

# 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区 土地利用格局优化与评价

耿鑫<sup>1,2</sup>, 胡实<sup>1</sup>, 肖玉<sup>1</sup>, 王训明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为完善土地规划评估指标、挖掘东北农牧交错区生态建设潜力,在明晰2001—2018年东北农牧交错区生态系统服务价值(ESV)时空特征的基础上,分别以供给服务、调节服务和支撑服务三种生态功能为优先发展目标,结合CLUE-S模型提出了三种土地利用格局规划方案。结果显示:(1)2001—2018年研究区ESV总量增长9.69%,其中调节、支撑和供给服务功能年均占比分别为67.25%、21.88%和6.74%;(2)三种规划方案对区域ESV提升明显,其中支撑服务优先情景下ESV总量提升5.84%,高于供给服务(2.66%)和调节服务(5.19%)优先情景;(3)不同土地利用类型的环境适应性不同,研究区西北部、西南部和东部部分地区更适宜造林和退耕,ESV总量和支撑服务价值的提升潜力较大,而北部和东南部地区更适宜开垦农田,供给和调节服务价值提升潜力较大。不同生态系统服务间的权衡与协同是保障区域生态与经济稳定可持续发展的关键。充分考虑政策与环境适应性等因素,对东北农牧交错区土地利用格局进行优化,将为当地规划提供理论基础和实践参考。

**关键词:** 生态系统服务价值;农牧交错区;土地利用格局优化;多目标规划;CLUE-S模型

人类对土地的利用和管理是影响生态系统服务供给的重要因素<sup>[1]</sup>。在人口和资源需求量不断增长的背景下,全球超过60%的土地发生了生态系统服务功能的退化<sup>[2]</sup>,其中75%的退化或与人类不合理的使用有关<sup>[3]</sup>。优化土地利用格局,全面提升生态系统服务,对区域生态建设和可持续发展具有重要意义。

1997年,Daily<sup>[4]</sup>在其著作中系统地阐述了生态系统服务概念,并提出了基于货币单位的生态系统服务量化指标,即生态系统服务价值(Ecosystem Service Value,ESV)。同年,Costanza等<sup>[5]</sup>首次将生态系统服务概括为17种功能类型,并估算了全球ESV总量。自此,有关生态系统服务的分类及评估受到广泛而持续的关注,InVEST<sup>[6]</sup>、Co\$ting Nature<sup>[7]</sup>、LPJ<sup>[8]</sup>等ESV评估模型相继被开发和扩展,用于加强对区域生态质量的管理。近年来,有关生态系统服务的研究逐渐从理论构建向实际应用过渡,众多学者已关注到ESV在指导土地利用与决策方面具有重要价值。如Zhu等<sup>[9]</sup>基于对科尔沁地区生态系统抗风固沙功能的评估,提出以造林提升当地植被覆盖面积,进而缓解地表风蚀退化。但干旱区造林将加快土壤水及地下水的消耗,或将引发更严重的生态退化。Lei等<sup>[10]</sup>基于InVEST模型评估了东江河源区水域ESV,并通过情景模拟的方式探究了缓坡耕地弃耕对源区水

收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-07-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060405); 国家自然科学基金项目(41971232)

作者简介: 耿鑫(1997-),男,安徽淮南人,博士研究生,研究方向为干旱区资源开发利用。

E-mail: gengx.18b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王训明(1970-),男,安徽安庆人,博士,研究员,研究方向为干旱区环境演变。

E-mail: xunming@igsrr.ac.cn

源供给及养分截留等功能的影响。然而这些研究对区域内特定服务功能的提升较为关注,一定程度忽视了不同功能间的协同与权衡,这不利于维持区域生态系统结构及功能的稳定性<sup>[11]</sup>。谢高地等<sup>[12,13]</sup>基于 Costanza 等<sup>[5]</sup>的研究,制定了符合中国社会及市场发展规律的单位面积 *ESV* 当量表,使不同功能价值的评估更具有可比性,同时引入标准当量因子价值量实现参数的实时更新。基于当量法评估区域生态系统各功能价值,将有助于指导多情景下的土地利用规划,全面均衡地提升区域 *ESV*<sup>[14]</sup>。

在优化土地利用结构以实现区域 *ESV* 全面提升的基础上,需要对土地结构进行合理的空间分配以支持优化决策。在土地利用空间模拟研究中,以元胞自动机 (CA)<sup>[15]</sup>、Agent 模型 (ABM)<sup>[16]</sup> 和 CLUE-S 模型<sup>[17]</sup> 等为代表的空间模拟工具已广泛应用于改善土地利用管理。其中 CA 基于简单的全局适应性规则引导单元中的土地利用变化,较好地展现了邻域间的依赖性,适用于大尺度的宏观模拟。然而过分强调全局性将导致演化过程高度规则化,对局部演变难以干预和修正,因此不适用于小尺度的模拟。ABM 采用分布式的模拟思路,通过制定一系列的应激策略实现土地单元间自下而上的微观互动,避免了全局规则下的局部信息丢失。然而,分布式的模拟方式意味着较高的计算成本,而某些协同变化引发的规模效应往往导致模拟的失败。相比之下,CLUE-S 模型以环境适应性驱动全局演变,通过整合一系列局部规则实现单元演化的自动修正,兼备了 CA 和 ABM 对全局和局部模拟的优势。因此,以全面提升 *ESV* 为目标拟定区域土地利用需求,结合 CLUE-S 模型对当前格局进行空间优化,将可以为区域土地利用格局优化提供新的思路与框架。

中国东北农牧交错区是东北平原生态环境保护的重点区域。它既是中国东北部干旱半干旱区的重要生态屏障<sup>[18]</sup>,也是全国主要的粮食及畜牧产品生产基地之一<sup>[19]</sup>,其粮食、肉奶类产量分别占全国总产量的 9% 和 15% 以上 (2018 年地方统计数据, <http://tongji.cnki.net/kns55/navi/navidefault.asp>)。随着人口的增长,该地区粮食生产压力持续增加,大片天然草地存在开垦过度及超载放牧的现象<sup>[20]</sup>。为弥补因农牧业发展而带来的生态效益损失,该地区实施了大量的造林工程<sup>[21]</sup>,然而受自然条件的限制,人工林的建设难以达到预期<sup>[22]</sup>。因此,本文以东北农牧交错区为研究对象,基于 *ESV* 评估并结合 CLUE-S 模型对土地利用格局进行多目标优化模拟,以为农牧交错带的经济发展、生态环境保护提供科学依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

东北农牧交错区 (40°34'N~49°50'N, 116°25'E~126°15'E) (图 1) 地处内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁四省 (区) 交界,覆盖 52 个县级行政区,东部为东北平原地区,西邻大兴安岭—阴山山脉,总面积约 34.89 万 km<sup>2</sup>,以农牧业并重<sup>[12]</sup>。研究区属温带大陆性季风气候,年降水在 390~690 mm 之间,中西部降雨量较低,年均温在 -2.0~9.9 °C 之间。研究区以自然植被和农业用地为主,草地集中分布于中部和南部地区;耕地主要位于东部和东北部地区;林地集中于西北部地区。自 2001 年起,多项大规模造林与封山育林计划的实施,使得当地土地利用格局发生了巨大变化<sup>[21]</sup>。

