

生态空间定量识别及时空演变特征分析 ——以呼伦贝尔市为例

赵海乐^{1,2}, 徐艳^{1,2}, 周翼^{1,2}, 张国梁^{1,2}, 陈鑫³

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193; 3. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084)

摘要: 生态空间作为国土空间的重要组成部分, 是人类生产和生活的基础。以内蒙古呼伦贝尔市为例, 系统构建了综合生态空间重要性指数评价指标体系, 进行生态空间的定量识别研究。并在此基础上, 对生态空间的动态演变特征进行分析, 找寻研究区生态空间的时空分异规律。研究表明: (1) 研究区生态空间重要性指数整体偏高, 研究期间核心型和重要型生态空间占总面积的比例始终处于 50% 水平之上, 且呈现逐渐上升的趋势。(2) 研究区生态空间的综合活跃程度经历了一个逐渐变大的过程, 其中 2015—2018 年生态空间的综合活跃程度尤为强烈。(3) 核心型、重要型和非关键型生态空间的稳定性较好, 并且各类生态空间都主要向着重要性指数较高的生态空间类型进行转换。(4) 生态空间重要性变化具有明显的空间异质性, 研究期间重要性持续处于较高水平的生态空间主要分布在中部大兴安岭林区和核心水体区, 而重要性持续处于较低水平的生态空间主要分布在西部牧区和东部农区。

关键词: 生态空间; 定量识别; 时空演变; 呼伦贝尔市

生态空间作为国土空间的一部分, 不仅构成了生产空间和生活空间的基础, 还为人类提供着各种各样用于生产和生活的生态产品和服务^[1,2]。起初由于我国工业化和新型城镇化的迅猛推进, 我国部分地区生态安全格局呈现破碎化趋势, 生态安全形势面临巨大的考验和挑战^[3,4]。但是随着我国加强生态文明建设, 注重环境保护以来, 生态环境恶化的趋势已经得到有效地遏制。因此, 探讨如何构建经济和生态相互协调的高品质生态空间规划, 从而实现国土空间开发格局优化已经成为生态文明新时代的热点问题。生态空间规划作为国土空间规划体系的重要组成部分, 是健全国土空间用途管制制度的重要内容; 而生态空间定量识别以及对其进行时空演变分析, 是保证规划和管制可以有效进行的前提之一^[5,6]。

目前我国生态空间定量识别的方法可以大致分为两类: 第一类是土地利用类型归并法, 也是目前应用较多的识别方法, 是基于生态要素视角^[7,8]、生态功能视角^[9,10]或主体功能视角^[11,12], 将不同土地利用类型归并到生态空间内, 从而获得生态空间的数量结构和分布格局。这种识别方法操作较为简单, 可以对生态空间的“数量”特征, 即数量结构进行快速识别, 但很难反映某一空间斑块上的“质量”特征, 即生态空间重要性的高低。第二类是空间属性评价法, 它突破了传统的土地利用分类框架, 是基于地类的适宜性、

收稿日期: 2021-08-02; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301614); 国土资源部公益性行业科研专项 (201411009)

作者简介: 赵海乐 (1996-), 男, 河南固始人, 博士研究生, 主要从事土地利用评价研究。

E-mail: b20213211003@cau.edu.cn

通讯作者: 徐艳 (1977-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土地利用评价和土地整治研究。E-mail: xyan@cau.edu.cn

敏感性或服务功能等指标,建立评价体系,采用熵值法、特尔斐法和层次分析法等进行生态空间的定量识别,如生态适宜性评价体系^[13]、生态敏感性评价体系^[14]、生态系统服务功能评价体系^[15,16]以及生态安全格局评价体系^[17,18]。这些评价的原理基本相同,均是将评价结果作为生态空间“质量”的划分基础,并通过制定空间叠加规则,识别生态空间。这种空间识别方法可以反映生态空间的“数量”和“质量”的特征。由于生态空间的后续研究都需要以生态空间定量识别为前提,而当前生态空间动态演变特征等后续研究所基于的生态空间定量识别成果多是采用归并法得到的结果,很少采用评价法得到结果。所以,探究如何将基于属性评价法的生态空间识别成果应用到演变特征分析等后续研究中,是开展生态空间规划和构建国土空间管制制度需要解决的关键科学问题。

因此,本文借鉴景观安全格局的理论和方法,根据当地自然和生态环境状况,基于水源涵养、生物多样性保护、水土保持、防风固沙四个评价因子,构建综合生态空间重要性指数评价指标体系,并以此来划分不同重要水平下的生态空间范围,从而实现生态空间定量识别;同时在此研究成果基础之上,进行生态空间的动态演变分析,找寻研究区生态空间的时空分异规律,以期丰富生态空间定量识别和动态演化研究,并为当地生态空间规划调控提供思路和参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

呼伦贝尔市位于内蒙古自治区东北部,地处中俄蒙三国交界地带,地理位置介于 $47^{\circ}05' \sim 53^{\circ}20'N$ 、 $115^{\circ}31' \sim 126^{\circ}04'E$,其下辖行政地区包含2个市辖区、5个县级市、4个旗、3个自治旗。呼伦贝尔市北部和西北部以额尔古纳河为界与俄罗斯接壤,西部和西



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 研究区范围

Fig. 1 The scope of the research area

南部同蒙古国交界,南部与兴安盟相连,东部以嫩江为界与黑龙江省为邻。西部位于内蒙古高原东北部,中部为大兴安岭山区,东部为东北平原边缘地带,地势西高东低,整体呈现由西向东缓慢过渡的趋势。全市气候特点为典型的温带大陆性气候,降水多集中在夏季,且人均水资源极为丰富。截至2018年,呼伦贝尔市土地总面积为2359.75万 hm^2 ,占自治区总面积的21%左右。其中,耕地面积180.14万 hm^2 ,占土地总面积的7.63%;草地803.11万 hm^2 ,占34.03%;林地1209.26万 hm^2 ,占51.25%,草地和林地等自然资源十分丰富。

1.2 研究方法

1.2.1 构建生态空间定量识别模型

在进行生态空间定量识别研究时,与空间属性评价法相比,土地利用类型归并法虽然简单容易操作,而且和当前土地利用现状分类体系能形成有效衔接,但其依据的生态空间内涵过于宽泛,如此无法突出生态空间的重要性层级,不利于研究成果在土地管理和生态保护等实际工作中的应用。除此之外,它强调土地功能依据土地类型来进行判定,而忽略了空间格局对土地生态功能的影响。但是生态空间定量识别研究不仅需要探究“数量”的问题,更重要的是探究“质量”的问题。因此本文采取空间属性评价的方法,基于水源涵养、生物多样性保护、水土保持、防风固沙四个评价因子来构建生态空间定量识别模型。

