Threat factor weight and effect distance

威胁因子 Threat factor	最大影响距离/km Maximum effect distance	权重 Weight	衰减类型 Decay type
耕地 Cultivated land	2	0.2	线性
建设用地 Construction land	8	1	指数
未利用地 Unused land	3	0.4	线性

2.2 人类足迹指数评价

人类活动的评价往往通过其引发的相关效应进行间接评估。其中,由 Sanderson 等^[24]提出人类足迹指数(HFI)在人类活动影响评价等方面得到了广泛的应用。基于人类足迹指数方法,根据博州的实际发展状况与

前人研究^[25-27],结合数据可得性,最终选取了土地利用、人口密度、夜间灯光指数、放牧强度以及交通可达性 5 种类型的人类活动表征因子。在此基础上将各类数据的栅格重新赋值为 1—10 分,分值越大表示人类活动强度越大。HFI 评价与生境质量评价所使用的数据年限保持一致,均为 2020 年数据。其中由于放牧强度数据的原数据集仅更新至 2010 年,因此参照前人的研究^[27]对原图层进行趋势外推分析,以得到 2020 年放牧强度数据。

表 2 土地利用类型对威胁因子的敏感性
Table 2 Sensitivity of land types to each threat

土地利用类型 Land use type	生境适宜度 Habitat suitability	敏感程度 Sensitivity		
		建设用地 Construction land	耕地 Cultivated land	未利用地 Unused land
耕地 Cultivated land	0.4	0.9	0.2	0.5
林地 Forest	1	0.8	0.5	0.2
草地 Grassland	0.9	0.5	0.2	0.3
水域 Water area	1	0.6	0.4	0.5
建设用地 Construction land	0	0	0	0
未利用地 Unused land	0.1	0.3	0.1	0.2

其中人口密度、夜间灯光指数以及放牧强度通过自然间断点法将数据由低到高划分为 10 类,分别赋值 1—10;土地利用数据是反映人类活动的重要因子,本文将所有建设用地赋值为 10,耕地赋值为 7,其余土地利用类型均赋值为 1 分;交通可达性评价包括公路与铁路两个方面,在对两者进行多环缓冲区分析的基础上,根据专家打分对每个缓冲区分别进行赋值,并将生成的公路与铁路分数图进行镶嵌,重叠部分取最大值,以此作为交通可达性评价结果。将处理后的上述因子进行叠加处理,计算得出博州的人类足迹指数。

2.3 InVEST 模型与 HFI 的耦合以及生态空间规划

InVEST 模型与 HFI 的评价结果分别表征了研究区域生态保护价值的高低与人类活动影响的强弱。将二者作为衡量区域“保护”与“发展”价值的指标,建立二维判别矩阵,并最终明确研究区域的生态分区。

将 2020 年博州生境质量与人类足迹指数分别按自然间断点法分为低、中、高三个等级,在 ArcGIS 中进行叠置分析,得到 9 种生境质量-人类活动空间类型。在此基础上,依据其功能特点将 9 种空间划分为重点保护区、重点修复区以及适度开发区 3 类生态管制分区。

其中,重点保护区指现状生境条件较好,且人类活动相对较少的区域,包含高生境质量-低人类活动(31)、高生境质量-中人类活动(32)、中生境质量-低人类活动(21);重点修复区为在人类不合理的开发活动或自然环境变化的影响下导致的现状生境质量较差,无法满足人们对于高质量人居环境需求的区域,包括低生境质量-低人类活动(11)、低生境质量-中人类活动(12)、低生境质量-高人类活动(13)、中生境质量-高人类活动(23);适度开发区指在平衡生境质量与发展需求的前提下,可适度进行城市扩张的区域,包含中生境质量-中人类活动(22)、高生境质量-高人类活动(33)。