### 1.2 数据来源

2001—2018 年逐年土地利用数据来自 500 m×500 m 分辨率的 MODIS MCD12Q1 数据集 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),该数据采用 IGBP 分类,将其合并为农田

(包括耕地、耕地与自然植被混合地)、林地(包括针叶林、阔叶林、混交林、灌丛林、多树/稀树草原林地)、草地、水域(包括永久湿地、水体)和建设用地五类。高程采用90 m×90 m分辨率的SRTM DEM数据集(<http://www.gscloud.cn>),基于此直接生成1 km×1 km的坡度栅格。2015年人口密度、GDP、年均温、年降水及土壤机械组成数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(RESDC, <http://www.resdc.cn>),分辨率为1 km×1 km,并根据土壤机械组成中各级别中值粒径及含量换算得到土壤粒径。河网数据来源于RESDC,并在ArcGIS中生成1 km×1 km距离栅格,作为直线取水距离的指标。2001—2018年全国粮食产量及播种面积来源于《中国统计年鉴(2002—2019年)》,2018年全国粮食价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编2019》。为统一多源数据的空间分辨率,采用Nearest法将土地利用及高程数据重采样为1 km×1 km,经验证,重采样前后土地利用面积偏差小于1%,其空间分布与原数据基本一致(Kappa>0.85);DEM数据在重采样前后也保持了相对一致的概率密度特征<sup>[23]</sup>,因此基于Nearest法的重采样不会对结果产生较大影响。

### 1.3 研究方法

以ESV为评估指标,构建非线性优化方程求解不同优化情景下的土地利用面积,使用二元Logistic模型构建区域特征因子与各土地类型间的回归概率方程,以此作为土地单元演化驱动力,借助CLUE-S模型实现不同情景下的土地利用格局优化(图2)。

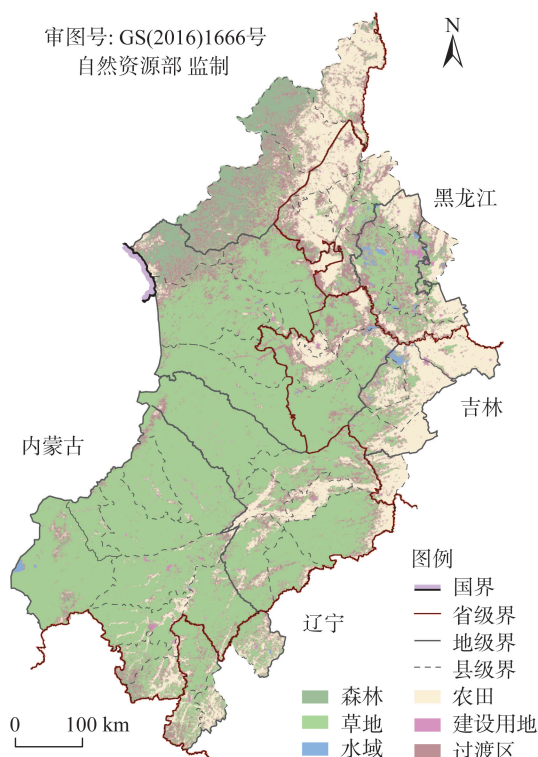
#### 1.3.1 ESV核算

采用当量法计算ESV价值量<sup>[5,13]</sup>:

$$V = \sum_{c=1}^n V_c \quad (1)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^m D \times F_{ci} \times A_{ci} \quad (2)$$

式中:  $V$  表示ESV总量(元);  $c$  表示生态服务功能的类型;  $V_c$  表示  $c$  类功能的服务价值(元);  $i$  表示第  $i$  类生态系统;  $F_{ci}$  表示第  $i$  类生态系统单位面积提供的  $c$  类功能价值的当量因子;  $A_{ci}$  表示计算  $c$  类功能价值时第  $i$  类生态系统的占有面积( $\text{hm}^2$ );  $D$  表示一



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 东北农牧交错带地理位置及土地利用现状(变化区指2001—2018年土地利用类型发生变化的区域)

Fig. 1 Geographical location and current status of land use in agro-pastoral ecotone in Northeast China (Change area refers to the area where the land use type changed from 2001 to 2018)

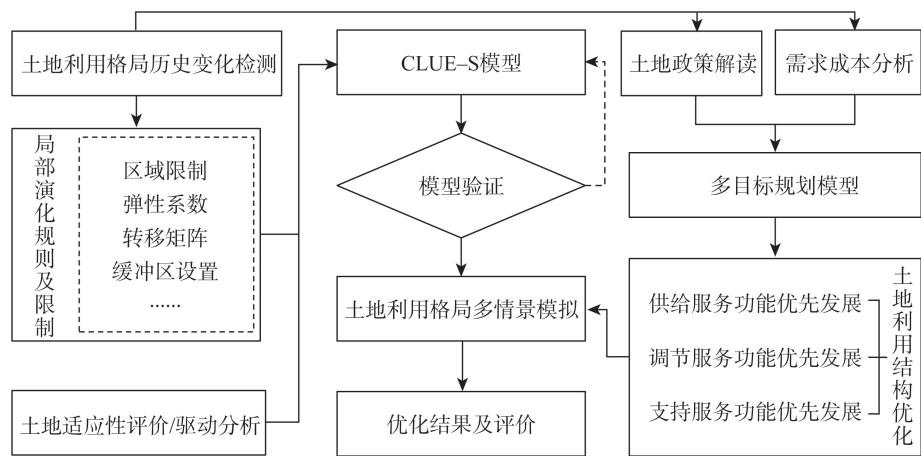


图2 研究框架

Fig. 2 A general framework for the study design

个标准当量因子的价值量（元/hm<sup>2</sup>），计算公式如下：

$$D=S_r\times F_r+S_w\times F_w+S_c\times F_c$$

(3)

式中： $S_r$ 、 $S_w$ 、 $S_c$ 分别表示估算当年稻谷、小麦、玉米的播种面积占三种作物播种总面积的百分比（%）； $F_r$ 、 $F_w$ 、 $F_c$ 分别表示估算当年稻谷、小麦、玉米的单位面积净利润（元/hm<sup>2</sup>）。

由于 $D$ 的逐年估算结果随社会经济的变动产生差异，为消除 $ESV$ 在土地利用格局评价中的社会经济不稳定因素，使用2001—2018年研究区年均粮食产量和2018年平均粮食价格估算出研究时段内的 $D$ 为3081.94元/hm<sup>2</sup>。在此基础上，参考谢高地等<sup>[13]</sup>2015年修订的单位面积 $ESV$ 当量表（表1）对 $ESV$ 总量及各功能价值进行评估。为便于分析和展示 $ESV$ 空间特征，将研究区划分为更小的评估单元。根据以往对 $ESV$ 空间特征的研究经验<sup>[24,25]</sup>，过小的评估单元（接近土地利用数据分辨率）将破坏邻近地区的相对一致性，而过大的评估单元（如行政单元尺度）则会抹平原本存在的空间差异。经过反复实验，本文确定以30 km×30 km格网作为 $ESV$ 空间评估的基本单元。

1.3.2 结构优化及情景设置

为保障优化决策可行性及区域生态功能完整性，对三种主要生态用地面积（农田、草地及森林）设置合理的调控阈值（表2）。此外，在不涉及水利工程建设的情况下，水域面积主要受控于自然环境而非人为调控，建设用地则不属于生态用地调控范畴，因此，分别

