

DOI: 10.5846/stxb201806301440

李佳鸣,冯长春.基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究——以内蒙古自治区为例.生态学报,2019,39(13): - .

Li J M, Feng C C. Ecosystem service values and ecological improvement based on land use change: a case study of the Inner Mongolia Autonomous Region. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

# 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究

——以内蒙古自治区为例

李佳鸣<sup>1,2</sup>, 冯长春<sup>1,2,\*</sup>

1 北京大学城市与环境学院,北京 100871

2 国土资源部国土规划与开发重点实验室,北京 100871

**摘要:**以内蒙古自治区为例,基于土地利用与生态系统服务价值(ESV)的关系,提出将生态改善效果纳入生态服务功能综合评价的分级方法,并分析生态服务功能的空间分布格局,揭示生态改善与生态系统服务价值的对应关系。结果表明:(1)2015年研究区ESV为1.87亿元,区域整体生态环境质量水平提升;(2)研究区的生态改善具有空间分异特征,高ESV改善区仅集中于大兴安岭等高生态价值区,其余地区生态改善不明显,甚至呈恶化趋势,造成地区间差距不断扩大;(3)生态系统服务的提供程度与生态改善效果具有高关联性,依据各功能和生态改善水平可将研究区划分为北部大兴安岭核心区、中部高覆盖草原区两类高值区,以及西部沙地区、南部沿黄河地区和东部科尔沁地区三类低值区。生态管控措施应综合生态服务功能与生态改善效果的匹配程度,以达到减小区域ESV差距、促进生态环境协调发展的目的。

**关键词:**土地利用;生态系统服务价值;生态改善;生态管控;内蒙古自治区

## Ecosystem service values and ecological improvement based on land use change: a case study of the Inner Mongolia Autonomous Region

LI Jiaming<sup>1,2</sup>, FENG Changchun<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Key Laboratory of Territorial Planning and Developing, Ministry of Land and Resources, Beijing 100871, China

**Abstract:** Using the Inner Mongolia Autonomous Region as an example, this study proposes a classification method that integrates the effects of ecological improvement into the evaluation of ecological service functions, based on the relationship between land use and ecosystem services value (ESV), and analyzes the spatial distribution patterns of ecosystem service functions. The results showed that (1) the ESV of the study area was 187 million yuan in 2015, and overall environmental quality improved; (2) the ESV improvement in the study area was spatially differentiated. The areas of greatest improvement were concentrated in areas of high ecological value. Ecological improvement was not obvious in other areas, resulting in a widening gap in environmental quality in the region; (3) a high degree of correlation was seen between ecosystem services and the rate of ESV improvement. The study area could be categorized into two high value zones, namely Daxinganling and a high-cover grassland area, as well as three low value zones, namely the Sandland, Yellow River, and Horqin areas. Ecological management should be based on ecological service function and its relationship with ecological improvement to reduce the gap between regional ecological values and, thus, promote the coordinated development of Inner

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费(201511001-01)

收稿日期:2018-06-30; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fcc@urban.pku.edu.cn

Mongolia's ecological environment.

**Key Words:** land use; ecosystem service value; ecological improvement; ecological control; Inner Mongolia Autonomous Region

生态系统服务指生态系统与生态过程形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务等<sup>[1-3]</sup>。土地作为人类生产、生活的载体,一方面土地利用模式直接影响生态系统提供的服务种类与供给程度;另一方面,土地覆盖变化也会驱动生态系统服务功能的改变<sup>[4-6]</sup>。有关土地利用与生态系统服务关系的研究主要聚焦于两方面:其一为利用土地覆盖类型量化生态系统服务价值(ESV, ecosystem services value),欧阳志云<sup>[7]</sup>、谢高地<sup>[8-10]</sup>以 Costanza<sup>[3]</sup>等人研究成果为基础,构建了生态系统服务评估单价体系,之后学者引入月度净初级生产力、物价修正系数、生态干扰度等指标,以土地利用为基础的生态系统服务价值量化框架不断被完善<sup>[11-15]</sup>;其二为评估土地利用变化与生态系统服务的动态响应,如土地利用/土地覆盖变化与气候调节<sup>[16-17]</sup>、固碳释氧<sup>[18-19]</sup>、水土保持<sup>[20-23]</sup>,以及娱乐和美学价值<sup>[24]</sup>等生态服务功能存在高度相关性,依据土地退化面积、土地利用空间格局的改变估算生态系统服务变化量,为土地管理与生态空间管控提供指导<sup>[6,25-30]</sup>。

探究土地利用变化对生态系统服务的影响可以作为连接生态过程和城市化等人类活动进程的手段<sup>[27-28,30-32]</sup>,生态恢复效果对区域生态系统服务空间格局的评价与预判起重要反馈作用。当前有关生态系统服务功能评价的研究往往只利用截面数据,生态系统服务价值的改善仅作为土地管理政策的提出依据独立于评价方法,形成一些生态管控措施与评价结果不匹配的现象。基于此,本研究以内蒙古自治区为研究区,提出一种将生态系统服务价值改善效果纳入生态服务功能评价框架的分级方法,使评价结果可以更为有效地引导和协调土地资源合理配置与生态空间管控。具体而言,本研究的主要目标包括:(1)估算研究区土地利用变化对静态生态系统服务价值的影响,对2005—2015年内蒙古各类型生态系统服务的动态改善效果以及各盟市生态系统服务价值的空间差异进行定量分析;(2)引入生态系统服务价值相对变化率重构生态系统服务价值空间格局,依据分级结果识别生态改善效果与生态系统服务高、低值区对应关系,提出区域生态改善建议。