2.4 未来土地利用情景模拟

本文选用 PLUS 模型进行未来土地利用情景模拟。PLUS 模型既保留了 Flus 模型中基于驱动因子的适宜性概率的计算过程,又结合了 ANN-CA 模型中基于两期土地利用数据间各类用地相互转化的样本训练。从两期土地利用间变化的部分中采样,采用随机森林算法逐一对各类用地扩张和驱动力因素进行挖掘。Liang 等的研究表明,PLUS 模型的模拟精度高于目前相关研究中常用的各类模型,模拟结果可以更好地支持规划政策以实现可持续发展^[15]。

本研究以 2005 年与 2020 年两期土地利用数据为基础,选取土地利用变化的驱动因素共计 15 项(图 2)作为预测变量输入至 PLUS 模型中,计算得出博州各土地利用类型的适宜性概率。在此基础上以 2005 年土地利用空间分布图作为模拟基准图,在 PLUS 模型中运行得到 2020 年土地利用模拟分布图。同时,本研究将

相同的数据输入 Flus 模型中进行模拟,对比验证 PLUS 模型的精度。将 2 种模型的模拟结果与实际的 2020 年数据进行对比,结果表明,PLUS 模型的总体精度为 84.2%,Kappa 系数为 0.759; Flus 模型的总体精度 73.3%,Kappa 系数为 0.606。PLUS 模型的模拟精度高于 Flus 模型,模拟结果可靠性高。因此,本文利用 PLUS 模型,以 2020 年的土地利用数据为基准,设置自然发展与规划保护两类情景,预测 2035 年的土地利用分布情况。