表1 中国陆地生态系统单位面积ESV当量表<sup>[13]</sup>  
Table 1 *ESV* unit area of Chinese terrestrial ecosystem<sup>[13]</sup>

生态系统 分类	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	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 水分	生物 多样性	美学 景观
森林	0.16	0.31	0.17	1.06	3.06	0.94	2.22	1.30	0.10	1.18	0.52
草地	0.10	0.14	0.08	0.51	1.34	0.44	0.98	0.62	0.05	0.56	0.25
农田	0.85	0.40	0.02	0.67	0.36	0.10	0.27	1.03	0.12	0.13	0.06
水域	0.80	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	0.07	2.55	1.89

表2 土地面积调控范围

Table 2 Range of land area regulation

类型		设定标准	阈值/km <sup>2</sup>	政策参考及数据来源
下限	森林	现有森林面积的90%	27600	《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020)》
	草地	现有草地面积的90%	192000	
	农田	现有农田面积的95%	96700	
上限	森林	控制造林育林成本不超过地区GDP总量的0.5% 参考三北防护林40年总投资约1.1万亿元、实现保有林地面积3014.3万hm <sup>2</sup> 的实践经验,估算造林育林的成本为9.1万元/(a·km <sup>2</sup> );研究区GDP总量约1万亿元	45500	《中国林业统计年鉴2018》 《中国统计年鉴2018》
定值	水域	S型曲线拟合(DoseResp函数)	3270	《中国水利统计年鉴(2001—2017)》
	建设用地	城市人口(2400万)×人均占有面积(100 m <sup>2</sup> )	2400	《城市用地分类与规划建设用地标准》 《中国统计年鉴(2001—2018)》

参考历史演变趋势及政策要求将水域和建设用地面积设置为定值(表2)。基于此,结合当量表估算不同功能价值在合理的土地利用调控范围内所能达到的理论上下限(表3)。

各功能价值达到其理论最大值所对应的土地利用结构存在差异,意味着没有一种决策可以同时实现所有功能价值最大化。为探索多元化的发展模式,本文分别对三种情景进行区域土地利用结构优化:

供给服务优先情景(SP):该情景以提升食物生产、原料生产和水资源供给为首要目标,这些有形的物质产品将带来直接的经济收益。尽管物资流动能力不断提高,社会不再依赖自给自足的生产方式,然而东北农牧交错区作为全国主要粮仓之一,在土地规划及生态建设中优先发展供给服务,对全国粮食安全有重要意义。

调节服务优先情景(SR):该情景追求更强的大气CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>平衡调节、废气吸收、水环境调节等功能,旨在最大程度改善地区水热环境,提高当地居民生活舒适度。

支持服务优先情景(SS):以支持服务为优先发展目标,对草地和森林,尤其是后者有较高需求。区别于供给服务创造的直接物质产出和调节服务带来的舒适度体验,该情景强调通过提高土壤保持、维持养分循环能力以及生物多样性水平来保障无形的生态稳定性,旨在获得最强的可持续发展能力。

通过改进非线性优化模型中的理想点法<sup>[26]</sup>求解不同优先发展情景下的土地利用需求:

表3 不同类型ESV理论边界

Table 3 Theoretical boundaries of ESV of different types

功能类型	边界	价值量/亿元	森林面积/km <sup>2</sup>	草地面积/km <sup>2</sup>	农田面积/km <sup>2</sup>
供给服务	U	727.08	27600	192000	123475
	L	648.69	27600	218775	96700
调节服务	U	3462.51	45500	200875	96700
	L	3086.97	27600	192000	123475
支持服务	U	1506.11	45500	192000	105575
	L	1430.26	27600	218775	96700
文化服务	U	245.57	45500	200875	96700
	L	215.00	27600	192000	123475

注:U和L分别表示上限和下限。

$$F(z) = \text{Min} \left[ \sum_{c=1}^m \left( \frac{V_c(z) - \sigma_c U_c}{L_c - U_c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} Ax_i \leq d \\ \sum_{i=1}^n x_i = N \end{cases} \quad (5)$$

式中： $F(z)$ 表示土地利用结构 $z$ 所对应 $ESV$ 估值相对于规划愿景的差异； $V_c(z)$ 表示该结构下的 $c$ 类功能价值（元）； $U_c$ 表示在约束条件下 $c$ 类功能价值的理论最大值（元）； $L_c$ 则对应其理论最小值（元）； $L_c - U_c$ 作为分母出现是为了消除各功能价值间的系统极差（元）； $m$ 表示用于建模的功能类型数； $x_i$ 是第 $i$ 类土地利用类型的规划面积（ $\text{hm}^2$ ）， $Ax_i \leq d$ 是对某一土地利用类型的面积约束条件； $N$ 是待规划区域总面积（ $\text{hm}^2$ ）； $\sigma_c$ 为目标权重因子，其值域为 $[L/U, 1]$ ，参考各功能价值的理论边界，本文分别将优先发展的功能价值权重设定为1，其余功能价值权重设定为0.95。该方程的求解目标即是得到使 $F(z)$ 最小时的各土地利用面积。

### 1.3.3 空间调控驱动力

政策及成本约束下的结构优化配置将在环境适应性的驱动下进行空间再分配，本文以2015年实际土地利用格局为参照，选取当年人口、GDP、土壤粒径、气温、降水、直线取水距离、高程和坡度作为环境因子构建二元Logistic回归模型以评估土地类型环境适应性，其原理如下：

假设某一栅格上出现某一特定土地类型的概率为 $P_i = P(y_i=1|x_i)$ ，那么：

$$P_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \cdots + \beta_n X_{nj})}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \cdots + \beta_n X_{nj})} \quad (6)$$

式中： $P_i$ 代表土地利用类型 $i$ 在该栅格单元可能出现的概率，概率越高，该地类在对应区位条件下适应性越强； $X_{nj}$ 为第 $n$ 个驱动因子在第 $j$ 个样本中的值； $\beta$ 为因子系数。由上式得到事件发生的似然比后取对数，便得到如下二元Logistic回归方程：

$$\text{Log} \left( \frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \cdots + \beta_n X_{nj} \quad (7)$$

式中：因子系数 $\beta_n$ 可评估各土地利用类型发生概率与因子的相关性，正值代表生态系统在因子高值区更易发育，相反负值代表生态系统在因子低值区更易发育，绝对值大小代表相关性的强弱。通过逐步引入变量的方法剔除相关性不显著的因子，其结果可用 $AUC$ 指标进行检验， $AUC > 0.7$ 时认为模型拟合较优<sup>[27]</sup>。

### 1.3.4 土地利用空间格局模拟

利用CLUE-S模型对不同情景下的土地利用结构进行空间分配，使用二元Logistic回归方程作为主要驱动参数，并拟定相关规则驱动局部演化，包括：（1）区域限制，即在政策要求下不发生土地转移的区域，多为生态或农业保护区域。研究区以基本农田和原始森林为主要保护对象，由于缺乏详细的空间信息，将区域限制设置在2001—2018年的固定森林和农田范围，这些区域将不参与土地属性的再分配。（2）弹性系数，描述土地转移的成本，介于0~1之间，值越大表示该土地类型转移成本越高，越不易变化，依据专家知识和历史观测设置各地类弹性系数为森林0.6、草地0.5、农田0.7、水域0.8、建设用地0.8。（3）转移矩阵，限制属性转移方向，值为0表示该属性转变不能发生，值为1

