

## 锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径

史娜娜, 肖能文, 王琦, 韩煜, 高晓奇, 全占军\*

(中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 在“自然生态-干扰胁迫”框架下, 构建锡盟生态安全评价模型, 分析 2000—2015 年生态安全时空演变格局; 利用局部空间自相关分析其空间集聚状态, 并采用重心迁移模型追踪生态安全重心变化轨迹, 最终提出生态调控途径。结果表明: 1) 生态安全空间分布差异显著, 东北高西南低, 且呈现空间集聚态势, 高-高值区毗邻, 低-低值区毗邻; 2) 生态安全值上升, 生态安全有所提升, 但一般安全区仍然分布较广; 3) 生态安全重心主要位于西乌珠穆沁旗, 向东北迁移, 不安全重心向西南迁移至阿巴嘎旗境内; 4) 土地利用是促使生态安全变化的主要驱动力, 建议开展分区生态调控, 实行“一区一策”, 践行生态保护与社会协调发展的新模式。

**关键词:** 土地利用; 生态; 生态安全; 空间自相关; 重心迁移; 锡林郭勒盟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.028

中图分类号: Q148

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0228-09

史娜娜, 肖能文, 王琦, 韩煜, 高晓奇, 全占军. 锡林郭勒盟生态安全评价及生态调控途径[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 228—236. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.028 <http://www.tcsae.org>

Shi Nana, Xiao Nengwen, Wang Qi, Han Yu, Gao Xiaoqi, Quan Zhanjun. Ecological security evaluation and ecological regulation approach in Xilin Gol League[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 228—236. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.028 <http://www.tcsae.org>

### 0 引言

生态安全是国家安全的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 经济发展和快速城镇化带来一系列生态环境问题, 迫使人口—资源—环境之间的矛盾越发突出, 生态环境退化加剧, 生态安全成为生态领域的热点问题和社会可持续发展的新主题<sup>[2-3]</sup>。保障区域生态安全, 将生态安全管理纳入政府管理决策之中, 寻求生态安全调控途径, 成为促进区域可持续发展的重要手段<sup>[4-5]</sup>。生态安全评价就是根据自然生态、社会、经济因子之间的相互作用关系, 在特定的时空范围内以一定的标准对生态安全状况进行定性或定量的分析与评估<sup>[6-8]</sup>, 它是生态调控的基础和依据。

国外生态安全评价集中于土地评价(土地可持续评价)<sup>[9-10]</sup>、土地质量评价<sup>[11]</sup>、生态系统服务价值评价<sup>[12-13]</sup>、生态风险评价<sup>[14-16]</sup>和土地健康诊断<sup>[17]</sup>等方面; 评价模型多为 PSR 模型, 囊括生态社会、生态经济和生态环境 3 个元素, 衍生的 DPSIR 模型正在进行深入研究。国内主要集中于生态安全内涵<sup>[18]</sup>、指标选取及指标体系构建<sup>[19-20]</sup>、评价模型<sup>[21]</sup>、生态安全阈值划分等关键问题<sup>[22-23]</sup>; 评价对象以自然地理景观和人类活动影响显著区为主, 且多集中在省域、流域和市域尺度; 评价因子由单一因子发展为多因子综合评价, 一般基于 PSR、AHP 以及生态足迹模型构建指标体系, 并采用综合指数法开展定量评价。

由于区域地理位置、立地条件差异, 以及研究目的不同, 评价指标体系和评价方法的选取也不尽相同; 已有研究虽有定量分析, 但多数并未开展空间分析, 不能展示生态安全空间分布状态, 因而不能提出行之有效的生态调控措施和途径。

已有关于锡林郭勒盟(以下简称锡盟)生态安全评价的研究成果较少<sup>[24-27]</sup>, 评价方法易忽略要素之间的关联性和耦合性, 且缺乏客观的空间化、量化方法; 评价结果往往是静态的, 而工业化、城市化等驱动因子对区域生态安全的影响却是多时相、动态变化的, 模型结果往往不能有效揭示生态安全动态演化规律, 难以预测其发展趋势。由此可见, 以上研究在锡盟生态安全动态评价及生态调控方面略显不足。鉴于此, 在 500 m×500 m 栅格尺度上, 构建生态安全评价模型, 研究 2000—2015 年锡盟生态安全时空分布格局, 进而利用局部空间自相关分析其空间集聚态势, 并利用重心迁移模型寻找生态安全重心变化趋势, 进而提出生态调控途径, 以期为区域生态安全研究提供借鉴。