(1) 水源涵养重要性指数

主要依据河湖缓冲区距离和植被覆盖度两个因素,来评价水源涵养功能指数的高低^[19-21]。首先选取研究区河流湖泊、水库坑塘以及滩地等用地类型为重要水源地。根据相关学者的研究成果,按照0.5 km步长在水源地周围设置4级缓冲区并进行分级赋值。此外,按照等间距的方法将研究区的植被覆盖度划分为5个级别进行分级赋值(表1)。最后按照同等权重的原则叠加两者的分级赋值结果,综合确定水源涵养功能指数。按照功能越强则重要性越强的原则,将水源涵养功能指数划分为5个级别进行分级赋值,最终得到水源涵养重要性指数。其中水源涵养功能指数计算方法如下:

$$S_3 = S_1 \times 0.5 + S_2 \times 0.5 \quad (1)$$

式中: S_3 为水源涵养功能指数; S_1 为河湖缓冲区距离(m); S_2 为归一化植被指数。

(2) 生物多样性保护重要性指数

主要采取生物多样性服务价值当量来表征研究区生物多样性保护重要性指数。在参考前人研究的中国单位面积生态系统服务价值当量的基础之上^[22-24],计算研究区不同土地利用类型的单位面积生物多样性服务价值当量(表2)。由于生态系统服务价值当量即使在同一种土地利用类型中也存在差异,而以往许多研究利用归一化植被指数来表征生物

表1 水源涵养重要性指数评价因子及分级赋值

Table 1 Evaluation factors and grading assignment of water conservation importance index

评价因子	重要性分级				
	极重要	非常重要	中等重要	一般重要	不重要
水源涵养重要性指数 S					
河湖缓冲区距离 S_1/m	≤ 500	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
植被覆盖度 S_2	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	≤ 0.2
水源涵养功能指数 S_3	>8.0	6.0~8.0	4.0~6.0	2.0~4.0	≤ 2.0
分级赋值	9	7	5	3	1

表2 单位面积生物多样性服务价值当量
Table 2 Biodiversity service equivalent value per unit area

土地利用类型			土地利用类型		
		单位面积生物多样性 服务价值当量			单位面积生物多样性 服务价值当量
耕地	水田	0.21	水域	水库坑塘	2.55
	旱地	0.13		滩地	2.55
林地	有林地	2.60	建设用地	城镇用地	0
	灌木林	2.41		农村居民点	0
	疏林地	1.88		其他建设用地	0
	其他林地	1.57	其他用地	沙地	0.02
草地	高覆盖度草地	2.18		盐碱地	0.02
	中覆盖度草地	1.27		沼泽	7.87
	低覆盖度草地	0.56		裸土地	0.02
水域	河渠	2.55		裸岩石质地	0.02
	湖泊	2.55			

多样性保护功能的重要性^[25]。所以，本文使用归一化植被指数来修正研究区生物多样性服务价值当量，并采取自然断点法将修正后的价值当量划分为5个级别，由低到高分别赋值为1、3、5、7、9，最终得到生物多样性保护重要性指数。其中生物多样性服务价值当量的计算方法如下：

$$E_2 = \frac{NDVI_i}{NDVI_t} \times E_1$$

(2)

式中： E_2 为修正后的生物多样性服务价值当量； E_1 为不同土地利用类型下生物多样性服务价值当量； $NDVI_i$ 为第*i*个栅格的归一化植被指数； $NDVI_t$ 为土地利用类型*t*的平均归一化植被指数。

(3) 水土保持重要性指数

主要通过土壤水蚀敏感性的评价结果来表征水土保持重要性指数，其敏感性越高，则重要性越强。采取水土流失方程（RULSE）来测算水力对土壤的侵蚀量，并且以土壤侵蚀量来表征土壤水蚀敏感性的大小^[26,27]。依据《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007）中的侵蚀程度来确定水土保持重要性指数，将微度侵蚀地区的重要性指数赋值为1、轻度侵蚀地区的重要性指数赋值为3、中度侵蚀地区的重要性指数赋值为5、强烈侵蚀地区的重要性指数赋值为7、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀地区的重要性指数赋值为9。其中水土流失方程（RULSE）的计算方法如下：

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

(3)

式中： A 为土壤侵蚀量（ $t \cdot hm^{-1} \cdot a$ ）； R 为降水侵蚀因子（ $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ ）； K 为土壤侵蚀因子（ $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$ ）； L 为坡长因子； S 为坡度因子； C 为植被覆盖因子； P 为人工措施因子。

(4) 防风固沙重要性指数

主要通过土地沙化敏感性的评价结果来表征防风固沙重要性指数，其敏感性越高，则重要性越强。依据国家环境保护部2015年下发的《生态保护红线划定技术指南》和相关研究成果^[28,29]，建立土地沙化敏感性评价指标体系（表3）。评价指标选取土壤可侵蚀性指数、干燥度指数、植被覆盖度、起沙风天数等因素，并根据各指标的分级赋值标准及

表3 防风固沙重要性指数评价因子及分级赋值

Table 3 Evaluation factors and grading assignment of importance index of wind prevention and sand fixation

评价因子		重要性分级				
		极重要	非常重要	中等重要	一般重要	不重要
防风固沙重要性指数 N	干燥度指数 I	>16.0	$4.0\sim16.0$	$1.5\sim4.0$	$1.0\sim1.5$	≤ 1.0
	起沙风天数 W	>30	$20\sim30$	$10\sim20$	$5\sim10$	≤ 5
	土壤可侵蚀性指数 K	>0.62	$0.52\sim0.62$	$0.42\sim0.52$	$0.27\sim0.42$	≤ 0.27
	植被覆盖度 C	≤ 0.2	$0.2\sim0.4$	$0.4\sim0.6$	$0.6\sim0.8$	>0.8
	土地沙化敏感性指数 D	>8.0	$6.0\sim8.0$	$4.0\sim6.0$	$2.0\sim4.0$	≤ 2.0
分级赋值		9	7	5	3	1

公式进行运算，得到研究区土地沙化敏感性指数。按照敏感性越高则重要性越强的原则，将土地沙化敏感性指数划分为5个级别并进行分级赋值，最终得到防风固沙重要性指数。其中土地沙化敏感性指数的计算方法如下：

$$D = \sqrt[4]{I \times W \times K \times C} \tag{4}$$

式中： D 为土地沙化敏感性指数； I 为干燥度指数； W 为起沙风天数（天）； K 为土壤可侵蚀性指数； C 为植被覆盖度。

(5) 综合生态空间重要性指数

采取累计修正求和的方法来叠加各类单一生态空间重要性指数^[21]，从而得到综合生态空间重要性指数。其中累计修正求和的计算方法如下：

$$EL = \max(S, U, M, N) + [S + U + M + N - \max(S, U, M, N)]/3 \tag{5}$$

式中： EL 为综合生态空间重要性指数； S 为水源涵养重要性指数； U 为生物多样性保护重要性指数； M 为水土保持重要性指数； N 为防风固沙重要性指数。

1.2.2 生态空间变化幅度

借用土地利用变化幅度来表征不同类型生态空间的变化趋势^[30]。生态空间变化幅度计算方法如下：

$$Q_i = \frac{Q_{ib} - Q_{ia}}{Q_{ia}} \times 100\% \tag{6}$$

式中： Q_i 为第*i*类生态空间的变化幅度，正值表示面积增加，负值表示面积减少； Q_{ia} 和 Q_{ib} 为第*i*类生态空间在研究初期和末期的总面积。