## 1 研究区概况

本文以内蒙古自治区为研究对象,从省域与市域尺度评价生态脆弱区的生态系统服务价值。内蒙古自治区地域辽阔,位于 $37^{\circ}24'—53^{\circ}23'N$ , $97^{\circ}12'—126^{\circ}04'E$ 之间,呈狭长状横贯我国东北、华北和西北地区,土地面积约118.3万 $km^2$ ;地势由南向北、西向东倾斜,大部分地区的海拔位于1000—1500 m(图1);气候以温带大陆性季风气候为主,从东至西依次涵盖温带湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区和极端干旱区;年降水量约30—500 mm,由东北向西南递减<sup>[24]</sup>;地貌类型呈现出高原、山地、平原、高原带状分布的格局;土地利用类型存在地域分异,东部地区以林地与耕地为主,中部与南部地区分布着草地,西部则以裸地为主。

作为我国北方典型的农牧交错带区域,内蒙古土地利用政策从大面积开垦草地和林地以满足经济发展需求逐步过渡为现阶段“生态优先”的发展路径<sup>[33]</sup>,土地利用与生态系统格局均发生了较大改变,通过退耕休牧、还林还草、风沙源治理、生态移民、封育轮牧等生态管

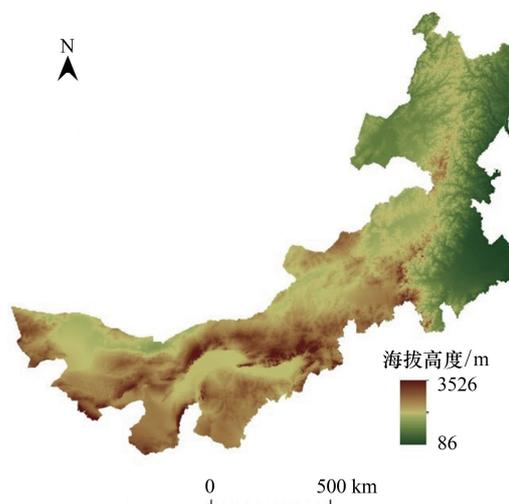


图1 内蒙古自治区高程图

Fig.1 Evaluation of Inner Mongolia Autonomous Region

控措施,内蒙古草地退化与土壤侵蚀有了一定程度的改善<sup>[24,33-35]</sup>。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究使用的 2005 年、2010 年与 2015 年内蒙古土地利用数据来自中国地理科学与资源研究所,地类分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型,空间分辨率为 30m×30m,精度达到 90% 以上;高程信息来自美国航天飞机雷达地形测绘数据(SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org>);用于生态系统服务价值核算的农作物播种面积、产量数据和 CPI 指数来自《内蒙古统计年鉴(2016)》;内蒙古农作物净利润指标来自《全国农产品成本收益资料汇编》。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 静态生态系统服务价值

采用当量因子法评估内蒙古及各盟市的 ESV,步骤为标准当量价值量的确定、不同土地类型下单位面积价值表的构建和静态价值计算。

(1) 标准当量的确定与修正:1 单位标准当量的价值量指 1hm<sup>2</sup> 平均产量的耕地每年粮食产量的货币价值<sup>[8-10]</sup>,一般将单位面积耕地稻谷、小麦和玉米的净利润作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量<sup>[10]</sup>。以往研究对 ESV 的量化仅使用静态指标,考虑到年际影响与融入 ESV 改善时存在的价格变动,本研究使用 CPI 指数对多年净利润平均值确定的标准当量进行修正,方法如下:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{ri} \times F_{ri} + S_{wi} \times F_{wi} + S_{ci} \times F_{ci}) \cdot \alpha_i \quad (1)$$

式中, $D$  为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/hm<sup>2</sup>); $S_{ri}$ 、 $S_{wi}$  和  $S_{ci}$  为第  $i$  年稻谷、小麦和玉米的播种面积占三种作物总面积百分比; $F_{ri}$ 、 $F_{wi}$  和  $F_{ci}$  为第  $i$  年全国稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润(元/hm<sup>2</sup>); $\alpha_i$  为第  $i$  年相较于基年的 CPI 修正系数。经计算,内蒙古自治区 2005—2015 年平均价值量为 2725.19 元/hm<sup>2</sup>,物价修正后  $D$  值为 1587.01 元/hm<sup>2</sup>。