### 1 研究区概况

锡林郭勒盟地处内蒙古自治区中部(41°35′~46°46′N, 111°09′~119°58′E), 辖 2 市 9 旗 1 县, 总面积 20.26 万 km<sup>2</sup>, 是距京津冀经济圈最近的草原牧区, 驻地锡林浩特市(图 1), 是中国北方重要的生态安全屏障。地势南高北低, 以高原为主, 海拔 700~2 000 m。该区属于中温带干旱、半干旱大陆性季风气候, 年均温 0~4℃, 年均降水量 300~380 mm, 由西南向东北递增, 受制于降水量的空间分布, 草原类型从西南向东北依次跨

收稿日期: 2019-04-24 修订日期: 2019-06-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501108-5; 2016YFC0501101-3)

作者简介: 史娜娜, 工程师, 主要研究方向为生态系统评估。

Email: shinn123@163.com

\*通信作者: 全占军, 博士, 副研究员, 主要研究方向为自然地理学。

Email: quanzz@craes.org.cn

越荒漠草原、典型草原和草甸草原。区内还分布着隐域性沙地（浑善达克沙地）和农牧交错区（多伦县和太仆寺旗）。锡盟在煤电发展西移战略下，成为内蒙古自治区乃至中国的重要煤电基地之一，煤电基地具有七大矿区，分别为胜利、五间房、巴彦宝力格、查干淖尔、白音华、贺斯格乌拉和乌尼特矿区，以煤炭集中综合开发为主，所发电量均接入蒙西电网<sup>[27]</sup>。

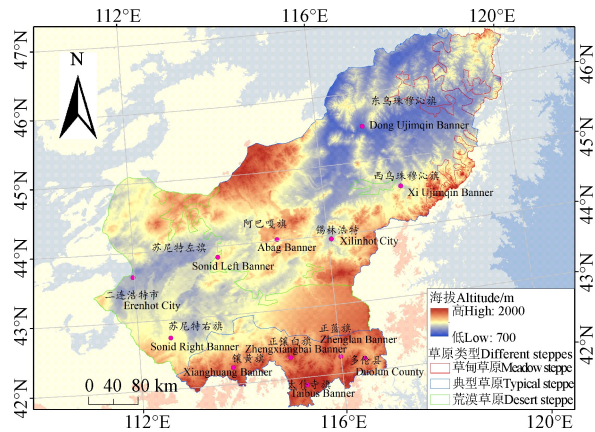


图 1 锡林郭勒盟地理位置  
Fig.1 Spatial location of Xilin Gol League

锡林郭勒盟虽拥有丰富的草原资源和煤炭资源，但生态环境十分脆弱，尤其是近年来煤电基地规模扩张导致自然资源消耗加剧<sup>[26]</sup>，并引起了生态系统退化、生物多样性丧失、生态功能下降、水土流失、土地沙化等生态环境问题。若任其累积到一定程度，必将危及区域生态安全，进而影响区域可持续发展。因此，以锡盟为研究对象，构建生态安全评价模型，分析其动态演变趋势；利用重心模型寻找不同生态安全等级重心迁移方向，进而提出生态安全调控途径及对策，以期为保障煤电基地生态安全提供借鉴。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及处理

数据源包括土地利用数据、DEM 数据、气象数据、社会经济数据等。1) 土地利用数据：采用 2000、2010 和 2015 年 30 m×30 m 空间分辨率的研究区遥感解译数据，解译精度为 95%；2) DEM：分辨率为 30 m×30 m，来源于地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>），坡度数据利用 DEM 计算获取；3) 距道路距离、距河流距离、距工矿用地距离、距交通用地距离、距城镇用地距离等，是通过 2000、2010 和 2015 年的土地利用数据分别提取道路、河流、工矿用地、交通用地、城镇用地，然后分别做 500、1 000 和 1 500 m 的缓冲区；4) NDVI 数据：采用 2000—2015 年 MODIS-NDVI 数据（<http://www.gscloud.cn/>），空间分辨率 500 m，时间分辨率 30 d，计算研究区 NDVI 多年平均值；5) 土壤数据：来源于中国科学院南京土壤研究所 1:100 万土壤类型数据；土壤侵蚀数据是根据《土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007》，利用 2000、2010 和 2015 年的植被覆盖度和坡度计算获得；6) 气象数据：来源于中国气象数据网（<http://data.cma.gov.cn/>），选取气象台站 2000—2015 年气温和降水两个变量，利用 kriging 插值生成空间分布数据；7) 社会经济数据：来源于锡林郭勒盟 2001—2016 年统计年鉴及国民社会发展统计公报等。所有用于生态安全评价模型的数据均采用 500 m×500 m 分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 生态安全评价模型

依据系统性、代表性、实用性及数据的可获得性原则，综合考量区域生态安全的自然环境特征、人类干扰、潜在影响因素，构建“自然生态—干扰胁迫”框架下得锡盟生态安全评价指标体系（表 1）。各个指标的分级见表内相关标准或参考文献，并利用 ArcGIS 的重分类功能从低到高将其分为 4 类，分别赋值为 1、2、3、4。