1.2.3 生态空间动态变化度

借用土地利用动态变化度来表征不同类型生态空间的变化程度和差异^[31]。生态空间动态变化度计算方法如下：

$$N_i = \frac{Q_{ib} - Q_{ia}}{Q_{ia}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{7}$$

$$N_t = \left(\frac{\sum_i^n |Q_{ib} - Q_{ia}|}{\sum_i^n Q_{ia}} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{8}$$

式中： N_i 为生态空间类型*i*的单一动态变化度； N_t 为*t*时期生态空间综合动态变化度； T 为某一研究周期的时间长度； n 为生态空间类型总数（个）。

1.2.4 生态空间转移矩阵

本文借用土地利用转移矩阵来表征不同类型生态空间相互转换的面积变化^[32]。其中生态空间转移比例的计算方法如下：

$$P_{ij} = \frac{G_{ij}}{G_i} \times 100\%$$
(9)

式中： P_{ij} 为生态空间*i*转化成生态空间*j*的比例（%）； G_{ij} 为生态空间类型*i*转化为生态空间类型*j*的面积（km²）； G_i 为生态空间类型*i*的面积（km²）。

1.2.5 生态空间重要性变化模式

采取对生态空间类型进行编码的方式来分析研究区长时间序列的生态空间重要性变化情况，通过制定分区标准将生态空间重要性变化划分为两种模式^[33]。其中生态空间重要性变化模式分区标准如表4所示。

表4 生态空间重要性变化模式分区标准
Table 4 Regionalization standard of ecological spatial importance change pattern

分区类别		分区标准
生态空间重要性常年不变区	常年非关键型生态空间	2005—2018年间编码值不变且为1
	常年一般型生态空间	2005—2018年间编码值不变且为2
	常年过渡型生态空间	2005—2018年间编码值不变且为3
	常年重要型生态空间	2005—2018年间编码值不变且为4
	常年核心型生态空间	2005—2018年间编码值不变且为5
生态空间重要性波动变化区	生态空间重要性波动上升区	2005—2018年间编码值出现波动且2018年编码值大于等于2005—2018年间编码值的最大值
	生态空间重要性波动下降区	2005—2018年间编码值出现变化且2018年编码值小于2005—2018年间编码值的最大值

1.3 数据来源

本文的数据主要包括基础地理数据、土地利用数据、环境空间数据等。其中，DEM数字高程数据来源于地理空间数据云平台（<http://www.gscloud.cn>）。2005—2018年土地利用覆被数据和归一化植被指数（NDVI）数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（<http://www.resdc.cn>）。气象数据主要包括2004—2019年的日降水量、日平均气温以及日平均风速，来源于中国气象数据网（<http://data.cma.cn>）。土壤数据主要包括粗砂含量、粉砂含量、黏粒含量以及有机质碳含量，来源于世界土壤数据库（Harmonized World Soil Data Base, HWSD）。研究区行政区划数据和河流湖泊水系分布数据来源于全国地理信息资源目录服务系统平台的1：100万全国基础地理数据库（<http://www.web-map.cn>）。以上数据均是采用或处理成1 km分辨率的栅格数据。

2 结果分析

2.1 单因子生态空间重要性指数分布特征

呼伦贝尔市水源涵养重要性指数的空间分布在整体上呈现由东北向西南降低的趋势，并且在局部上呈现以河流和湖泊等水域为中心由内而外依次降低的现象（图2）。这主要是由于研究区东北区域水资源充沛，土地利覆被类型以森林为主，植被覆盖度较高。而西南

区域的土地覆被类型则以草地为主，植被覆盖度较低，且河流湖泊等水系的密度较低。

呼伦贝尔市生物多样性保护重要性指数空间分布上呈现中间高两边低的趋势（图2）。中部以及北部林区的生物多样性功能指数较高，这里人类生产建设活动较少，河流湖泊密集，水资源充足，森林、草原、湿地等动植物栖息地数量较多且完整，生物资源丰富，生态系统的自我调节能力较强。而生物多样性保护重要性指数较低的区域主要分布在西部的草原区以及东部的耕地区，该区域是人类主要聚集居住的地区，人口数量较多且连年增加，农业空间和城镇空间不断扩张，交通和水利水电等基础设施广布，矿产等自然资源的开发力度较大，生态弹性差，生态系统的自我修复能力相对较弱。

呼伦贝尔市水土保持重要性指数空间分布上呈现东北高西南低的趋势（图2）。水土保持重要性指数相对较高的中部和北部低山丘陵区降水较多，地形起伏度较大，且内部水系发达，河流网密集，从而水土流失较为严重。而西部高原和东部平原区域地势较为平缓，降雨较少，且经济发达，人为的水土保持措施较为完善，水土流失较少。