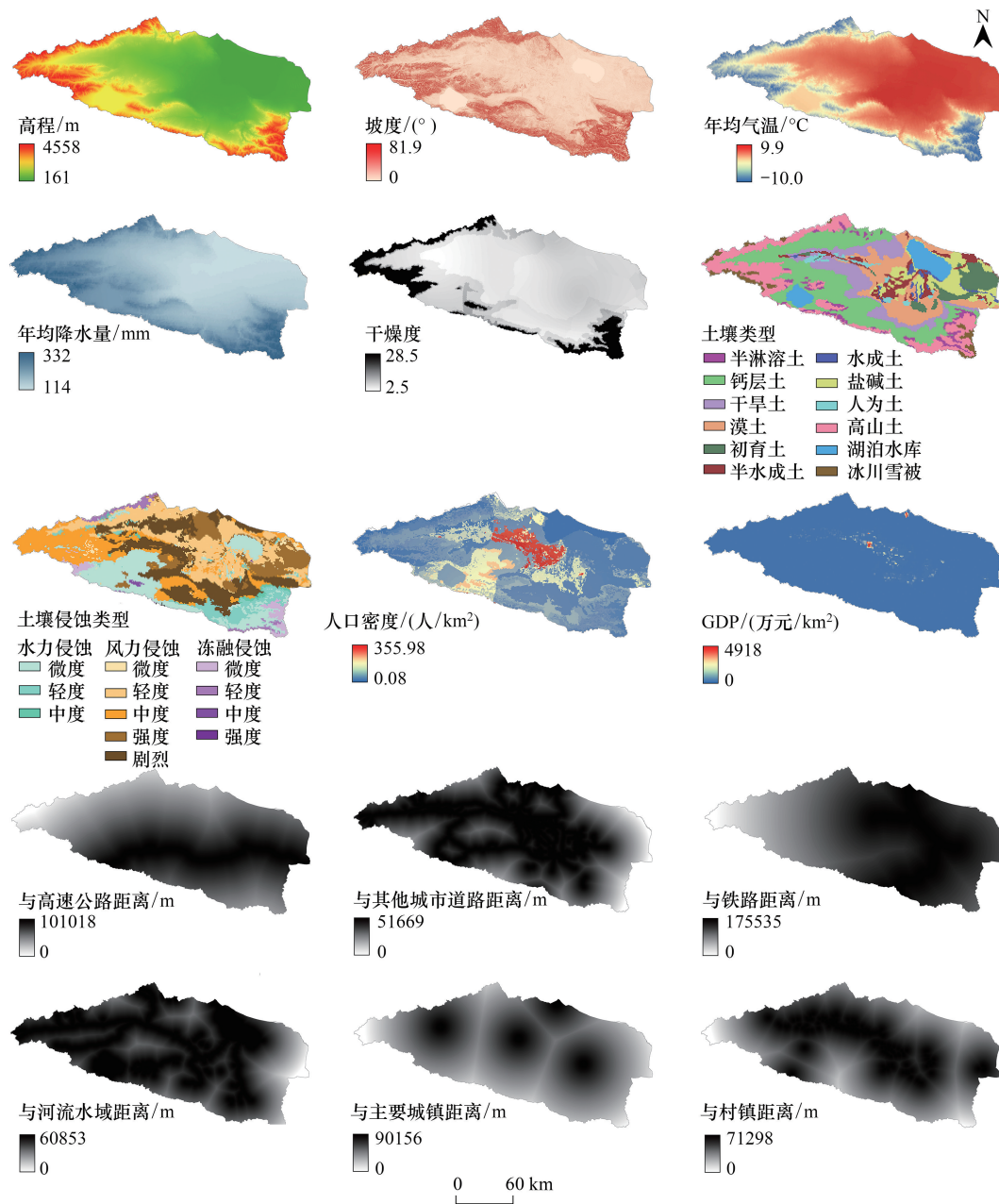


图 2 土地利用变化驱动因素

Fig.2 Driving factors of land use change

自然发展情景延续 2005—2020 年的土地利用变化趋势,不对模型参数进行任何调整;而在规划保护情境下,将重点保护区设置为限制转化区域;重点修复区内各用地类型的适宜性概率以 2020 年为基准,以 2005 年为目标的方式进行逆转移概率计算,并镶嵌至原有适宜性概率栅格上;适度开发区则不调整转化参数,据此模拟 2035 年的土地利用变化。

2.5 不同情景下的生态系统服务量化分析

当量因子法是目前最常用的生态系统服务量化方法,该方法最早由 Costanza 等^[28]提出,谢高地等对该方法进行了改进并得出中国的生态系统服务价值当量^[29]。本研究中的耕地、林地、草地、水域、未利用地分别对应谢高地等研究中的农田、森林、草地、河流、荒漠,并将研究区建设用地的生态系统服务价值设置为 0。通过查阅 2005—2020 年《新疆统计年鉴》中的粮食数据,根据单位面积农田粮食生产的经济价值量和区域修正系数(新疆为 0.58)^[30—33],2020 年研究区平均粮食价格为 2.11 元/kg(根据研究区小麦与玉米价格的均值),最终确定研究区 1 个生态系统服务价值当量因子经济价值约为 1209.87 元/hm²,最终得到研究区生态系统服务价值系数(表 3)。

表 3 博州生态系统服务价值系数表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 3 Coefficient table of the Ecosystem Services Value in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture

一级分类 First category	二级分类 Second category	生态系统服务价值系数					合计 Total
		耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	未利用地 Unused land	
供给服务 Provisioning services	食物生产	1028.39	375.06	266.17	967.9	12.1	2649.62
	原料生产	483.95	859.01	399.26	278.27	36.3	2056.79
	水资源供给	24.2	447.65	217.78	10029.82	24.2	10743.65
调节服务 Regulating services	气体调节	810.61	2843.19	1379.25	931.6	133.09	6097.74
	气候调节	435.55	8505.39	3653.81	2770.6	120.99	15486.34
	净化环境	120.99	2407.64	1209.87	6714.78	375.06	10828.34
	水文调节	326.66	4246.64	2673.81	123697.11	254.07	131198.29
支持服务 Supporting services	土壤保持	1246.17	3460.23	1681.72	1125.18	157.28	7670.58
	维持养分循环	145.18	266.17	133.09	84.69	12.1	641.23
	生物多样性	157.28	3145.66	1536.53	3085.17	145.18	8069.82
文化服务 Cultural services	美学景观	72.59	1379.25	677.53	2286.65	60.49	4476.51
合计 Total		4851.57	27935.89	13828.82	151971.77	1330.86	—