(2) 不同土地利用类型的静态 ESV:以研究区 2005 年、2010 年和 2015 年 3 期土地利用数据为基础计算 ESV 变化量。将内蒙古生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务共 4 类 11 子类。根据研究区自然环境,结合谢高地<sup>[10]</sup>制定的中国陆地生态系统当量表对生态系统服务价值系数进行修正。其中,耕地使用农田生态系统当量因子;研究区有林地、疏林地和其他林地处于欧亚针叶林植物区,同时受欧亚草原植物区和东亚阔叶林植物区的影响<sup>[36]</sup>,取针叶、针阔混交与阔叶生态系统当量因子的平均值;草地方面,高覆盖度草地分布于大兴安岭东西两麓,以林缘草甸与草甸草原为主,选择草甸草地当量因子,中、低覆盖度草地选择草原草地当量因子<sup>[37-38]</sup>;土地利用为河渠、湖泊和水库坑塘的选择水域当量因子,滩地与沼泽地选择湿地当量因子;沙地、戈壁、盐碱地和其他用地的选择荒漠当量因子,裸土地和裸岩石质地选择裸地当量因子;城镇用地、农村居民点与其他建设用地的当量因子设为 0。上述土地利用类型下的生态系统服务当量因子与  $D$  值相乘得到内蒙古自治区单位面积生态系统服务价值系数表(表 1)。计算研究区的生态系统服务价值如下式:

$$ESV = \sum_{k=1}^m (A_k \times VC_k) \quad (2)$$

$$ESV^{(f)} = \sum_{k=1}^m (A_k \times VC_{fk})$$

式中, $A_k$  为土地利用类型为  $k$  的面积; $VC_k$  为单位面积生态系统服务价值系数; $ESV^{(f)}$  为第  $f$  项生态系统服务功能价值; $VC_{fk}$  为第  $f$  项生态系统服务功能单位面积生态系统服务价值系数。

#### 2.2.2 生态系统服务价值相对变化率

本研究提出双维度下的 ESV 相对变化率计算方法:其一为区域维度上的相对变化率  $R_i$ ;其二为单项生态

服务功能维度上的相对变化率  $R^{(f)}$ , 两指标用于分析空间和功能尺度上 ESV 的增减趋势, 以反映生态改善效果, 公式如下:

表 1 研究区各土地利用类型单位面积生态系统服务价值系数/(元  $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$ )

Table 1 Ecosystem service value coefficients per unit area of different land-use type in study area

土地利用类型 Land use type		供给服务 Supply service			调节服务 Regulating service				支持服务 Support service			文化服务 Cultural service
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
耕地 Farmland	水田	1348.96	634.80	31.74	1063.30	571.32	158.70	428.49	1634.62	190.44	206.31	95.22
	旱地	2158.33	142.83	-4173.83	1761.58	904.60	269.79	4316.66	15.87	301.53	333.27	142.83
林地 Forest	有林地、疏林地、其他林地	433.78	999.82	518.42	3290.40	9839.46	2861.91	6131.14	4004.55	306.82	3644.83	1597.59
	灌木林	301.53	682.41	349.14	2237.68	6713.05	2031.37	5316.48	2729.66	206.31	2491.60	1095.04
草地 Grassland	高覆盖度草地	349.14	523.71	285.66	1809.19	4792.77	1587.01	3507.29	2205.94	174.57	2015.50	888.72
	中、低覆盖度草地	158.70	222.18	126.96	809.37	2126.59	698.28	1555.27	983.95	79.35	888.72	396.75
水域 Watershed	河渠、湖泊、水库坑塘	1269.61	365.01	13156.30	1222.00	3634.25	8807.90	162255.79	1475.92	111.09	4046.87	2999.45
	滩地	809.37	793.50	4110.35	3015.32	5713.23	5713.23	38453.23	3665.99	285.66	12489.76	7506.55
未利用地 Unused land	沙地、戈壁、盐碱地、其他用地	15.87	47.61	31.74	174.57	158.70	491.97	333.27	206.31	15.87	190.44	79.35
	沼泽地	809.37	793.50	4110.35	3015.32	5713.23	5713.23	38453.23	3665.99	285.66	12489.76	2999.45
	裸土地、裸岩石质地	0.00	0.00	0.00	31.74	0.00	158.70	47.61	31.74	0.00	31.74	15.87

$$R_i = \frac{(L_{t+j} - L_t) / L_t}{(C_{t+j} - C_t) / C_t}$$

$$R^{(f)} = \frac{(\text{ESV}_{t+j}^{(f)} - \text{ESV}_t^{(f)}) / \text{ESV}_t^{(f)}}{(\text{ESV}_{t+j} - \text{ESV}_t) / \text{ESV}_t} \quad (3)$$

式中,  $R_i$  为区域  $i$  的 ESV 相对变化率,  $L_{t+j}$ 、 $L_t$  分别为区域  $i$  在  $t+j$  与  $t$  期的局部 ESV,  $C_{t+j}$ 、 $C_t$  分别为  $t+j$  与  $t$  期的总体 ESV。  $R^{(f)}$  为第  $f$  项 ESV 相对变化率, 其他指标解释同式(2)。  $|R| > 1$  表示区域  $i$  或第  $f$  项生态服务功能的 ESV 变动幅度大于研究区整体变化幅度;  $|R| \leq 1$  表示区域  $i$  或第  $f$  项生态服务功能的 ESV 变动幅度小于等于研究区。  $R$  值的正负表示区域  $i$  或第  $f$  项 ESV 变化方向与研究区变化方向的一致性。