呼伦贝尔市防风固沙重要性指数空间分布上呈现由西南向东北降低的趋势（图2）。

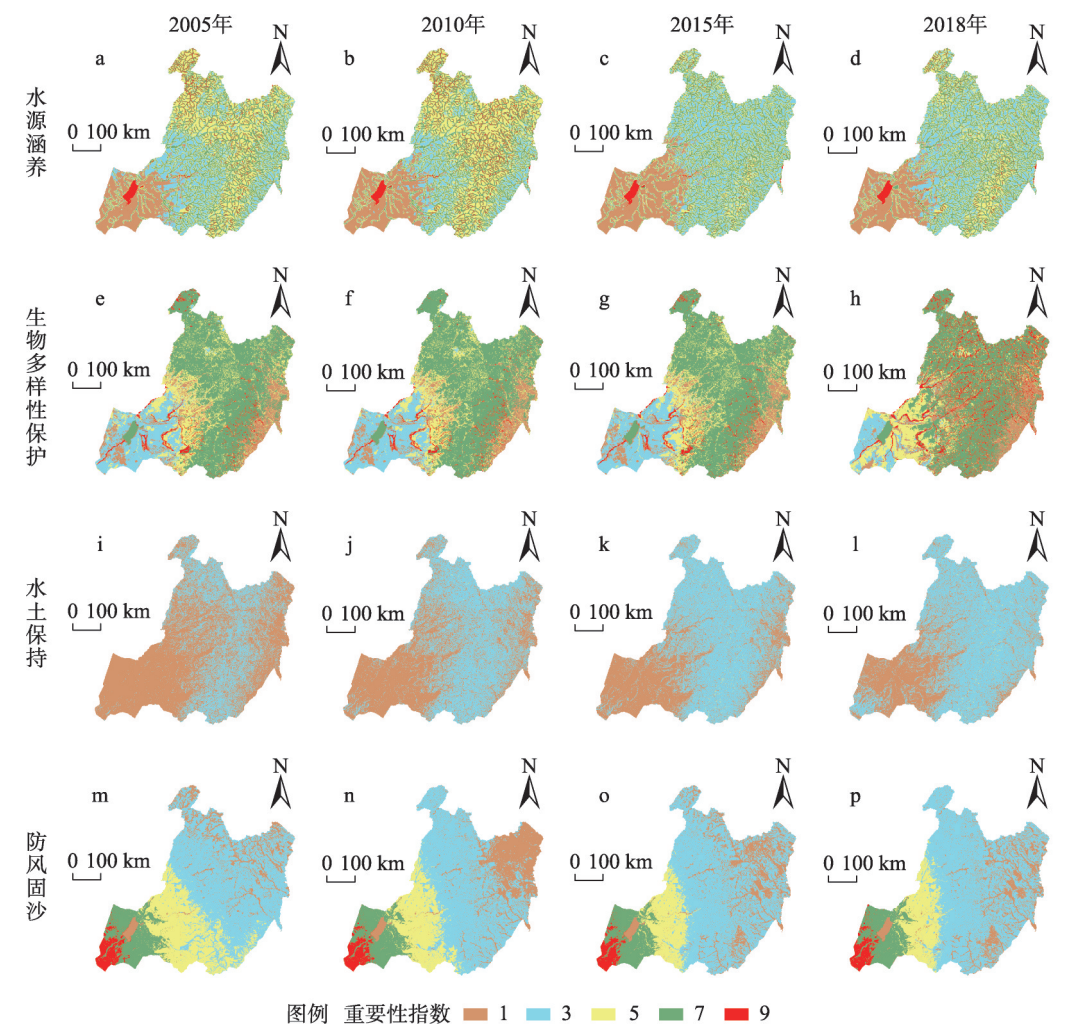


图2 单因子生态空间重要性指数

Fig. 2 Single factor ecological spatial importance index

其中研究区防风固沙重要性指数相对较高的西南区域降水较少，温度较高，且植被覆盖度低，冬春季节起沙风天数较多，从而土地沙化极为严重。而东北区域降水充沛，温度较低，且植被覆盖度高，冬春季节起沙风天数较少，所以土地沙化的敏感性较低。

2.2 生态空间数量变化特征

本文按照综合生态空间重要性指数分级结果，由高到低将生态空间划分为核心型生态空间、重要型生态空间、过渡型生态空间、一般型生态空间以及非关键型生态空间五种不同重要程度下的生态空间范围（图3）。

2.2.1 生态空间变化幅度分析

从2005—2018年阶段来看（图4），核心型生态空间的变化幅度为150.11%，其面积整体呈现波动增加的趋势，占总面积的比例由2005年的6.80%增加到2018年的17.00%；重要型生态空间的变化幅度为10.54%，其面积整体呈现逐渐增加的趋势，其占总面积的比例由2005年的43.15%增加到2018年的47.70%。过渡型生态空间的变化幅度为-34.35%，