表 1 锡林郭勒盟生态安全评价指标体系  
Table 1 Assessment index of ecological security in Xilin Gol League

类型 Type	评价指标 Indicators	单位 Unit	参考分级标准 Reference standard	分级赋值 Value of different level			
				4	3	2	1
自然生态 Natural ecology	DEM	m	研究区情况	<1 000	1 000~<1 200	1 200~1 400	>1 400
	坡度	(°)	蒙古军等 <sup>[28]</sup>	<7	7~<15	15~25	>25
	土壤类型	-	实地调查	草甸土、黑钙土	棕壤、灰褐土	棕钙土、栗钙土	沙地
	土壤侵蚀	t/(km <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	土壤侵蚀分类分级标准（SL190-2007）	<2 500	2 500~<5 000	5 000~8 000	>8 000
干扰胁迫 Interference stress	NDVI	-	王琦等 <sup>[29]</sup>	>0.65	>0.5~0.65	0.35~0.5	<0.35
	土地利用类型	-	魏东等，2014 <sup>[27]</sup>	林地、水库水面、河流水面、草地	坑塘水面、沙地	农田、果园、沟渠	交通用地、城市、建制镇、工矿用地
	距道路距离	m	王琦等，2016 <sup>[29]</sup>	>2 000	1 000~2 000	500~<1 000	<500
	距居民点距离	m	潘竟虎等 2015 <sup>[30]</sup>	>1 500	1 000~1 500	500~<1 000	<500
	距水体距离	m	李晶等，2013 <sup>[31]</sup>	<500	500~<1 000	1 000~1 500	>1 500
	距工业用地距离	m	潘竟虎等 2015 <sup>[30]</sup>	>1 500	>1 000~1 500	500~1 000	<500

运用 ArcGIS 的空间主成分分析模块, 利用其能够最佳综合与简化高维变量的特性, 将各主成分的特征值作为权重, 采用栅格计算模块对 10 个主成分开展加权求和, 从而获取锡盟生态安全的空间分布。

### 2.2.2 局部空间自相关

局部空间自相关以 Moran's  $I$  散点图和 LISA 集聚图来评价相似和不相似样本的空间聚集程度<sup>[32]</sup>。局部 Moran's  $I$  系数用来反映局部空间自相关度, 其计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x});$$

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x})^2; \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

式中  $I_i$  是局部 Moran 指数,  $x_i$  是景观观测值,  $N$  是观测值总数,  $i$  是景观类型,  $s$  是方差,  $\bar{x}$  是观测变量的平均数,  $W_{ij}$  为权重。Moran's  $I$  取值为  $[-1, 1]$ , 正值表示生态安全等级趋于聚集, 负值表示集聚性在空间上逐渐减少甚至消失, 0 代表生态安全等级之间独立随机分布, 无相关性。

Moran's  $I$  散点图反映局部不稳定性特征, 与 LISA 集聚图相对应, 反映了高-高、低-低、高-低、低-高 4 类分析单元与其临近单元的关联状况。本研究采用 Geoda 软件进行 Moran's  $I$  计算。

### 2.2.3 重心迁移模型

生态安全重心迁移模型是在空间上描述不同生态安全等级的时间演变过程, 表征重心空间变化趋势。生态安全重心是引用人口地理学中常见的人口分布重心原理求得的<sup>[33-34]</sup>。重心坐标一般以经纬度表示, 其计算方法为

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^m (C_{ti} X_i)}{\sum_{i=1}^m C_{ti}} \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^m (C_{ti} Y_i)}{\sum_{i=1}^m C_{ti}} \quad (3)$$

式中  $X_t$ 、 $Y_t$  分别是第  $t$  年生态安全重心经纬度坐标;  $C_{ti}$  是第  $t$  年第  $i$  个生态安全等级分区的面积;  $X_i$ 、 $Y_i$  分别为第  $i$  个生态安全斑块几何中心经纬度;  $m$  为该种生态安全斑块总数。

生态安全重心空间区位年际移动距离的测度一般采用如下公式

$$D_{t'-t} = C \times \left[ (Y_{t'} - Y_t)^2 + (X_{t'} - X_t)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中  $D$  表示 2 个不同年份间中心迁移的距离;  $t'$  和  $t$  分别表示不同年份;  $(X_{t'}, Y_{t'})$ 、 $(X_t, Y_t)$  分别表示第  $t'$  和  $t$  年的区域重心所在空间的地理坐标;  $C$  是地理坐标转化为平面距离的系数。

### 2.2.4 生态调控分区

在区域立地条件分析和生态安全评价的基础上, 根据生态安全格局需求和生态调控目标, 依托区域气候特征、地形地貌、植被类型、土壤性质及产业结构特征等, 开展分区研究, 并据此提出区域生态调控措施。