3 研究结果

3.1 生境质量与人类足迹指数评价结果

利用 InVEST 模型模拟研究区域生境质量,并参照前人研究^[12,34—35],在 ArcGIS 中利用自然断点法将生境质量评价结果分为低(0—0.20)、中(0.20—0.61)、高(0.61—1)三个等级,得到博州生境质量评价结果(图 3)。

博州生境质量等级以中、高等级为主,其中,高等级生境质量区域约占 56%,主要分布于研究区西侧及南侧海拔较高处的大面积草原、森林以及湖泊地区。中等级生境质量区域约占 13%,主要分布于场地中部的河谷平原区,由于地势平缓,水文条件较好,因而分布有较为密集的村镇以及大面积的农田,生境质量相对较低。低等级生境质量区域约占 31%,主要包括河谷平原边缘的大面积未利用地、研究区西北部的高山地区以及东部的荒漠地区。

在 ArcGIS 中利用自然断点法将人类足迹指数评价结果分为低(3—10)、中(10—19)、高(19—47)三个等级,得到博州人类足迹指数评价结果(图 4)。

博州人类足迹指数总体上呈现四周低,中部高的分布特征。人类足迹指数较高的区域约占全州面积的 16%,主要分布于研究区中部的河谷平原地区以及通往伊犁的高速公路沿线地区。人类足迹指数中等的区域占 42%,主要分布于研究区西南部的草原地区。而东部的荒漠地区以及西部与北部的高山地区由于自然条件相对恶劣且开发难度较大,人类足迹指数处于较低的水平。

3.2 生态分区规划结果

通过对生境质量与人类足迹指数的叠置分析,可得到如图 5 所示的 9 种空间类型,依据本文 2.3 节所述

方法进行进一步分类,生成生态管制分区结果(图6)

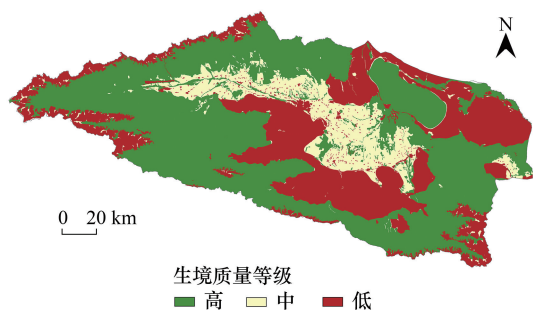


图3 生境质量评价结果

Fig.3 Evaluation results of habitat quality

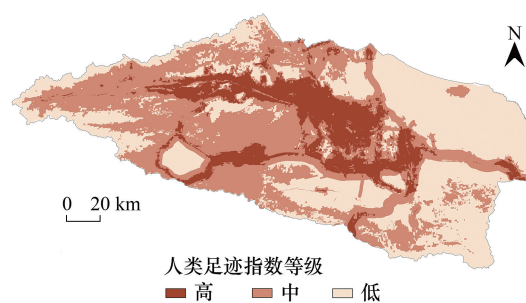


图4 人类足迹指数(HFI)评价结果

Fig.4 Evaluation results of Human footprint index (HFI)