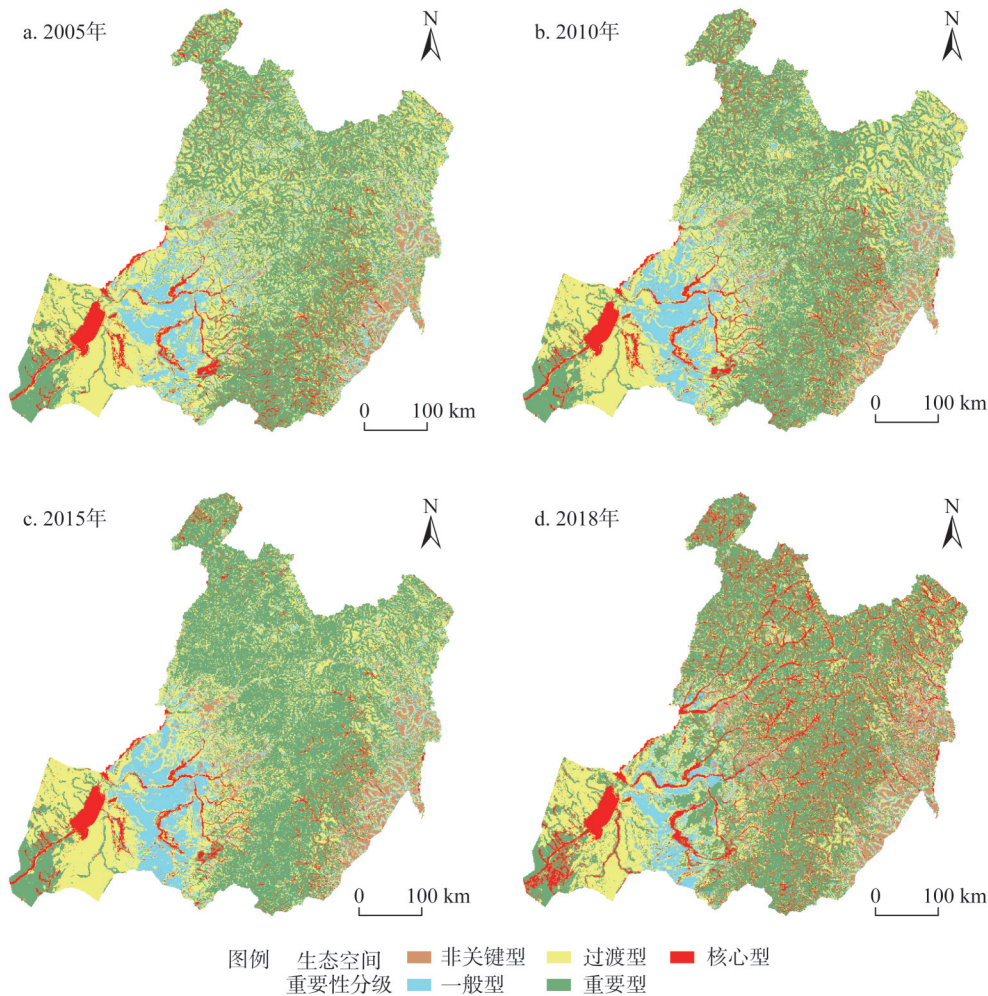


图3 生态空间重要性分级

Fig. 3 Classification of ecological spatial importance

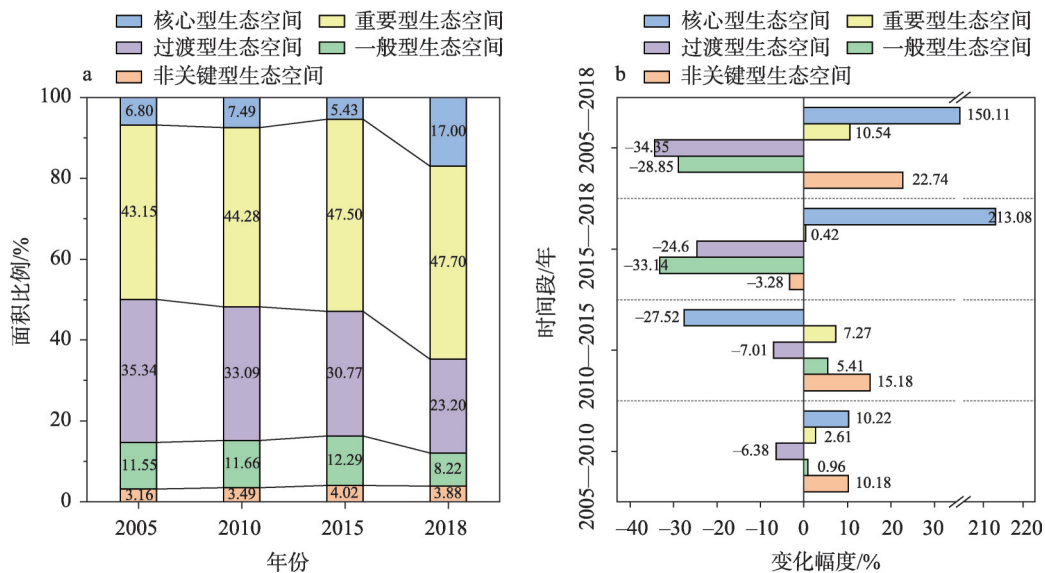


图4 生态空间面积分布与变化幅度

Fig. 4 Area distribution and change range of ecological space

其面积呈现逐渐减少的趋势, 占总面积的比例由2005年35.34%减少到2018年23.20%; 一般型生态空间变化幅度为-28.85%, 其面积呈现先增加后减少的趋势, 占总面积的比例由2005年的11.55%减少到2018年的8.22%; 非关键型生态空间的变化幅度为22.74%, 其面积呈现先增加后减少的趋势, 占总面积的比例由2005年的3.16%增加到2018年的3.88%。

此外, 2005—2015年间, 除了核心型生态空间外, 其他四种类型的生态空间的变化趋势均呈现相同的变化趋势。其中重要型生态空间的面积持续增加, 其占总面积的比例由2005年的43.15%增加到2015年的47.50%; 过渡型生态空间的面积持续减少, 其占总面积的比例由2005年的35.34%减少到2015年的30.77%; 一般型生态空间的面积持续增加, 其占总面积的比例由2005年的11.55%增加到2015年的12.29%; 非关键型生态空间的面积持续增加, 其占总面积的比例由2005年的3.16%增加到2015年的4.02%。

2.2.2 生态空间动态变化度分析

由图5可以看出, 研究区域生态空间2005—2018年间的综合动态变化度为2.38%, 其中核心型的变化速率最快, 达到了11.55%; 其次为过渡型、一般型和非关键型, 分别为-2.64%、-2.22%和1.75%; 重要型的变化速率最慢, 为0.81%。研究区域2005—2010年、2010—2015年、2015—2018年三个阶段的生态空间综合动态变化度分别为0.9%、1.75%、7.85%, 呈现逐渐上升的趋势, 同时也反映出研究区生态空间的综合活跃程度经历了一个逐渐变大的过程。其中2015—2018年的生态空间综合动态度出现明显的升高, 主要原因是这一时期核心型、过渡型和一般型生态空间的面积出现了较为剧烈地变化, 同时也表明该时期生态空间的整体活跃程度尤为强烈。

2005—2015年间, 除了核心型生态空间外, 其他四类生态空间变化趋势相同且逐渐加大。其中核心型生态空间由增加变为减少; 重要型、一般型和非关键型生态空间增加的速率在加快; 过渡型生态空间减少的速率在加快。原因可能在于研究区常年执行人工造林以及封沙育草的政策, 不仅改善了水蚀和风蚀较为严重地区的生态环境, 还提升了水源涵养和维持生物多样性服务功能。2010—2018年间, 除了核心型生态空间外, 其他

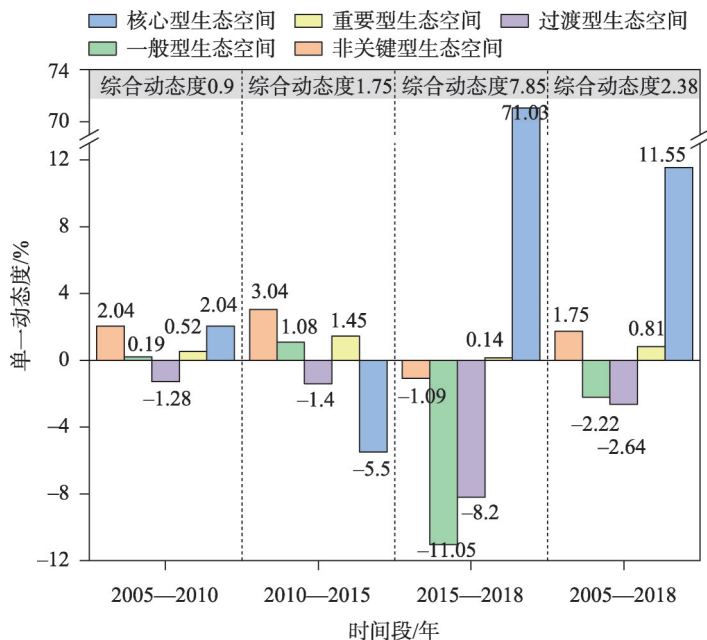


图5 生态空间动态变化度

Fig. 5 Dynamic change degree of ecological space

四类生态空间的变化均存在下降的趋势。其中核心型生态空间由减少变为增加；重要型生态空间增加速率变小；过渡型生态空间减少速率加大；一般型和非关键型生态空间由增加变为减少。这主要是由于2015年以后研究区河流湖泊周围以及降雨增加地区的大量草地转变为沼泽湿地，从而导致这部分区域生物多样性保护重要指数出现剧烈增长，进而造成了其他生态空间都向核心型生态空间进行转移。

2.3 生态空间格局变化特征

2.3.1 生态空间转移矩阵分析

由图6可知，2005—2018年，重要型生态空间的保留比例最高，达到了64.34%；其次为非关键型生态空间和核心型生态空间，保留比例分别为57.39%和50.79%。一方面是因为核心型和重要型生态空间多为森林公园、湿地公园、自然保护区等国家级或省级自然保护地的核心地带，这些生态服务价值极高的区域受到的保护力度较大，其重要性程度稳定且保持较高水平；另一方面则是因为非关键型生态空间内多为建设用地和农用地等用地类型，这些区域是人类活动的聚集区，其重要性程度稳定且处于较低水平。而过渡型生态空间和一般型生态空间的保留比例较低，分别为39.93%和35.48%。主要是因为过渡型和一般型生态空间多为自然生态空间和城镇空间以及农业空间的交界地带，这部分区域由于受到自然和人类活动的影响较大，其重要性程度容易发生改变。同时也说明在研究期间，重要型生态空间的稳定性最好，其次为非关键型生态空间和核心型生态空间，过渡型生态空间和一般型生态空间的稳定性较差。

此外，研究区非关键型生态空间的主要转移类型是一般型、过渡型和重要型生态空间，比例分别为10.8%、12.1%和14.9%。一般型生态空间主要转移类型为过渡型和重要型生态空间，比例分别为25.37%和26.56%；过渡型生态空间主要转移类型是重要型生态空间，比例为39.31%；重要型生态空间的主要转移类型是核心型生态空间，比例为