则反之。基于对2001—2018年土地利用变化的逐年检测,水域难以向森林、农田和建设用地转变,因此将其禁止。(4)此外,基于ArcGIS软件为水域和建设用地创建与现有斑块半径相同的缓冲区,将两种土地利用类型的空间调控限制在缓冲区内,使最终的土地利用格局更符合自然演变及城市发展规律。

为评估CLUE-S模型在研究区的适用性,以2005年为基准期模拟2018年东北农牧交错区土地利用格局,验证期内的土地需求面积设置为逐年提取的观测面积。将模拟结果与2018年的观测数据进行Kappa系数检验<sup>[28]</sup>,该值大于0.3时即可认为检测对象间一致性尚可;而该值大于0.7时,认为检测对象间具有高度的一致性。由于模型模拟的土地利用空间格局是遵循环境适应性原则的择优结果,而实际土地利用格局受决策者的主观影响较大,导致两者在局部地区尤其是不同土地利用类型间的过渡区存在较大偏差,因此通常在全局范围进行模型适用性的验证<sup>[29,30]</sup>。本文分别对全局和变化区进行一致性检验,前者用于验证模型适用性,而后者将用于评价实际土地利用决策是否合理。此外,针对三种主要土地利用类型(草地、耕地和森林)计算模拟的生产者精度和用户精度<sup>[31]</sup>,用于确定偏差来源。基于以上参数设置及验证,本文以2035年为模拟目标年份,实现不同优化情景下的土地利用格局空间模拟。

## 2 结果分析

### 2.1 农牧交错带ESV时空特征

2001—2018年研究区年均ESV总量为6473亿元,总体呈增加趋势(增长率9.69%)(图3)。2001—2014年ESV累计上升12.53%(相对2001年),上升速率约58.62亿元/a;2014—2016年上升停滞,之后迅速下降,2016—2018年累计下降2.79%(相对2016年),年均下降速率约95.7亿元/年。从功能结构上看,研究区生态系统以提供调节服务为主(图3),约占ESV总量的67.25%,其次为支持服务(21.88%)和供给服务(6.74%),而文化服务仅占0.04%,表明研究区生态旅游发展潜力较低,但作为东北部的生态屏障具有极高的价值。

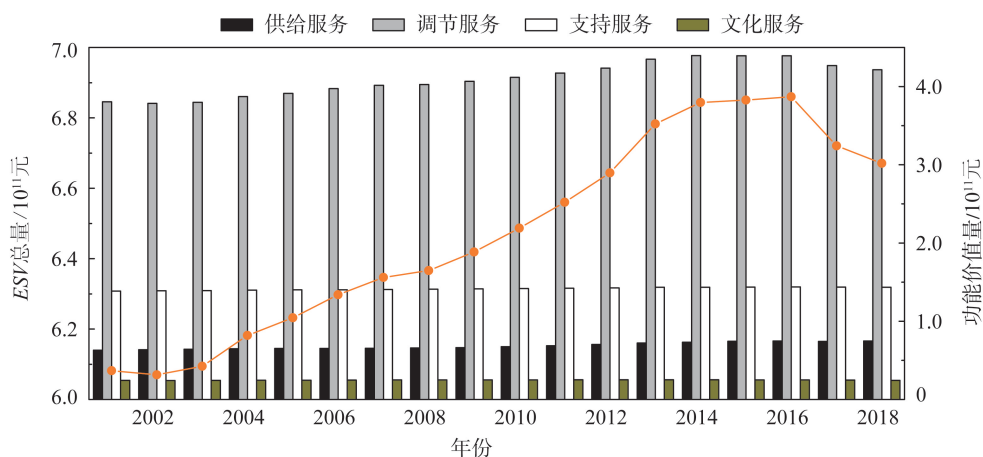


图3 2001—2018年农牧交错带ESV核算结果

Fig. 3 ESV of the study area from 2001 to 2018

东北农牧交错区年平均单位面积 $ESV$ 呈现出显著的空间差异,这与土地利用的空间格局关系密切(图4)。从 $ESV$ 总量上看,高值区零散分布于西北部与中东部地区,中西部及西南部次之,而低值区广泛出现于东部和南部,这与森林、草地和农田的集中分布有关。四种功能价值则呈现完全不同的空间分布,其中,供给服务价值自中西部向四周增加,其高值集中于东北部及中东部,这些地区农田分布集中,是食物及原料生产的主要地区,西北部的供给服务价值主要来源于森林的原料生产功能;调节服务价值的空间差异相对较小,整体上西部地区略高于东部地区,主要得益于森林和草地较高的气候调节价值;支持服务价值的高值区聚集在西北部,主要是由于西北部森林聚集,具备较强的土壤保持和生物多样性功能,而东部及南部的支持服务价值差异较小;文化服务价值同样表现为西部高于东部的特征,且差异相对较大,主要是因为西部地区森林和草地连片分布,它们所能提供的单位面积文化服务价值远高于农田。

2.2 空间驱动与验证

根据2001—2018年的土地利用格局固定区与8种区域特征因子建立概率回归模型,确定了各地类在8种因子综合影响下的发生概率。建模及检验结果显示(表4):五种地类概率回归模型的 $AUC$ 检验值均在0.75以上,回归结果可信;除森林模型中的取水距离和土壤粒径因子、水域模型中的取水距离因子和建设用地模型中的年均气温因子外,其他因子与相应土地利用类型均显著相关( $p<0.01$ )。

回归模型中的不同因子系数显示了土地利用类型的环境适应性,对于每种土地利用类型,CLUE-S模型基于环境适应性进行空间分配,例如,森林在陡坡、低温、高降水区优先规划,草地在高温区优先规划,而农田在缓坡区优先规划。三种主要土地利用类型环境适应性的空间分布显示(图5),森林在研究区西北部有较强的适应性,中部及中南部适应性相对较低;农田的适应性自东向西逐渐降低;草地适应性自北向南逐渐提