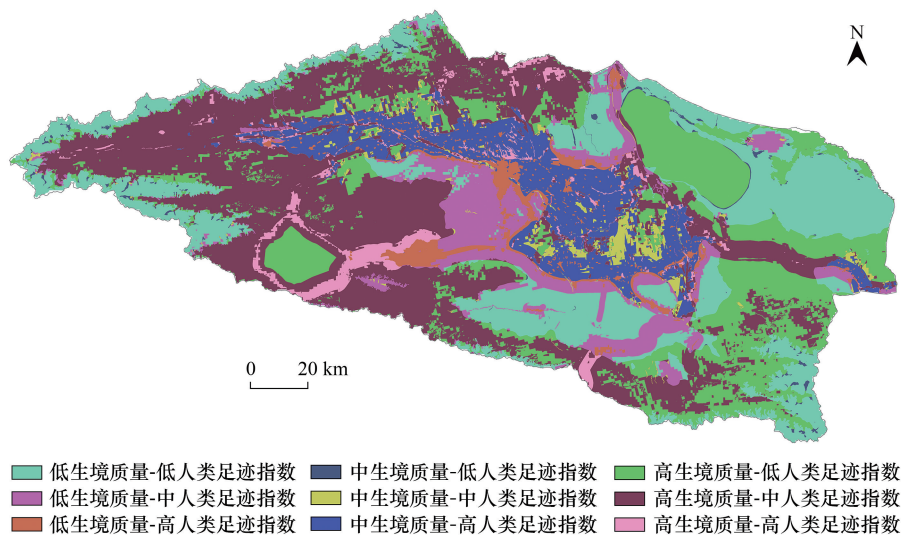


图5 生境质量与人类足迹指数叠加分析结果

Fig.5 Superposition analysis results of habitat quality and HFI

重点保护区面积共计 13044km², 占总面积的 52.8%。该区域主要由大面积的天然林地、草原、湖泊、湿地等组成, 现状生境质量较高, 是博州的生态屏障。重点保护区内应实施严格管控, 原则上禁止各类对生境造成威胁的开发活动, 保障生态系统的稳定性。

重点修复区面积共计 10370 km², 占总面积的 42.0%。主要包括研究区中部的河谷平原、中部未利用地以及东部荒漠地区, 是现状生境质量较差或较容易受到人类活动影响而导致进一步退化的区域。重点修复区应在保持耕地数量与质量的基础上, 通过山水林田湖草沙一体化的生态修复策略, 逐步完善水土保持、水源涵养以及防风固沙等生态功能, 逐步改善区域生境条件, 增加生物多样性。

适度开发区面积共计 1295km², 占总面积的 5.2%。适度开发区分布较为零散, 主要包括博尔塔拉河中下游、赛里木湖周边以及 G30 沿线, 这些地区往往生境质量一般, 但适宜进行开发建设活动。适度开发区的开

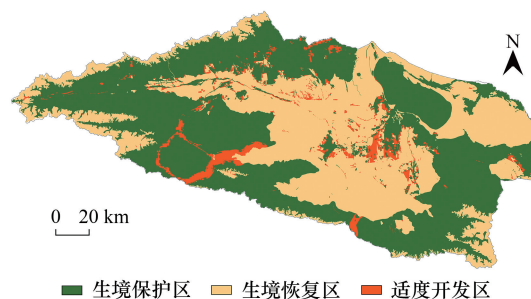


图6 生态分区规划结果

Fig.6 Ecological zoning planning results

发建设活动可以成为博州城市产业结构布局调整的契机,通过发展生态产业以及原有产业的生态化改造,逐步形成环境友好、附加值高的绿色产业格局,助推经济高质量发展。

3.3 土地利用情景模拟与生态系统服务评估

根据生态分区规划结果,利用 PLUS 模型模拟博州 2035 年自然发展情景(情景 I)与规划保护情景(情景 II)下的土地利用状况(图 7),进而评估不同情景下的生态系统服务价值,并与 2020 年的数据进行对比分析,结果如表 4 与图 8 所示。