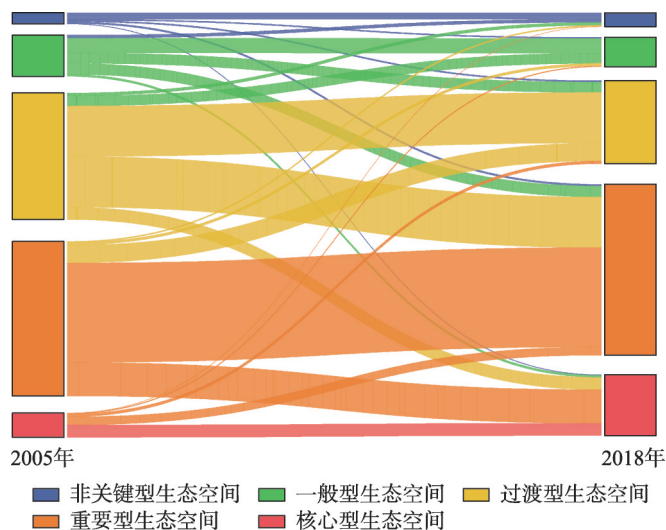


图6 生态空间转移矩阵

Fig. 6 Transfer matrix of ecological space

21.68%; 核心型生态空间的主要转移类型是重要型生态空间, 比例为33.69%。这主要是因为研究期间单因子生态空间重要性指数中, 水源涵养重要性指数和防风固沙重要性指数整体的下降幅度要小于生物多样性保护重要性指数和水土保持重要性指数的上升幅度, 从而导致研究区综合生态空间重要性指数整体呈现的是上升的趋势。

2.3.2 生态空间重要性变化模式分析

由图7可以看出, 常年非关键型和常年一般型生态空间主要分布在岭东的莫旗和阿荣旗, 以及岭西的海拉尔区、陈巴尔虎旗、新巴尔虎左旗, 这些区域是呼伦贝尔市农业和牧业最为集中的区域, 人类活动多干扰强度大, 生态空间重要性程度常年偏低。常年过渡型生态空间主要分布在新巴尔虎左旗和新巴尔虎右旗, 这些区域处于呼伦湖的周边, 是呼伦贝尔草原内生态价值较高的区域。常年重要型生态空间主要分布在研究区中部和西部, 中部地区是大兴安岭森林地带, 植被覆盖度高, 生物资源丰富, 具有较高的生态服务功能; 而东部地区是呼伦贝尔干旱草原地带, 气候干燥且风速大, 是当地土地沙化较为严重的区域。核心型生态空间主要分布在研究区呼伦湖、海拉尔河、额尔古纳河、克鲁伦河、伊敏河、辉河等流域范围内, 这些区域内多为河流湖泊和湿地等用地类型, 水资源丰富, 生态价值高。此外, 生态空间重要性波动上升区主要分布在大兴安岭森林区以及岭西的呼伦贝尔草原区, 主要是因为大兴安岭森林区生物多样性功能的提升以及水土流失敏感性的加剧, 以及呼伦贝尔草原区生物多样性功能的提升; 生态空间重要性波动下降区主要分布在岭西的呼伦贝尔草原区以及岭东的松嫩平原耕地区, 主要是因为呼伦贝尔草原区土地沙化敏感性的提升, 以及松嫩平原耕地区水源涵养和生物多样性保护功能的降低。

根据表5的统计结果, 常年重要型生态空间占常年不变分区面积的比例为54.97%, 是分区中面积最大的区域; 其次是常年过渡型生态空间, 比例为26.38%; 而核心型、一般型和非关键型较少, 分别为6.12%、8.62%和3.91%。相比于生态空间重要性常年不变区, 生态空间重要性波动变化区的面积更大, 占研究区总面积的60.66%, 表明研究区生态空间整体变化较为活跃, 并且生态空间重要性波动上升区的面积是波动下降区的两倍

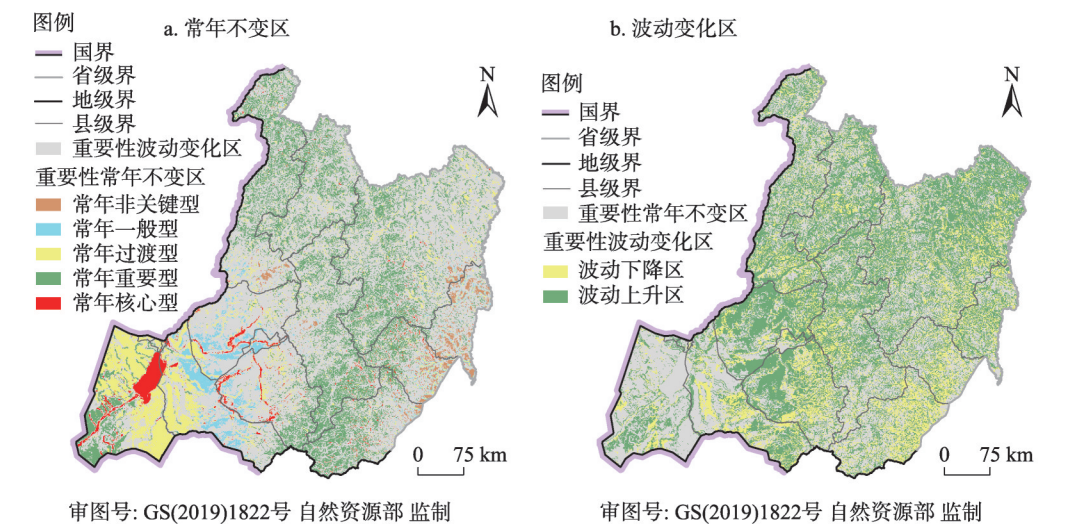


图7 生态空间重要性变化模式分区

Fig. 7 Regionalization of ecological spatial importance change model

表5 生态空间重要性变化模式分区面积

Table 5 Regionalization area of ecological spatial importance change model

分区类别		面积/km ²	面积比例/%
生态空间重要性常年不变区	常年非关键型生态空间	3845	3.91
	常年一般型生态空间	8469	8.62
	常年过渡型生态空间	25925	26.38
	常年重要型生态空间	54025	54.97
	常年核心型生态空间	6014	6.12
	总计	98278	39.34
生态空间重要性波动变化区	生态空间重要性波动上升区	105473	69.59
	生态空间重要性波动下降区	46096	30.41
	总计	151569	60.66

多，这也反映出研究期间生态空间综合重要性指数有所提升。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于水源涵养、生物多样性保护、水土保持、防风固沙四个评价因子，分析单一生态过程的生态空间重要性指数。在此基础上构建综合生态空间重要性指数，并以此来划分研究区不同重要水平下的生态空间范围，从而实现生态空间定量识别。同时在此研究成果之上进行生态空间动态演变分析，找寻研究区生态空间的时空分异规律。相关研究结论如下：