### 2.2.3 生态服务功能分级评价

研究区生态系统服务价值格局的研究单元应反映该单元多类生态系统的 ESV, 采用 ArcGIS 块统计对  $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$  内的各单项 ESV 进行求和, 基于  $R^{(f)}$  对研究区各单项 ESV 的修正, 得到各研究单元 ESV 改善情况, 公式如下:

$$\text{ESV}^* = \sum_{i=1}^9 \sum_{f=1}^{11} \text{ESV}_i^f \cdot R^{(f)} \quad (4)$$

式中,  $\text{ESV}_i^f$  为第  $i$  个  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  土地栅格内土地利用类型对应的生态系统服务价值;  $\text{ESV}^*$  为此  $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$  研究单元在考虑相对变化率后的生态系统服务价值。

经  $R^{(f)}$  修正后, 高  $\text{ESV}^*$  值表明该地区 ESV 改善效率较高, 当前生态管控措施下生态恢复效果显著; 低  $\text{ESV}^*$  值表明该地区生态系统服务的提升能力较差, ESV 改善效果甚微, 需调整地区的生态管控措施。因此, 将  $\text{ESV}^*$  指标纳入生态服务功能评价框架可实现对部分高 ESV 且生态改善趋势明显, 以及低 ESV 且生态不断恶化地区的关注, 有利于决策者协调各地区的生态管控强度, 实现对同一 ESV 地区内等级的细分。具体方法为利用分位数断点对供给、调节、支持、文化与 ESV 改善 5 项数据分级赋值, 形成低、较低、一般、较高、高五个等级。

$$\text{Score}_i = k_i^{(p)} \cdot k_i^{(r)} \cdot k_i^{(s)} \cdot k_i^{(c)} \cdot k_i^{(im)} \quad (5)$$

由上述五项分级结果, 利用式(5)进行综合评价。  $\text{Score}_i$  为  $i$  单元 ESV 等级值;  $k_i^{(p)}$ 、 $k_i^{(r)}$ 、 $k_i^{(s)}$ 、 $k_i^{(c)}$ 、 $k_i^{(im)}$

分别为供给、调节、支持、文化与生态恢复效果等级值。利用 ArcGIS 空间分析,将 Score<sub>i</sub>重分类为低与较低区间内的土地单元归类为低生态价值区,高与较高区间内的归类为高生态价值区,形成基于不同生态服务功能与生态恢复效果的综合分区。

### 3 实证结果

#### 3.1 生态系统服务价值时空变化

内蒙古 ESV 的绝对量方面,气候调节与生物多样性提供的生态价值较高,水资源供给与维持养分循环相对较小。2005—2015 年间,内蒙古生态系统服务价值实现增长,从 2005 年的 17069 亿元增长至 2015 年的 18667 亿元,ESV 变化率达 9.36%(表 2)。其中,2005—2010 年生态系统服务供给能力轻微减少,体现在净化环境功能、水文调节功能提供程度的下降;2010 年以来,除气候调节功能外,其余生态系统服务价值呈增加趋势,水资源供给、水文调节、生物多样性维护和美学景观功能改善明显,ESV 的增加率达到 15%以上。

表 2 2005—2015 年研究区生态系统服务价值变化  
Table 2 Changes of ESV from 2005 to 2015 in study area

生态系统服务 Ecosystem service	生态系统服务价值 ESV/亿元			生态系统服务价值变化率 Change rate of ESV/%		
	2005	2010	2015	2005—2010	2010—2015	2005—2015
总计 Total	17069.47	17045.97	18667.23	-0.14	9.51	9.36
供给服务 Supply service						
食物生产	478.32	479.05	499.11	0.15	4.19	4.35
原料生产	399.19	399.23	403.21	0.01	1.00	1.00
水资源供给	-49.74	-53.12	23.52	6.79	144.29	147.29
调节服务 Regulating service						
气体调节	1517.20	1517.90	1544.48	0.05	1.75	1.80
气候调节	3633.69	3633.66	3628.24	0.00	-0.15	-0.15
净化环境	1418.79	1417.67	1519.57	-0.08	7.19	7.10
水文调节	5309.08	5285.99	6215.39	-0.43	17.58	17.07
支持服务 Support service						
土壤保持	1606.24	1606.30	1625.58	0.00	1.20	1.20
维持养分循环	159.33	159.46	162.60	0.08	1.97	2.05
生物多样性	1759.87	1761.44	2032.57	0.09	15.39	15.50
文化服务 Cultural service						
美学景观	837.51	838.40	1012.96	0.11	20.82	20.95

通过土地利用转移矩阵揭示 ESV 变动的影响机制(表 3),结果表明:研究区的土地退化主要体现为草地面积的减少与其他用地面积的增加。草地与未利用地的相互转化、草地向林地与水田的转化面积均占总转移面积的 10%以上,4 项累计占比达 60.8%。其中,草地退化为荒漠与裸地的净面积达到 25239.93 km<sup>2</sup>,土地沙漠化成为制约研究区气候调节与土壤保持的主要因素。另一方面,研究区的生态恢复体现为水域、滩地、沼泽地面积的增加,与旱地比重的下降,这些土地利用变化使水资源的供给和养护能力大幅提升。城镇空间与生态空间的协调方面,除耕地与草地外,各类其他用地转换为城镇用地的占比均小于 1%,城镇用地的净转入面积也在所有用地类型中为次小项。结合区内生态政策可知,随着退耕还林、退草还林等生态过程对森林保有量与生物多样性的增加,林地与水域的生态恢复有序推进,研究区生态系统服务价值的提升源于生态空间的增加和用地结构的优化,城镇空间对生态空间的侵占得到较好控制,但草地退化仍是自治区当前的主要生态问题。