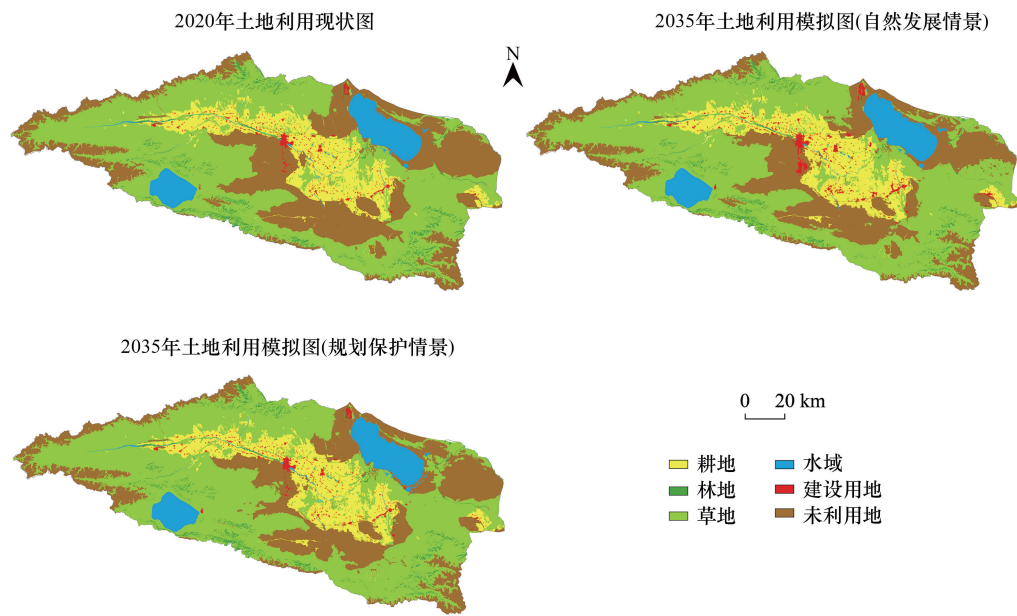


图 7 土地利用情景模拟
Fig.7 Land use scenario simulation

表 4 生态系统服务价值评价结果

土地利用类型 Land use type	总服务价值 Ecosystem service value/亿元			服务价值变化量 Changes in ecosystem service value/亿元	
	2020 年	2035 年情景 I	2035 年情景 II	情景 I—2020 年	情景 II—2020 年
耕地 Cultivated land	15.56	16.27	15.81	0.71	0.26
林地 Forest	16.94	14.19	15.21	-2.75	-1.73
草地 Grassland	164.87	176.07	179.81	11.21	14.94
水域 Water area	220.79	225.61	225.61	4.82	4.82
未利用地 Unused land	9.86	8.52	8.38	-1.33	-1.48
合计 Total values	428.01	440.66	444.82		

自然发展情景下,耕地与城市建设用地有较大幅度的扩张,林地面积持续减少,水域面积有所增加,一部分未利用地转化为草地、耕地以及建设用地。生态系统服务价值总量从 2020 年的 428.01 亿元提升至 440.66 亿元,这主要得益于博州近五十年来持续不断的退耕还林、还牧还草以及重点防护林营建等的生态工程的实施。通过对服务价值变化量的空间分布可以得出,在该情景下,相较于 2020 年生态系统服务价值提升的区域有 980.5 hm²,服务价值下降的区域共计 256.9 hm²。

规划保护情景下,耕地与城市建设用地的扩张得到了一定程度的控制;林地面积虽然相较于 2020 年有所减少,但与自然发展情景相比显著增多,证明生态分区规划可以有效遏制林地面积的持续萎缩;相较于自然发展情景,更多的未利用地向草地、林地转化。生态系统服务价值总量达到了 444.82 亿元,比自然发展情景提

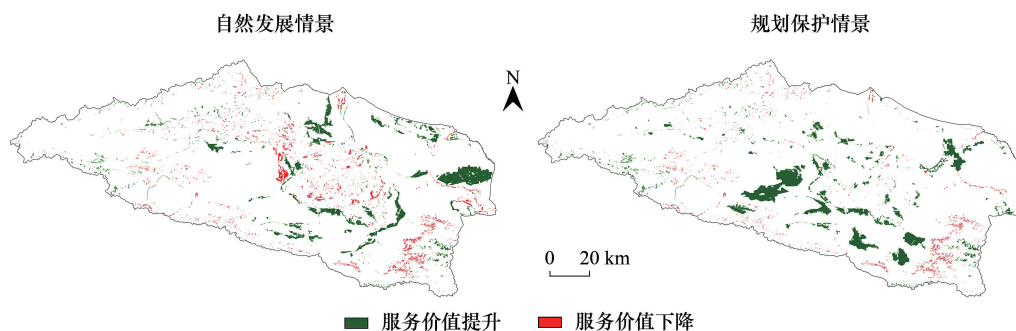


图8 不同情景下 2035 年与 2020 年生态系统服务价值变化分布图

Fig.8 Change distribution of ecosystem service value in 2035 and 2020 under different scenarios