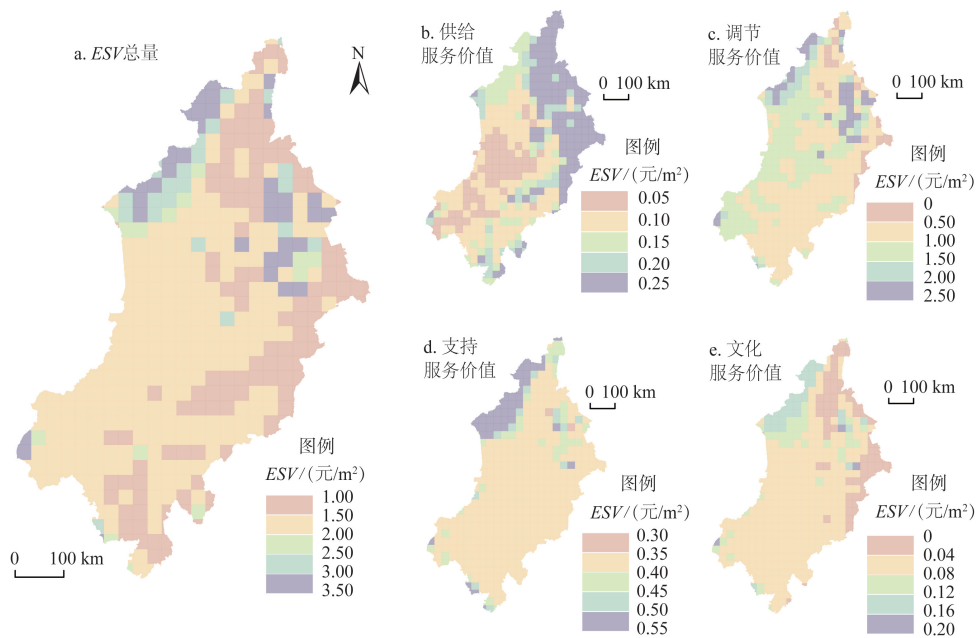


图4  $ESV$ 空间格局

Fig. 4 Spatial distribution of  $ESV$  at the county level

表4 不同土地利用类型的多要素Logistic回归及检验（仅保留 $p<0.01$ 的因子，因子系数扩大1000倍显示）

Table 4 Multi-element Logistic regression and testing of different land-use types (only factors with  $p<0.01$  are retained, factor coefficient expanded by 1000 times)

	森林	草地	水域	耕地	建设用地
常数	-33.43	3.67	16.56	-3.52	-0.61
人口密度	-15.39	-2.04	-5.53	3.90	1.67
GDP	-3.05	-0.19	0.56	-0.34	0.32
取水距离	—	0.02	—	-0.01	0.01
DEM	3.76	1.03	-5.67	-2.77	-1.38
坡度	155.94	-51.88	-1739.26	-387.19	-317.31
降水	60.63	-20.08	-22.10	10.23	-7.17
气温	-391.18	709.51	-839.58	22.94	—
土壤粒径	—	20.55	-121.49	-30.03	-22.34
AUC	0.98	0.92	0.95	0.90	0.76

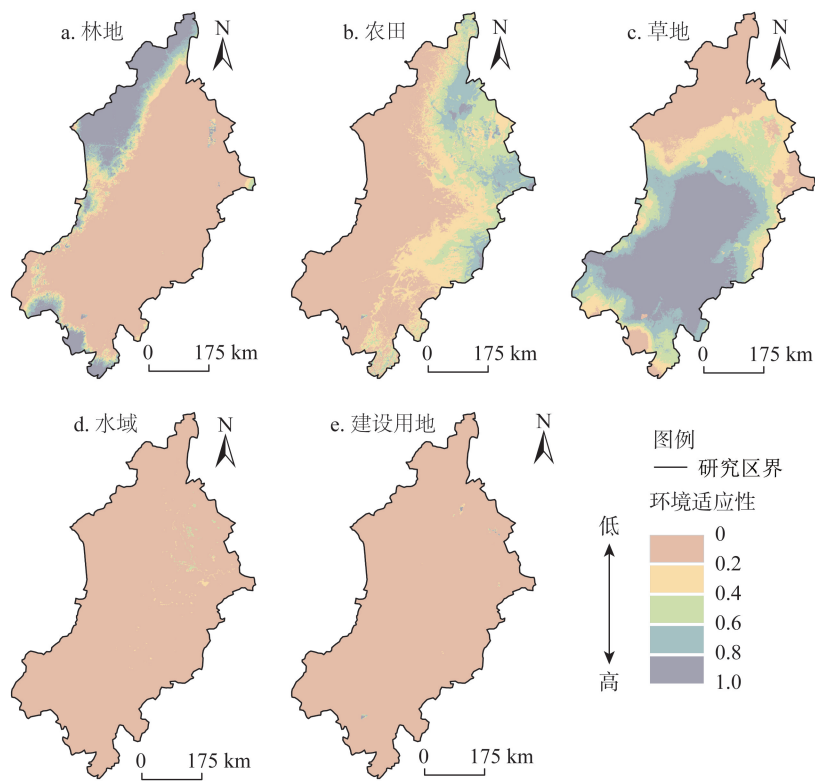


图5 土地利用类型的环境适应性分布

Fig. 5 Distribution of environmental adaptability of land use types

高，在中部及中南部达到最高。

将转换概率和既定的转变规则输入到CLUE-S模型的空间驱动模块，对2018年土地利用格局进行模拟，全局Kappa系数达到0.75（表5），即模拟的土地利用空间格局与观测数据间存在高度一致性，模型构建较为合理，可用于模拟东北农牧交错区土地利用格局。而变化区域的Kappa系数仅为0.38（表6），偏差主要来自草地与耕地之间，表明在

表5 模拟与观测结果的对比  
Table 5 Comparison of simulation and observation results

Kappa=0.75		模拟分类 (栅格计数)					生产者精度/%
		森林	草地	农田	水域	建设用地	
实际分类 (栅格计数)	森林	85595	16472	7048	0	0	78.44
	草地	18295	763161	68728	0	0	89.76
	农田	5225	70551	323626	0	0	81.03
	水域	0	0	0	13943	0	100.00
	建设用地	0	0	0	0	12048	100.00
	用户精度/%	78.44	89.76	81.03	100.00	100.00	—

表6 主要土地利用变化区的模拟与观测结果对比  
Table 6 Comparison of simulation and observation results of change area

Kappa=0.38		模拟分类 (栅格计数)				生产者精度/%
		森林	草地	农田		
实际分类 (栅格计数)	森林	31351	12053	4753		65.10
	草地	6921	21083	11775		53.00
	农田	2252	42748	71775		61.46
	用户精度/%	77.37	27.78	81.28		—

现有的土地利用决策中，部分不适合农业生产的草地已被开发。

2.3 土地利用格局优化

基于理想点法求解以获得不同优化情景下的土地利用结构配置（表7）。在供给服务优先的情景下，农田面积需增加16367 km<sup>2</sup>，造林面积需增加3633 km<sup>2</sup>，草地面积需减少19784 km<sup>2</sup>。在调节服务优先的情景下，造林面积需增加11093 km<sup>2</sup>，草地面积和农田面积则分别减少7210 km<sup>2</sup>和 3666 km<sup>2</sup>。而在支持服务优先的情景下，耕地面积和森林面积需增加6403 km<sup>2</sup>和15222 km<sup>2</sup>，此时草地面积需减少21410 km<sup>2</sup>。同时，基于自然发展趋势及土地政策的分析，水域和建设用地在三种优化方案中进行统一调控，即水域面积增加426 km<sup>2</sup>，建设用地面积需减少641 km<sup>2</sup>。总体来看，三种优化方案分别对20426 km<sup>2</sup>、11519 km<sup>2</sup>和22051 km<sup>2</sup>的土地面积进行调整，相当于研究区土地面积的5.86%、3.30%和6.32%，表明当前的土地利用结构仍有较大的优化空间。

三种情景的土地利用空间模拟结果（图6）及关键区对比（图7）显示，与2018年相比，优化后土地利用格局的变化主要集中于西北部森林与草地的过渡带及东北部耕地与草地的过渡带。三种情景下西北部森林面积均有所增加，不同的是，供给服务优先情景下西北部森林的增加主要发生在林区内部，而调节和支持服务优先情景下森林更多地向