#### 3.2 生态系统服务价值改善效果分析

图 2 与图 3 分别显示内蒙古自治区 12 个盟市的  $R_i$  值,与各单项生态服务功能的  $R_i^{(j)}$  值。就空间差异性而言,2005—2015 年内蒙古自治区的 ESV 变化呈现空间分布不均衡的格局。呼伦贝尔市、兴安盟与赤峰市的 ESV 变化与研究区整体水平一致。其中,呼伦贝尔市 ESV 增长率远高于平均值。上述盟市位于大兴安岭一

带,生态空间以森林生态系统为主,森林景观的生态恢复效果显著,该地区的高生态服务价值带动了研究区整体生态服务功能的增强。另一方面,内蒙古其他盟市的ESV均呈现不同程度的下降,其中乌海市、阿拉善盟与锡林郭勒盟的 $R_i$ 小于-1,生态恶化程度大于平均值。阿拉善盟位于研究区最西部,干旱少雨,植被覆盖度低,土地沙漠化现象严重,导致草地与林地退化为裸地,区内生态系统服务的提供能力处于下降阶段;乌海市为高工业化水平的城镇聚集区,且沙丘、裸岩面积较大,土地利用体现为城镇用地对耕地、林地与草地的侵占;锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部,草场面积广大,受草地退化影响,ESV随草场面积,尤其是高覆盖度草地面积的减少而下降。

表3 研究区2005—2015年土地利用转移面积矩阵/ $\text{km}^2$

Table 3 Land use transfer area matrix from 2005 to 2015 in study area

土地利用类型 Land use type	2015年					
	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Watershed	建筑用地 Build-up land	未利用地 Unused land
2005年 耕地	—	4075.30 (2.49)	10102.68 (6.17)	785.84 (0.48)	1977.17 (1.21)	2677.70 (1.64)
林地	4670.12 (2.85)	—	10454.95 (6.38)	372.67 (0.23)	295.91 (0.18)	8057.23 (4.92)
草地	16594.28 (10.14)	28224.86 (17.24)	—	1348.99 (0.82)	3108.40 (1.90)	41607.59 (23.41)
水域	758.77 (0.46)	191.60 (0.12)	616.62 (0.38)	—	101.17 (0.82)	1677.83 (1.02)
建筑用地	1346.14 (0.73)	202.15 (0.12)	811.83 (0.50)	80.64 (0.05)	—	223.61 (0.14)
未利用地	3216.31 (1.96)	1562.49 (0.95)	16367.66 (10.00)	1194.07 (0.73)	1015.20 (0.62)	—
净转入面积	6966.93	10405.53	-52530.40	436.22	3833.48	30888.24

括号内为土地利用转移面积占总转移面积百分比(%)

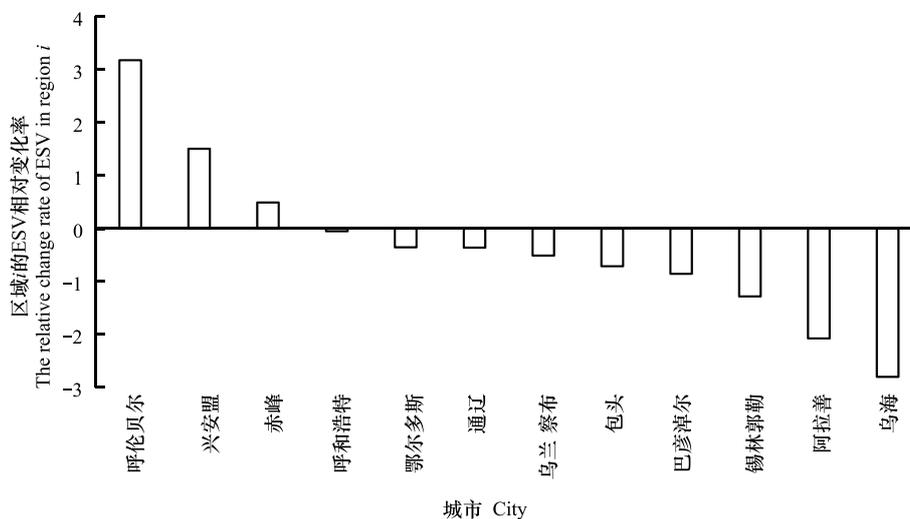


图2 2005—2015年研究区各盟市ESV相对变化率 $R_i$

Fig.2 The relative change rate of ESV in region  $i$  from 2005 to 2015 in study area