升了 4.16 亿元。同时,对服务价值变化量的空间分布的分析显示,在该情景下,生态系统服务价值相较于 2020 年提升的区域面积为 1243.3 hm^2 ,而服务价值下降的区域仅有 74.7 hm^2 。

通过多组数据的对比,规划保护情景下的生态系统服务价值不仅总量高于自然发展情景,而且相较于 2020 年,价值提升区域的占地面积更大,价值降低区域的面积更小。利用生态分区规划的方法可以更好的平衡生态安全与发展建设间的关系,对生态系统服务价值的提升具有显著作用。

4 讨论与结论

4.1 讨论

在当前快速城镇化的进程中,科学合理的生态分区规划可以促进生态环境的改善,保障城市的可持续发展。相较于过去的研究,本文的创新点主要在于以下 3 点:(1)过去的研究常通过生态适宜性和开发适宜性等评价方法构建生态分区^[8,10-13],一些研究由于数据获取困难等原因,适宜性评价指标体系的科学性与完善度有待提升^[36],本研究采用目前较为成熟的 InVEST 模型与 HFI 相耦合进行综合评价,数据获取相对简单,研究结果可靠。(2)过去的研究往往以构建生态分区为最终目标,对于分区规划实施后,未来研究区的生态环境质量缺乏科学的预测与对比分析,本研究借助 PLUS 模型,通过情景模拟的方法对比未来不同情境下研究区域的生态系统服务价值,更加直观地反映了分区规划的实际效益。(3)本研究通过构建从适宜性评价,到分区规划,再到绩效评估与验证的完整研究方法,对过去的生态分区研究进行了延伸与扩展,使得其与实际规划工作可以更好地结合,也为研究区实施生态空间规划提供了科学可靠的数据支撑与建议。

需要注意的是,本研究中构建生态分区的分析与耦合过程均为定量分析,分区结果存在较为分散的现象。因此,在实际的规划实施层面,还应结合场地实际状况与现有规划进行综合评估与定性分析,对分区结果进行进一步的调整与完善。

4.2 结论

本文借助 InVEST 模型对博州生境质量进行评估,采用多指标叠加分析的方法测度博州的人类足迹指数,并通过两者的叠加分析得出博州的生态分区规划。在此基础上,根据生态分区设置自然发展与规划保护两类情景,利用 PLUS 模型对两类情景下 2035 年的土地利用状况进行动态模拟,并对对比分析不同情境下的生态系统服务价值,以评估分区规划的合理性与实际效益。研究结果如下:

(1)博州高质量生境面积占比最高(56%)、次之为低质量(31%),中质量最低(13%)。生境质量较差的区域主要为博州中部河谷平原及其周围的未利用地。相反,博州的人类足迹指数则呈现四周低,中部高的分布格局,指数等级为高、中、低的区域面积占比分别为 16%、42%、42%。

(2)通过对生境质量与人类足迹指数评价结果的叠加分析,并将得到的 9 个分区按照其功能特征进行分类,可以得到重点保护区、重点修复区以及适度开发区。其中重点保护区面积占比最大(52.8%),重点修复区

次之(42.0%),适度开发区最低(5.2%)。

(3)规划保护情景与自然发展情景相比,生态系统服务价值总量提升了4.16亿元。且生态系统服务价值改善的区域面积相较于自然发展情景增加了262.8 hm²,退化的区域面积减少了182.2 hm²,整体的生态环境得到了较大程度的改善。

参考文献(References):