（1）研究区生态空间重要性指数整体偏高。研究期间核心型和重要型生态空间占总面积的比例始终处于50%水平之上。并且研究期间核心型、重要型和非关键型生态空间整体呈现增加的趋势；而过渡型和一般型生态空间则呈现减少的趋势。

(2) 研究区生态空间的综合活跃程度经历了一个逐渐变大的过程。其中2015—2018年间的综合动态度最高,为7.85%,这在一定程度上表明该时期生态空间的综合活跃程度尤为强烈。此外,2005—2015年间来看,除了核心型生态空间外,其他四类生态空间变化趋势相同且逐渐加大;2010—2018年间,除了核心型生态空间外,其他四类生态空间的变化均存在下降的趋势。

(3) 研究期间核心型、重要型和非关键型生态空间保留比例较高稳定性较好;过渡型和一般型生态空间保留比例较低稳定性较差。并且由于研究期间综合生态空间重要性指数整体呈现上升趋势,所以研究区各类生态空间都主要向着生态空间重要性指数较高的生态空间类型进行转换。

(4) 生态空间重要性变化具有明显的空间异质性。常年核心型和重要型生态空间主要分布在大兴安岭林区和呼伦湖等核心水体区,常年过渡型、常年一般型和常年非关键型生态空间主要分布在研究区西部的牧区以及东部的农业种植区,这说明生态空间重要性和人类活动以及农牧业生产有密切关系。并且研究期间西部草原区的生物多样性保护功能增加以及土地沙化敏感性降低,说明生态环境治理取得了积极成果。

3.2 讨论

当前,在评价多种生态过程相互叠加的综合重要性时,大多数学者都采取较为传统的析取算法来进行计算,认为其综合水平取决于叠置在其上各类生态过程重要性指数的最高值。但如果该空间图斑在几类生态过程中的重要性指数都无法达到最高,而多种单一生态过程重要性指数的不断累积又能促使其综合重要性指数增大时,析取算法则在某种程度上忽视了中国其他重要性指数相对较低的生态过程的累积效应。相比于析取算法,本文采取的累积修正求和的计算方法能够更加全面地体现出同一空间图斑上聚集的多种生态服务,避免忽视其他生态重要性指数相对较低生态过程的累积效应,可以较好地表现出各类生态过程的重要性指数在空间上和时间上的演变特征。

本文识别的生态空间和生态红线内的空间既有联系又有区别。本文基于自然环境角度对研究区全域进行生态空间重要性评价,从而将全域划分为不同重要程度的生态空间。而生态红线内的生态空间应该是高质量的生态空间,是生态功能较高的集中区域,对应本文中生态空间重要性程度较高的类型,即核心型和重要型生态空间的集合。同时,可以看出核心型和重要型生态空间作为研究区最低生态安全水平保障下的区域,主要集中在研究区中部的大兴安岭林区、西部的呼伦贝尔草原区以及呼伦湖、额尔古纳河等核心水体区。中部的大兴安岭林区是重要的天然林保护区和生物多样性功能区,对于嫩江、额尔古纳河流域发挥着重要的水源涵养生态功能;西部的呼伦贝尔草原则是土地沙化较为敏感的区域。这些是呼伦贝尔市生态环境保护的底线区域,是维护生态安全的核心区域,应该被划入到生态红线的范围内。因此,这些区域内的土地利用应以提高生态系统服务质量和生态环境保护为核心,严格禁止任何形式的城市建设行为和农业生产活动对该地区自然生态环境产生干扰。

呼伦贝尔地区作为中国北方的重要生态屏障,是中国北方地区的水源涵养地和生物多样性保护的重要基地,对中国北方地区的生态安全和水资源供给有着不可替代的作用。本文以呼伦贝尔地区的生态空间为研究对象,基于遥感数据和各类统计数据等多源数据融合的方法,提取该区不同年份的生态空间信息,完成生态空间定量识别;并基于识别成果来探索生态空间的时空变化格局,总结生态空间的发生规律、演化过程。探究

了如何将基于属性评价法的生态空间识别成果应用到演变特征分析等后续研究中,不仅拓宽了生态空间研究的内容,可以为下一步分析自然和社会经济等驱动因子提供研究基础,以及为未来时期定量模拟生态空间提供验证,还可以为相关部门编制生态空间规划及制定相关政策提供参考。

参考文献(References):

- [1] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350. [FAN J. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350.]
- [2] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究. 经济地理, 2014, 34(5): 1-8. [LONG H L, LIU Y Q, LI T T, et al. Spatial interlinking of land use planning and environmental protection planning from the perspective of ecological civilization construction. *Economic Geography*, 2014, 34(5): 1-8.]
- [3] LIU Y H, LI J T, YANG Y Y. Strategic adjustment of land use policy under the economic transformation. *Land Use Policy*, 2018, 74: 5-14.
- [4] FANG C L, YANG J Y, FANG J W, et al. Optimization transmission theory and technical pathways that describe multi-scale urban agglomeration spaces. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(4): 543-554.
- [5] 陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制: 以南京市为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2270-2278. [CHEN S, LIU Y X, PENG L H. Dynamics of urban ecological space evolution and policy responses: A case study of Nanjing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2270-2278.]
- [6] 关小克, 张凤荣, 王秀丽, 等. 北京市生态用地空间演变与布局优化研究. 地域研究与开发, 2013, 32(3): 119-124. [GUAN X K, ZHANG F R, WNAG X L, et al. Spatial evolution of urban ecological land and its distribution optimization in Beijing. *Areal Research and Development*, 2013, 32(3): 119-124.]
- [7] 李晓丽, 曾光明, 石林, 等. 长沙市城市生态用地的定量分析及优化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 415-421. [LI X L, ZENG G M, SHI L, et al. Urban ecological land in Changsha: Its quantitative analysis and optimization. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 415-421.]
- [8] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 等. 中国生态用地研究: 内涵、分类与时空格局. 生态学报, 2015, 35(14): 4931-4943. [YU F, LI X B, ZHANG L J, et al. Study of ecological land in China: Conception, classification, and spatial-temporal pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4931-4943.]
- [9] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究. 生态环境学报, 2015, 24(1): 1-7. [LONG H L, LIU Y Q, LI T T, et al. A primary study on ecological land use classification. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 1-7.]
- [10] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析. 城市发展研究, 2020, 27(4): 43-48. [JIANG M Q, LIU Y. Discussion on the concept definition and spatial boundary classification of "Production-Living-Ecological" space. *Urban Development Studies*, 2020, 27(4): 43-48.]
- [11] 俞孔坚, 乔青, 李迪华, 等. 基于景观安全格局分析的生态用地研究: 以北京市东三乡为例. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1932-1939. [YU K J, QIAO Q, LI D H, et al. Ecological land use in three towns of Eastern Beijing: A case study based on landscape security pattern analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1932-1939.]
- [12] 邓红兵, 陈春娣, 刘昕, 等. 区域生态用地的概念及分类. 生态学报, 2009, 29(3): 1519-1524. [DENG H B, CHEN C D, LIU X, et al. Conception and function classification of regional ecological land. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1519-1524.]
- [13] 张鹏, 李世峰, 刘瑶瑶. 基于生态适宜性分析的平原煤矿县生态空间优化. 农业工程学报, 2019, 35(19): 274-282. [ZHANG P, LI S F, LIU Y Y. Ecological space optimization of plain coal mine county based on ecological suitability analysis. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(19): 274-282.]
- [14] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076. [HUANG X Y, ZHAO X M, GUO X, et al. The natural ecological spatial management zoning based on ecosystem service function and ecological sensitivity. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1065-1076.]
- [15] 陈涛, 叶有华, 孙芳芳, 等. 基于 SPOT 数据的深圳市生态系统服务功能重要性评价. 生态经济, 2018, 34(2): 151-157. [CHEN T, YE Y H, SUN F F, et al. Assessment on the importance of ecosystem service function in Shenzhen based on SPOT data. *Ecological Economy*, 2018, 34(2): 151-157.]
- [16] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例. 自