表7 三种情景下土地利用结构配置  
Table 7 Land use structural configuration under three scenarios (km<sup>2</sup>)

情景设置	权重向量	森林面积	草地面积	农田面积	水域面积	建设用地面积
2018年现状		27627	213417	101815	2844	3041
供给服务优先	[1; 0.95; 0.95]	31260	193633	118182	3270	2400
调节服务优先	[0.95; 1; 0.95]	38720	206207	98149	3270	2400
支持服务优先	[0.95; 0.95; 1]	42849	192007	108218	3270	2400

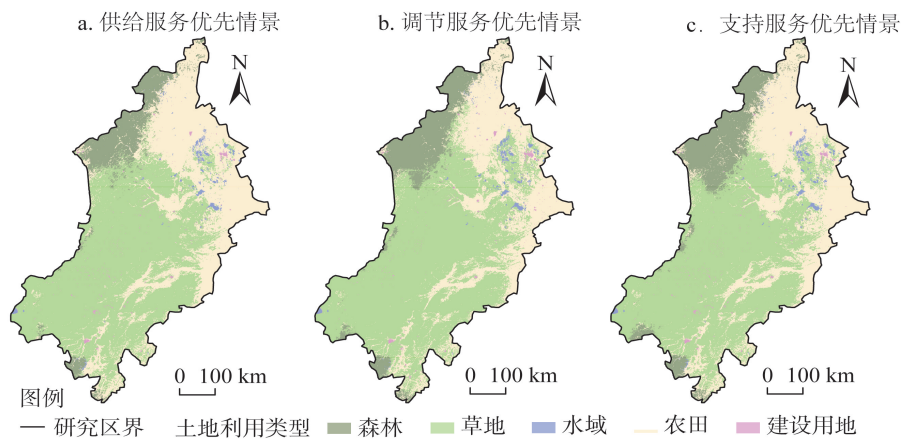


图6 三种情景的土地利用格局模拟结果

Fig. 6 Land use pattern simulation results of three scenarios

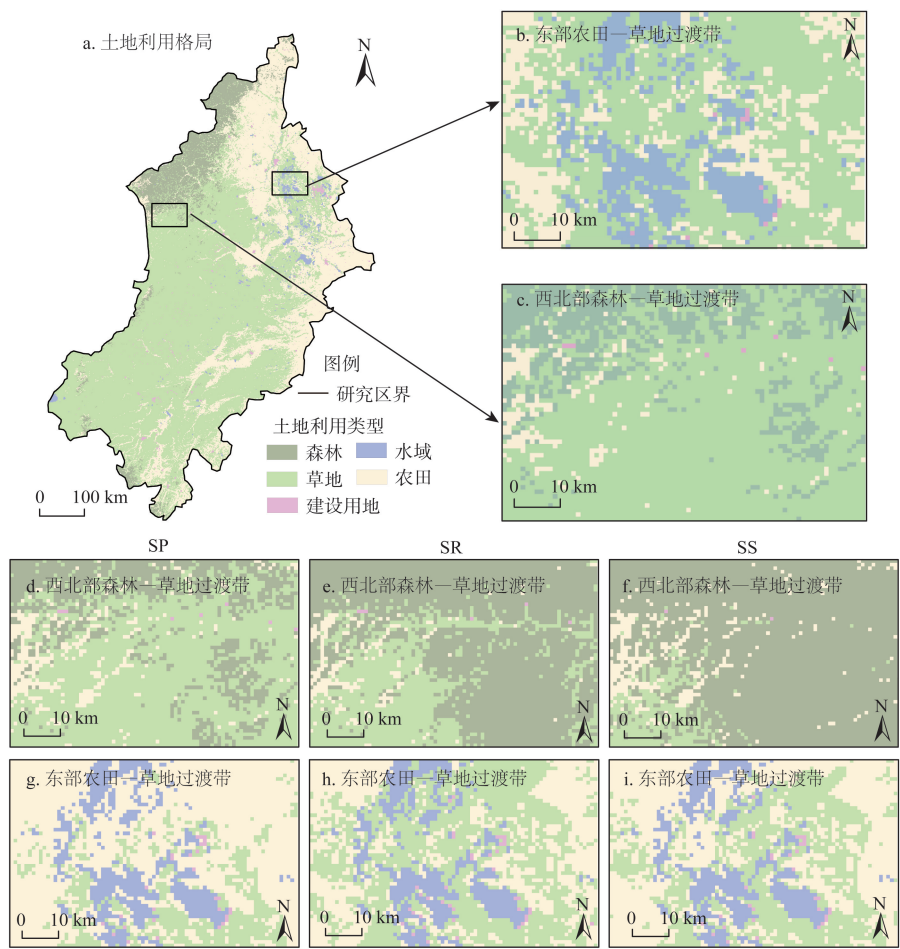


图7 三种情景的关键区对比

Fig. 7 Comparison of the key areas of the three scenarios

南扩张,其中支持服务优先情景下的扩张幅度最显著,这表明在扩张区域进行人工林建设的适宜性较高。三种情景下草地面积均有所缩减,但空间差异明显,其中供给服务优先情景下草地面积的缩减集中于东北部的草地与农田过渡区,主要是转化为农田以获取更高的支持服务价值,而在调节和支持服务优先的情景下,草地面积缩减主要发生在西北部的森林—草原过渡带,草地大量转化为林地。针对不同的土地利用需求,森林、草地和农田空间配置的差异性是各地类环境适应性的结果。此外,三种情景下的水域和建设用地设置为同一数值,由于水域和建设用地受地形等空间因子的制约,其空间分布在三种情景中基本保持一致,并基本保持在原有区域。

## 2.4 *ESV* 优化评价

优化后的 *ESV* 统计显示,三种方案均实现了区域 *ESV* 的提升。供给服务优先情景下, *ESV* 总量预计达到 6815.2 亿元,相比 2018 年上升 2.66%。其中供给服务价值增长 63.92 亿元,相比 2018 年提高 8.55%;调节和支持服务价值则小幅上升了 2.32% 和 1.58%。调节服务优先情景下, *ESV* 总量预计达到 7017.43 亿元,相比 2018 年增加 5.19%。其中调节和支持服务价值提升明显,预计分别达到 421.31 亿元和 147.74 亿元,相比 2018 年分别提升 7.25% 和 3.24%;而供给服务价值的提升相对较小,仅有 1.69%。支持服务优先情景下, *ESV* 总量预计达到 7060.28 亿元,相比于 2018 年增加 5.84%。供给服务、调节服务和支持服务分别达到 794.22 亿元、4514.31 亿元和 1532.33 亿元,相比于 2018 年分别提升了 6.17%、7.08% 和 4.77%。

不同优化情景下的 *ESV* 总量及各功能价值提升存在显著的空间差异(图 8)。其中, *ESV* 总量及支持服务价值的增加零散分布在西北部、西南部和东部部分地区,这与森林的增加有关。中部及东南部有较大面积的土地规划为农田,尽管农田供给服务价值较高,但其 *ESV* 总量及支持服务价值较低,导致该区 *ESV* 总量和支持服务价值供应减少。供给服务价值及调节服务价值的提升普遍发生于北部及东南部地区,这得益于森林和农田的增加。然而,西南地区部分农田和森林转换成草地,导致该区域供给和支持服务价值有所下降,实际上,这些地区的农田和森林的环境适应性较差(图 5),将其重新规划为草地反而有助于土地资源的高效利用。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