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems//Marzluff J M, Shulenberger E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, Simon U, ZumBrunnen C, eds. Urban Ecology. Boston, MA: Springer, 2008.
- [2] 陈万旭,李江凤,曾杰,冉端,杨斌. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [3] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. Landscape Ecology, 2007, 22(4): 617-631.
- [4] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [5] 郭旭东,谢俊奇. 新时代中国土地生态学发展的思考. 中国土地科学, 2018, 32(12): 1-6.
- [6] Romanelli J P, Fujimoto J T, Ferreira M D, Milanez D H. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. Ecological Engineering, 2018, 120: 311-320.
- [7] 张云路,李雄,田野. 基于景观生态学“源-汇”理论的市域尺度生态功能分区——以内蒙古通辽市为例. 生态学报, 2018, 38(1): 65-72.
- [8] 成超男,胡杨,冯尧,赵鸣. 基于CA-Markov模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462.
- [9] 贾良清,欧阳志云,赵同谦,王效科,肖焱,肖荣波,郑华. 安徽省生态功能区划研究. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260.
- [10] 江伟康,吴隽宇. 基于地区GDP和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [11] 司慧娟. 青海省国土空间综合功能分区与管制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [12] 韩博,金晓斌,项晓敏,赵庆利,林金煌,洪长桥,金志丰,胡静,周寅康. 基于“要素—景观—系统”框架的江苏省长江沿线生态修复格局分析与对策. 自然资源学报, 2020, 35(1): 141-161.
- [13] 陈新闯,李锋,李小倩,胡印红,韩婧,胡盼盼. 珠三角城市群生态空间分区方法与管控对策. 生态学报, 2021, 41(13): 5233-5241.
- [14] 陶国庆,欧晓昆,郭银明,徐倩,遇翹楚,张志明,王崇云. 基于保护价值与保护成本分析的滇西北植被优先保护区识别. 生态学报, 2016, 36(18): 5777-5789.
- [15] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [16] 走进博州[EB/OL]. <http://www.xjboz.gov.cn/info/1928/83601.htm>.
- [17] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.
- [18] 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. 地理研究, 2018, 37(2): 419-432.
- [19] 钟莉娜,王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250-255.
- [20] 陈妍,乔飞,江磊. 基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(3): 553-562.
- [21] 马良,金陶陶,文一惠,吴秀芹,刘桂环. InVEST模型研究进展. 生态经济, 2015, 31(10): 126-131, 179-179.
- [22] 刘方田,许尔琪. 基于土地利用的新疆兵团与非兵团生境质量时空演变的对比. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2341-2351.
- [23] 朱增云,阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3408-3420.
- [24] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild: The human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. BioScience, 2002, 52(10): 891-904.
- [25] Li S C, Wu J S, Jian G, Li S W. Human footprint in Tibet: Assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. Science of the Total Environment, 2018, 621: 18-29.
- [26] 刘世梁,刘芦萌,武雪,侯笑云,赵爽,刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [27] 段群滔,罗立辉. 1990—2015年青藏高原人类足迹数据集. 中国科学数据, 2020, 5(3): 303-312.
- [28] Costanza R, D'Arge R, De Groot R S, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [29] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [30] 谢高地,鲁春霞,冷允法,郑度,李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [31] 刘亚茹,李莉,菊春燕. 天山北坡城市群土地利用及生态服务价值时空演变. 水土保持通报, 2020, 40(6): 312-320.
- [32] 李理,朱连奇,朱文博,徐帅博,李艳红,马贺. 生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡——以淇河流域为例. 中国环境科学, 2020, 40(1): 365-374.
- [33] 黄傅强,王志远,刘慧,齐增湘,吴欣昕. 基于生态系统服务价值的城市增长边界划定研究: 以衡阳市中心城区为例. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1115-1125.
- [34] 张静静,朱文博,朱连奇,李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. 地理学报, 2020, 75(5): 975-988.
- [35] 王惠,许月卿,刘超,黄安,卢龙辉,郑伟然. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 509-518.
- [36] 陈艺,蔡海生,张学玲,曾珩,邵晖,洪士林. 基于MCE的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异. 生态学报, 2021, 41(6): 2236-2247.