- 然资源学报, 2020, 35(9): 2163-2176. [JIA J H, CHEN J Y, LONG X J, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: A case study in the mainstream of the Wujiang River. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176.]
- [17] 文博, 朱高立, 夏敏, 等. 基于景观安全格局理论的宜兴市生态用地分类保护. *生态学报*, 2017, 37(11): 3881-3891. [WEN B, ZHU G L, XIA M, et al. Ecological land classification protection based on the landscape security pattern in Yixing. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3881-3891.]
- [18] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1190-1200. [DU T F, QI W, ZHU X C, et al. Precise identification and control method of natural resources space based on ecological security pattern in mountainous hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1190-1200.]
- [19] 谢花林, 李秀彬. 基于GIS的区域关键性生态用地空间结构识别方法探讨. *资源科学*, 2011, 33(1): 112-119. [XIE H L, LI X B. A method for identifying spatial structure of regional critical ecological land based on GIS. *Resources Science*, 2011, 33(1): 112-119.]
- [20] 肖长江, 欧名豪, 李鑫. 基于生态-经济比较优势视角的建设用地空间优化配置研究: 以扬州市为例. *生态学报*, 2015, 35(3): 696-708. [XIAO C J, OU M H, LI X. Research on spatial optimum allocation of construction land in an eco-economic comparative advantage perspective: A case study of Yangzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 696-708.]
- [21] 程迎轩, 王红梅, 刘光盛, 等. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 248-257. [CHENG Y X, WANG H M, LIU G S, et al. Spatial layout optimization for ecological land based on minimum cumulative resistance model. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(16): 248-257.]
- [22] COSTANZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [23] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 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. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [24] OUYANG Z Y, SONG C S, ZHENG H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. *PNAS*, 2020, 117(25): 14593-14601.
- [25] 朱晓萌. 基于CLUE-S模型的哈尔滨市生态用地格局时空演变与情景模拟研究. 长春: 东北师范大学, 2019. [ZHU X M. The spatiotemporal change and scenario simulation of ecological land pattern in Harbin based on CLUE-S model. Changchun: Northeast Normal University, 2019.]
- [26] 路中, 雷国平, 王居午, 等. 30年来东北典型黑土区水土流失敏感性时空分异特征研究. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 186-195. [LU Z, LEI G P, WANG J W, et al. Spatial-temporal variation characteristics of soil and water loss sensitivity in typical black soil regions in Northeast China in the past 30 years. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 186-195.]
- [27] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 365-376. [SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 365-376.]
- [28] 张寒冰, 高阳, 崔艳智. 基于RWEQ模型的典型沙区风蚀治理成效研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(2): 342-350. [ZHANG H B, GAO Y, CUI Y Z. Evaluation the effects of wind erosion control projects in typical sandy area based on RWEQ model. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 342-350.]
- [29] 王旭洋, 郭中领, 常春平, 等. 中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 12-22. [WANG X Y, GUO Z L, CHANG C P, et al. Spatiotemporal distribution of soil wind erosion modulus in the agro-pastoral ecotone of North China. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 12-22.]
- [30] 刘芳, 张红旗. 塔里木盆地生态用地分类及其时空变化研究. *资源科学*, 2016, 38(5): 825-836. [LIU F, ZHANG H Q. Ecological land use mapping and spatio-temporal dynamics in the Tarim Basin. *Resources Science*, 2016, 38(5): 825-836.]
- [31] 张晓. 鲁山县生态空间的划定与时空演变. 开封: 河南大学, 2019. [ZHANG X. Delimitation and evolution of time and space of ecological space in Lushan. Kaifeng: Henan University, 2019.]
- [32] 武爱彬, 赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 283-290. [WU A B, ZHAO Y X. Analysis of ecological land pattern evolution and ecosystem service value in Bashang Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(2): 283-290.]
- [33] 李振亚, 魏伟, 周亮, 等. 基于空间距离指数的中国西北干旱内陆河流域生态敏感性时空演变特征: 以石羊河流域为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7463-7475. [LI Z Y, WEI W, ZHOU L, et al. Temporal and spatial evolution of ecologi-

cal sensitivity in arid inland river basins of Northwest China based on spatial distance index: A case study of Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7463-7475.]

Quantitative identification and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of ecological space: A case study of Hulun Buir city

ZHAO Hai-le^{1,2}, XU Yan^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2}, ZHANG Guo-liang^{1,2}, CHEN Xin³

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Land Qualify, Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China; 3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As an important part of national land space, ecological space is the basis of human production and life. Taking Hulun Buir city of Inner Mongolia Autonomous Region as an example, this paper systematically constructs an evaluation index system of comprehensive ecological space importance, and then carries out the quantitative identification of ecological space. On this basis, the dynamic evolution characteristics of ecological space are analyzed to find the spatiotemporal differentiation law of ecological space in the study area. The research found that: (1) The overall importance index of ecological space is high. During the study period, the proportion of core type and importance type of ecological space in the total area maintained at above 50%, and showed a gradual upward trend. The core type, importance type and non-critical type of ecological space showed an increasing trend, while transitional type and general type showed a decreasing trend. (2) The comprehensive activity degree of ecological space showed a gradual increase, with the highest value in 2015-2018, accounting for 7.85%. (3) The stability of core type, importance type and non-critical type of ecological spaces was much better during the study period, compared with that of transitional type and general type. In addition, as the overall importance index of ecological space showed an upward trend, and all types of ecological space were mainly converted to the type of ecological space with higher importance index. (4) The change of ecological importance has obvious spatial heterogeneity. During the study period, the ecological space with continuous higher level of importance is mainly distributed in forest region of Da Hinggan Mountains and the core water bodies such as Hulun Lake, while the ecological space with continuous lower level of importance is mainly distributed in pastoral areas in the west and farming areas in the east. On the whole, the ecological environment of Hulun Buir grassland was improved obviously during the study period.

Keywords: ecological space; quantitative identification; spatiotemporal evolution; Hulun Buir city