就功能差异性而言,除气候调节功能外,其他各生态服务功能的变化与总体生态服务功能变化趋势一致。究其原因,气候调节功能受草地退化影响小幅下降,同时土壤保持、原料生产与气体调节功能的 $R_i$ 小于0.2,滞后于研究区平均水平,进一步印证生态脆弱区土地退化与水土流失的严重性。研究区水源涵养类生态服务

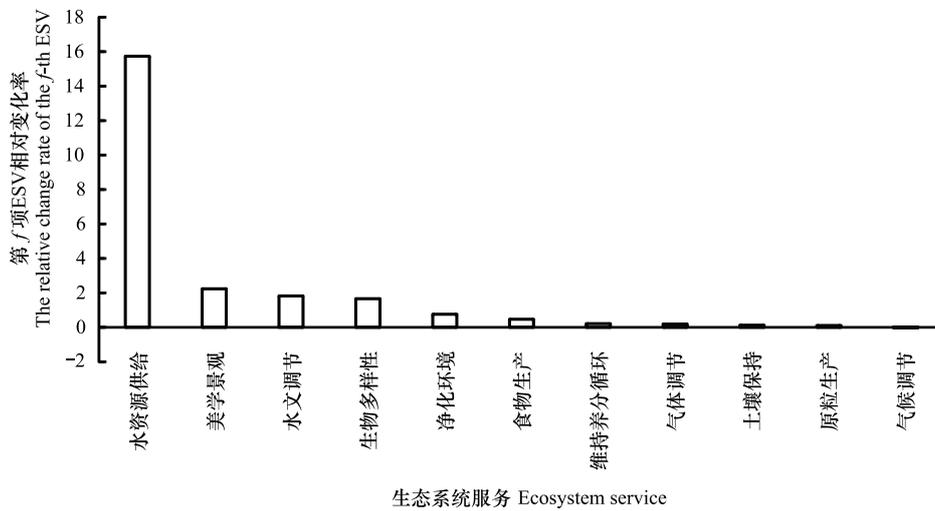


图 3 2005—2015 年研究区单项 ESV 相对变化率  $R^{(f)}$

Fig.3 The relative change rate of the  $f$ -th ESV from 2005 to 2015 in study area

功能如水资源供给、水文调节的 ESV 变化幅度较大,表明水域的恢复和水质的养护能力提升,是内蒙古整体生态系统服务价值改善的重要驱动力。

### 3.3 生态系统服务价值分级结果

2015 年内蒙古单位面积生态系统服务价值的变异系数为 0.69,具有极差大、离散程度强的特征。各单项生态服务功能与生态恢复效果大致遵从由北至南,评价等级由高至低的空间分布规律(图 4)。供给功能在研究区南部边缘形成主要的低价值区,该区域城镇空间密集,且位于鄂尔多斯高原与黄土高原过渡地带,旱地、沙地交错分布,水资源供给不足,土地生态系统向人类提供的物质基础与服务能力较低,为主要的低价值区;调节功能由东北至西南递减,主要源于东北部季风气候区植被覆盖度较高,降雨充沛,其净化环境、水文调节服务功能优于大陆性气候区;西部阿拉善盟地区以沙地、裸地为主,土壤保持能力较差,沿黄河地带受风水混