基于当量法评估并明晰东北农牧交错区 2001—2018 年 *ESV* 总量及各功能价值时空特征,以全面提升当地 *ESV* 为目标,结合多目标规划模型和 CLUE-S 模型,在遵循当地政策及经济限制的前提下分别探索以供给服务、调节服务和支持服务三种不同功能优先发展情景下的土地利用格局优化方案。主要结论如下:

(1) 2001—2018 年东北农牧交错区年均 *ESV* 总量为 6473 亿元,期间累计增长 9.69%,其中调节、支持和供给服务功能年均占比分别为 67.25%、21.88% 和 6.74%。不同功能价值间空间差异显著,与当地土地利用格局高度关联。

(2) 三种情景的优化结果显示,部分草地、建设用地向森林、农田和水域的转变有助于提升当地 *ESV*,其中支持服务优先情景下 *ESV* 总量提升 5.84%,高于供给服务(2.66%)和调节服务(5.19%)优先情景。

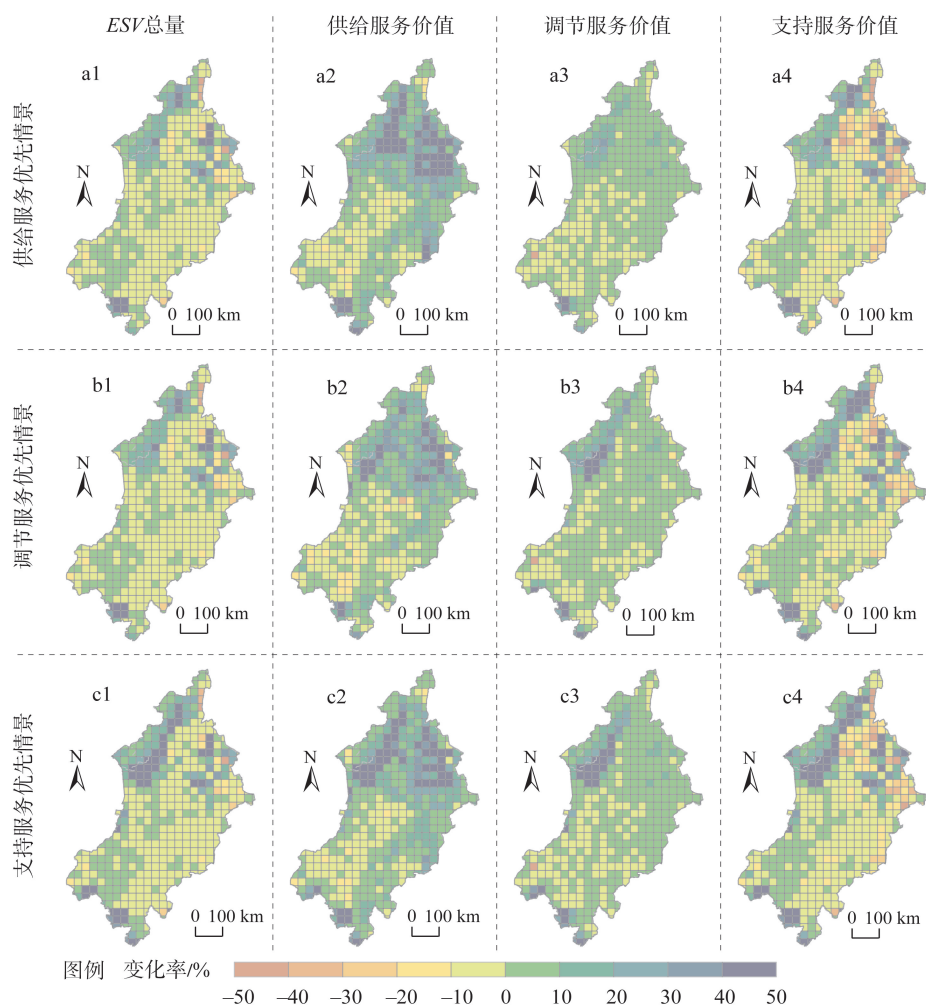


图8 优化后的ESV空间变化

Fig. 8 Spatial distribution of *ESV* changes after optimization

(3) 实证分析显示研究区西北部、西南部和东部部分地区更适宜造林和草地恢复, 支持服务价值的提升潜力较大, 而北部和东南部地区更适宜开垦农田, 供给和调节服务价值提升潜力较大, 对当地土地利用格局的调控应充分考虑自然及社会环境的限制。

### 3.2 讨论

东北农牧交错区生态系统的形成有其深刻的自然和经济基础。其西北部气候湿冷, 地形陡峭, 有利于土壤水分的涵养, 促进了森林的生长发育<sup>[32]</sup>, 也是人工林建设的首选区域; 相反, 其西南部及中部地区地势平坦, 温度较高, 人口较少, 有利于草地生态的保护<sup>[33]</sup>; 而东部地区人口集中, 温度及降水适中, 土壤质地较细, 适宜于农田耕作<sup>[34]</sup>。然而, 近年来部分草地向农田的转变违背了环境适应原则, 导致当地 *ESV* 下降。因此对土地利用格局的调整应充分考虑当地的环境承载能力<sup>[35]</sup>。此外, 基于对《全国土地利用总体规划纲要(2006—2020)》等政策的解读, 我们制定了一系列调控限制, 如以当地年均GDP的1%设定造林投入上限, 这些限制将保证本文的三种方案更符合当地的经济容量。三种方案对建设用地的缩减可能存在争议。经查证, 该地区在20世纪90年代以

前为迎合工业发展曾大举开发工矿用地,然而,这些土地正随着资源枯竭和政策转变而逐渐被舍弃<sup>[36]</sup>,因此,倡议重新规划该类土地。

总之,基于当量法评估*ESV*各功能价值,对探索不同发展情景下的土地利用格局有重要的参考价值。但是,一些尚未经过明确探讨的问题或将影响*ESV*在决策中的应用,如:*ESV*的流动是否同步于土地利用方式的改变?随着研究尺度的扩大,相邻地区生态系统服务间是否存在辐射影响?因此,有必要在未来的研究中持续探索并完善*ESV*的理论和评估框架。

## 参考文献(References):

- [1] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [2] LARSEN L. Ecosystems and human well-being. *Journal of the American Planning Association*, 2004, 70(3): 374-375.
- [3] GOMES E, INACIO M, BOGDZEVIC K, et al. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146716, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146716.
- [4] DAILY G. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D.C.: Island Press, 1997.
- [5] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [6] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [7] BAGSTAD K J, SEMMENS D J, WAAGE S, et al. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [8] SHARMA R, NEHREN U, RAHMAN S A, et al. Modeling land use and land cover changes and their effects on biodiversity in Central Kalimantan, Indonesia. *Land*, 2018, 7(2): 57.
- [9] ZHU W J, GAO Y, ZHANG H B, et al. Optimization of the land use pattern in Horqin sandy land by using the CLUMondo model and Bayesian belief network. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139929, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139929.
- [10] LEI J C, WANG S, WU J, et al. Land-use configuration has significant impacts on water-related ecosystem services. *Ecological Engineering*, 2021, 160: 106133, Doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.106133.
- [11] CAO S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semi-arid areas of China: Achievements, problems, synthesis, and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [12] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [13] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [14] 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.]
- [15] BOAVIDA-PORTUGAL I, ROCHA J, FERREIRA C C. Exploring the impacts of future tourism development on land use/cover changes. *Applied Geography*, 2016, 77: 82-91.
- [16] CROOKS A T. Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(5): 661-675.
- [17] VERBURG P H, VELSKAMP W S A, ESPALDON R L V, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.

- [18] 杨洁, 朱云峰, 李昭阳, 等. 东北农牧交错带土地生态环境安全指标体系的建立于综合评价: 以镇赉县为例. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 119-124. [YANG J, ZHU Y F, LI Z Y, et al. Evaluation on ecological security of land resources in ecotone between farming and animal raising in Northeastern China: A case study of Zhenlai county. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(1): 119-124.]
- [19] 徐磊, 张峭. 中国粮食主产区粮食生产风险度量与分析. 经济纵横, 2011, (21): 110-112. [XU L, ZHANG Q. Measurement and analysis of grain production risk in major grain-producing regions of China. Economic Review Journal, 2011, (21): 110-112.]
- [20] HUANG D, WANG K, WU W L. Problems and strategies for sustainable development of farming and animal husbandry in the Agro-Pastoral Transition Zone in Northern China (APTZN). International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2007, 14(4): 391-399.
- [21] 郑晓, 朱教君. 基于多源遥感影像的三北地区片状防护林面积估算. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2257-2264. [ZHENG X, ZHU J J. Estimation of shelter forest area in Three-North Shelter Forest Program Region based on multi-sensor remote sensing data. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2257-2264.]
- [22] CAO Q, WU J G, YU D Y, et al. Regional landscape futures to moderate projected climate change: A case study in the agro-pastoral transitional zone of North China. Regional Environmental Change, 2020, 20(2): 66.
- [23] 王雷, 龙永清, 杨勤科. 重采样方法对DEM数据质量的影响. 水土保持通报, 2016, 36(4): 72-77. [WANG L, LONG Y Q, YANG Q K. Effects of resampling method on data quality of DEMs. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 72-77.]
- [24] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征: 基于退耕还林工程的实施背景. 自然资源学报, 2019, 34(3): 539-552. [HOU M Y, YAO S B, DENG Y J, et al. Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on sloping land conversion program. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 539-552.]
- [25] 李建春, 袁文华. 基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究. 自然资源学报, 2017, 32(6): 988-1001. [LI J C, YUAN W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan city based on the grid method. Journal of Natural Resources, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [26] 许小亮, 李鑫, 肖长江, 等. 基于CLUE-S模型的不同情景下区域土地利用布局优化. 生态学报, 2016, 36(17): 5401-5410. [XU X L, LI X, XIAO C J, et al. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5401-5410.]
- [27] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.
- [28] COHEN J. A coefficient of agreement for nominal scales. Educational & Psychological Measurement, 1960, 20(1): 37-46.
- [29] 张沐锋, 刘万侠, 王健恩, 等. 基于Clue-S模型的石马河流域东莞段生态系统服务价值变化情景模拟. 水土保持通报, 2021, 41(1): 152-160. [ZHANG M F, LIU W X, WANG J E, et al. Scenario simulation of ecosystem service value change in Dongguan section of Shima River Basin based on Clue-S model. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 152-160.]
- [30] 郝晓敬, 张红, 徐小明, 等. 晋北地区土地利用覆被格局的演变与模拟. 生态学报, 2020, 40(1): 257-265. [HAO X J, ZHANG H, XU X M, et al. Evolution and simulation of land use /land cover pattern in Northern Shanxi province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 257-265.]
- [31] XIE S, LIU L Y, ZHANG X, et al. Automatic land-cover mapping using landsat time-series date based on Google Earth Engine. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3023, Doi: 10.3390/rs11243023.
- [32] 王金叶, 王艺林, 金博文. 干旱半干旱区山地森林的水分调节功能. 林业科学, 2001, 37(5): 120-125. [WANG J Y, WANG Y L, JIN B W. Studies on regulating function of forest hydrology and microclimate in arid and semi-arid area of West China. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 120-125.]
- [33] 张娟, 李剑萍, 王誉陶, 等. 西北干旱地区气候变化及其对草地生产潜力的影响. 生态科学, 2020, 39(3): 182-192. [ZHANG J, LI J P, WANG T T, et al. Climate change in arid regions of Northwest China and its impact on potential grassland productivity. Ecological Science, 2020, 39(3): 182-192.]
- [34] TAHMASEBI T, KARAMI E, KESHAVARZ, M. Agricultural land use change under climate variability and change: Drivers and impacts. Journal of Arid Environments, 2020, 180: 104202, Doi: 10.1016/j.jaridenv.2020.104202.

- [35] 沈颂东, 陈鑫强, 韩明友. 东北振兴的产业重构与空间布局: 基于振兴目标、资源优势和物流成本的综合分析. 经济纵横, 2020, (6): 102-108. [SHEN S D, CHEN X Q, HAN M Y. Industrial restructuring and spatial distribution of north-east revitalization: Comprehensive analysis based on revitalization goals, resource advantages and logistics costs. Economic Review Journal, 2020, (6): 102-108.]
- [36] DONG J W, TAO F L, ZHANG G L. Trends and variation in vegetation greenness related to geographic controls in Middle and Eastern Inner Mongolia, China. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(2): 245-256.

## Land use pattern optimization and evaluation based on *ESV* of agro-pastoral ecotone in Northeast China

GENG Xin<sup>1,2</sup>, HU Shi<sup>1</sup>, XIAO Yu<sup>1</sup>, WANG Xun-ming<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To improve the evaluation indicators in land planning and tap the potential of ecological construction in agro-pastoral ecotone of Northeast China, the spatiotemporal characteristics of ecosystem service value (*ESV*) in the region from 2001 to 2018 were interpreted, and three land use options (i.e., prioritized provisioning service, regulating service, and supporting service) were simulated using the multi-objective programming model and CLUE-S model. The results show that: (1) The total *ESV* increased by 9.69% from 2001 to 2018, with provisioning service, regulating service, and supporting service accounting for 67.25%, 21.88% and 6.74%, respectively. (2) The total *ESV* increased by 5.84% in the scenario of prioritized supporting service, which was higher than that of prioritized provisioning service (2.66%) and of prioritized regulating service (5.19%). (3) The environmental adaptability of different land use types is different, i.e., in northwestern, southwestern and eastern parts of the study area with more suitability for afforestation and conversion of farmland, the total *ESV* and supporting service have great potential to improve, while northern and southeastern parts are more suitable for farmland reclamation, which facilitates the improvements of prioritized provisioning service and regulating service. The synergy among different ecosystem services is important in ensuring the security and sustainable development of regional ecology and economy. Aiming to improve *ESV* with full consideration of policy and environmental adaptability, the land use optimization can provide theoretical basis and practical guidance for the land planning in agro-pastoral ecotone of Northeast China.

**Keywords:** ecosystem service value; agro-pastoral ecotone; land use optimization; multi-objective programming; CLUE-S