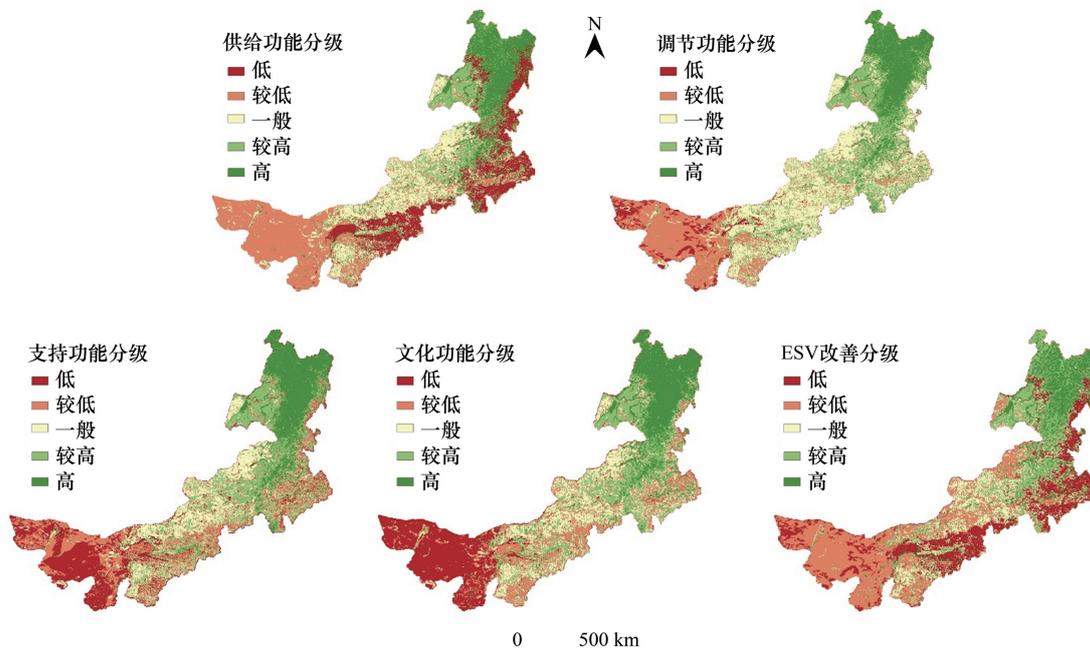


图 4 2015 年研究区生态系统服务功能评价结果

Fig.4 The ecosystem service function evaluation of study area in 2015

合侵蚀水土流失严重,导致该区为支持功能的低价值区;文化功能的高价值区集中在植被覆盖度高、自然景观分布广泛的森林区与锡林郭勒盟东部的高覆盖草场。

ESV 改善效果方面,研究区北部 ESV 绝对量大且改善幅度明显,蒙西及内蒙古南部边缘等生态服务功能提供能力较差的地区改善幅度不显著。不同生态服务功能与生态恢复的空间格局具有相似性,供给、调节、支持和文化服务功能分级与 ESV 改善分级的关联度较高,即高服务功能区的生态价值对应较强的 ESV 改善能力,生态价值不断巩固强化;而生态短板地区对应低 ESV 改善能力,区域生态恢复不足且不断恶化,呈现不同区域 ESV 差距加大的极化结果。

基于单项生态服务功能与 ESV 改善分级,形成内蒙古自治区生态系统服务价值综合评价结果(图 5)。根据空间分布特征,划分出北部大兴安岭核心区、中部高覆盖草原区 2 个高价值区;以及西部沙地区、南部沿黄河地区和东部科尔沁地区 3 个低价值区。高价值区约占研究区面积 26.3%,低价值区约占 36.2%,各地区的具体特征见表 4。

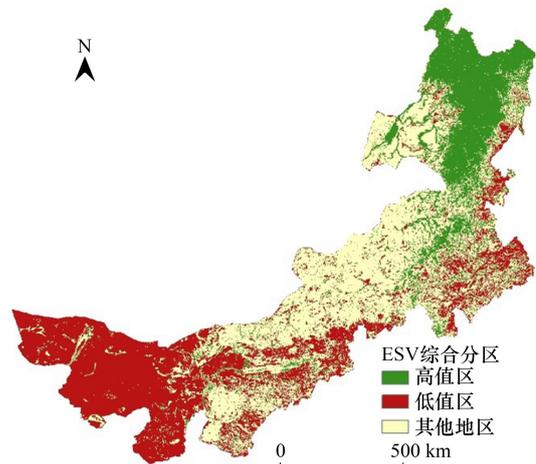


图 5 2015 年内蒙古自治区生态系统服务价值综合分区  
Fig. 5 The comprehensive evaluation on ESV of Inner Mongolia Autonomous Region in 2015

表 4 内蒙古自治区生态系统服务高价值区与低价值区的空间分布

Table 4 The spatial distribution of high value zone and low value zone in Inner Mongolia Autonomous Region

类型 Type	面积占比 Area proportion/%	特征 Characteristic	主要分布地区 Main distribution area	描述 Description
高价值区 High value zone	26.3	高供给、高调节、高支持、高文化服务价值,ESV 改善效果优于整体水平	北部大兴安岭核心区	位于呼伦贝尔市与兴安盟中部、呼伦湖水域地区。区内森林资源丰富,支流、湖泊零散分布,水源涵养较好,各项生态系统服务价值均较高,生态改善效果明显
			中部高覆盖草原区	位于锡林郭勒盟、赤峰市西北部边缘,地形由内蒙古高原向东北平原过渡,草原面积广大,为调节与支持功能的高价值集中区
低价值区 Low value zone	36.2	低供给、低调节、低支持、低文化服务价值,ESV 改善效果滞后于区域整体水平	西部沙地区	位于阿拉善盟巴丹吉林沙漠地区,土地利用以沙地、裸地为主。区内土壤保持、生物多样性功能提供能力较弱,支持功能的生态价值极低
			南部沿黄河地区	带状分布于巴彦淖尔南部、鄂尔多斯、乌海市与包头市,位于河套平原地区,城镇空间密集,土地利用中旱地、沙地与盐碱地占比较大,部分地区 ESV 相对变化率为负值,生态环境处于恶化阶段
			东部科尔沁地区	块状分布于赤峰市与通辽市南部,供给服务价值极低,水资源供给功能较弱。草地退化比例较高,生态恢复效率较低,ESV 的提升滞后于内蒙古整体水平

#### 4 结论与讨论

本研究结合内蒙古自治区实际生态环境,利用当量因子法评估了不同土地利用类型的静态生态系统服务价值;同时,提出将 ESV 改善效果纳入生态服务功能综合评价框架的分级方法。由 ESV 相对变化率可知,研究区 ESV 变化趋势具有极差大,高、低价值区显著分化的特征,生态服务功能空间分布不均衡。其中,水资源养

护类服务功能的增强速率远高于其他指标,是区域整体生态环境优化的驱动力。结果显示,虽然 2005—2015 年期间内蒙古 ESV 有所增加,水域、林地的恢复速率提高,城镇用地扩张得到有效控制,但北部与中部的森林与草地保育区,以及蒙西低生态价值区的生态改善效果具有明显差异,生态恢复在空间分布上呈现极化效应,地区间生态环境质量的差距不断扩大,生态保护的协调性面临较大挑战。因此,区域生态管控措施宜进一步加大沙地区、黄河流域与东部科尔沁的生态恢复力度,尤其调整、加强区域的草地恢复力度,改善低植被覆盖带来的土地沙漠化问题,缩小区域南北向生态价值的差距,保证区域生态功能与生态安全格局的平衡。

此外,本研究使用的生态系统服务价值评价方法仍存在缺点与改进空间,包括:(1)ESV 估计结果的准确性取决于当量因子的可靠性,而 11 类土地利用类型与生态系统的对应只是实际生态过程的简化;(2)ESV 分级评价中尚未考虑社会经济活动与人类资本对 ESV 的相互作用,这需要对区域居民支付意愿、社会文化与景观结构等进行更全面、深入的研究。然而,改进后的生态系统服务价值评价可以用一种简化、通用的方法体现不同生态服务功能与生态恢复效果空间格局的一致性,在反映当前 ESV 高低分布特征的同时,揭示那些低 ESV 地区是处于生态改善进程或是持续恶化阶段,对 ESV 相同的区域进行了细分,加强了生态服务功能评价与土地利用管理政策之间的衔接,可以为生态管控措施的调整提供决策信息。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Ehrlich P R, Ehrlich A H, Holdren J P. *Ecoscience: Population, Resources, Environment*. San Francisco: W. H. Freeman. 1977.
- [ 2 ] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [ 3 ] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, 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.
- [ 4 ] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [ 5 ] Fisher B, Turner R K. Ecosystem services: classification for valuation. *Biological Conservation*, 2008, 141(5): 1167-1169.
- [ 6 ] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [ 7 ] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 刘金勇, 孔繁花, 尹海伟, 闫伟姣, 孙常峰, 许峰. 济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1231-1236.
- [ 12 ] 王重玲, 朱志玲, 白琳波, 程淑杰, 路彩玲. 景观格局动态变化对生态服务价值的影响——以宁夏中部干旱带为例. *干旱区研究*, 2015, 32(2): 329-335.
- [ 13 ] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 429-440.
- [ 14 ] 王航, 秦奋, 朱筠, 张传才. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [ 15 ] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 高阳, 王宏亮, 李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207.
- [ 16 ] Zhao B, Kreuter U, Li B, Ma Z J, Chen J K, Nakagoshi N. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 139-148.
- [ 17 ] Jian P, Wang Y L, Wu J S, Yue J, Zhang Y, Li W F. Ecological effects associated with land-use change in China's southwest agricultural landscape. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2006, 13(4): 315-325.
- [ 18 ] 叶浩, 濮励杰. 苏州市土地利用变化对生态系统固碳能力影响研究. *中国土地科学*, 2010, 24(3): 60-64.
- [ 19 ] 成方妍, 刘世梁, 张月秋, 尹艺洁, 侯笑云. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响. *生态学报*, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [ 20 ] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [ 21 ] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. *生态学报*, 2014, 34(23): 7013-7025.
- [ 22 ] Nahuelhual L, Carmona A, Aguayo M, Echeverria C. Land use change and ecosystem services provision: a case study of recreation and ecotourism

- opportunities in southern Chile. *Landscape Ecology*, 2013, 29(2): 329-344.
- [23] Li T H, Li W K, Qian Z H. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1427-1435.
- [24] 江凌, 肖焱, 饶恩明, 王莉雁, 欧阳志云. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响. *生态学报*, 2016, 36(12): 3734-3747.
- [25] 彭建, 武文欢, 刘焱序, 胡熠娜. 基于 PSR 框架的内蒙古自治区土壤保持服务分区. *生态学报*, 2017, 37(11): 3849-3861.
- [26] Tolessa T, Senbeta F, Kidane M. The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 47-54.
- [27] 黄云凤, 崔胜辉, 石龙宇. 半城市化地区生态系统服务对土地利用/覆被变化的响应——以厦门市集美区为例. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 551-560.
- [28] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. *生态学报*, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [29] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 691-700.
- [30] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [31] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [32] 丁雨霖, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究——以重庆市涪陵区义和镇为例. *地理科学进展*, 2016, 35(7): 851-859.
- [33] 陈仙林. 对内蒙古生态治理及生态功能的思考. *北方经济*, 2002, (S1): 347-349.
- [34] 彭羽, 高英, 冯金朝, 王德智, 姚森, 刘洋, 薛达元. 半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例. *生态学报*, 2013, 33(6): 1822-1831.
- [35] 刘正恩, 葛剑平. 北方农牧交错带生态恢复与重建的原则及对策. *干旱区研究*, 2004, 21(3): 299-303.
- [36] 昭日格, 岳永杰, 姚云峰, 李钢铁. 内蒙古自治区森林碳储量及其动态变化. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(9): 80-84.
- [37] 郭灵辉, 吴绍洪, 赵东升, 冷国勇, 张清雨. 近 50a 内蒙古不同植被类型区生长季变化. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 532-538.
- [38] Tian H J, Cao C X, Chen W, Bao S N, Yang B, Myneni R B. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 276-289.