## 3 结果与分析

### 3.1 时间演变特征

锡盟生态安全指数计算结果见表 2, 空间分布见图 2。2000 年, 生态安全指数最低的区域分布在正蓝旗以及正镶白旗和苏尼特左旗交界处; 生态安全指数较高的区域分布在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗。2005 年, 锡盟生态安全空间分布格局发生明显变化, 生态安全较高的区域增加了锡林浩特市北部, 重心整体偏向于东乌珠穆沁旗; 生态安全指数较低的区域增加了正蓝旗、太仆寺旗和镶黄旗, 重心向南偏移。2015 年, 生态安全指数较高的区域又集中在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗, 生态安全指数较低的区域增加了苏尼特左旗北部和苏尼特右旗南部。

综合上述, 2000—2015 年, 锡盟生态安全指数整体呈现下降趋势; 生态安全空间差异显著, 高度安全区基本稳定, 低度安全区面积不断扩大。究其原因, 人口增长和快速城市化进程促使锡盟土地利用/土地覆被发生变化, 人为活动的影响迫使生态系统承受越来越大的压力, 致使生态稳定性降低, 生态安全指数下降。退耕还林还草工程、京津风沙源治理工程的实施改善了部分区域的生态安全指数, 生态保护策略的积极实施将有助于提高区域生态安全水平。

表 2 锡林郭勒盟 2000、2010 和 2015 年生态安全指数

Table 2 Eco-security indices in 2000, 2010 and 2015 in

Xilin Gol League

年份 Year	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	方差 Variance	局部 Moran's $I$ Local Moran's $I$
2000	2.265 1	6.556 8	4.674 2	0.584 9	0.790 1
2010	1.417 5	7.392 5	4.133 1	0.795 4	0.750 7
2015	1.955 1	8.374 2	5.266 7	0.878 1	0.720 7

### 3.2 空间演变特征

利用 Geoda 软件绘制锡盟 2000、2010 和 2015 年生态安全指数 Moran's  $I$  散点图 (图 3), 结果显示区域生态安全有较强的空间正相关。为了更直观展示生态安全空间分布格局, 利用 Geoda 软件绘制 LISA 图 (图 4), 可见, 区域生态安全并不是随机分布的, 而是存在一定的内在联系, 即表现出一定的空间聚集态势。生态安全高值区倾向于与高值区毗邻, 生态安全低值区倾向于与低值区毗邻。

锡盟生态安全局域自相关空间差异显著。2000 年, 生态安全高-高值区分布在乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部; 锡林浩特市、多伦县、太仆寺旗、正蓝旗也有小面积高-高值区; 较大面积的低-低值区分布在南部 (苏尼特左旗、苏尼特右旗、二连浩特市、正蓝旗)。2000—2010 年生态安全空间分布格局发生了变化, 高-高值区依然集中在北部 (乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部), 面积有所扩大; 低-低值区发生转移, 主要分布在苏尼特右旗、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗、太仆寺旗, 阿巴嘎旗北部。2015 年, 高-高值区呈扩大趋势, 依然集中分布

在乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部, 此外, 阿巴嘎旗中南部、锡林浩特市中部、多伦县东部也有分布; 低-低值区扩大, 主要分布在苏尼特左旗、苏尼特右旗、镶

黄旗、正镶白旗、正蓝旗、太仆寺旗。2000—2015 年, 锡盟西南部受人类活动及自然因素的影响<sup>[26]</sup>, 不安全状态增加; 东北部安全态势好转。

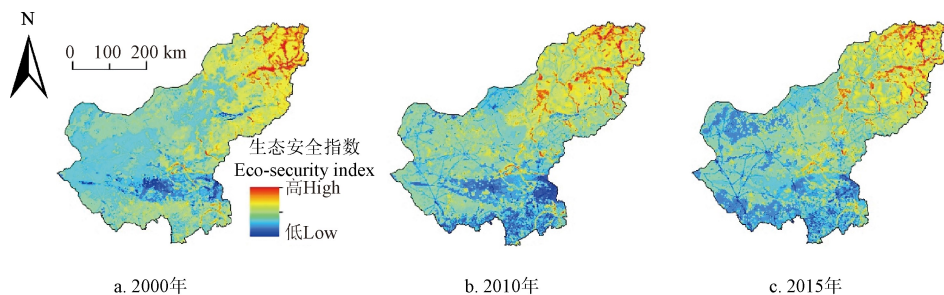


图 2 锡林郭勒盟 2000、2010 和 2015 年生态安全格局概况

Fig.2 Spatial distribution survey of eco-security in 2000, 2010 and 2015 in Xilin Gol League

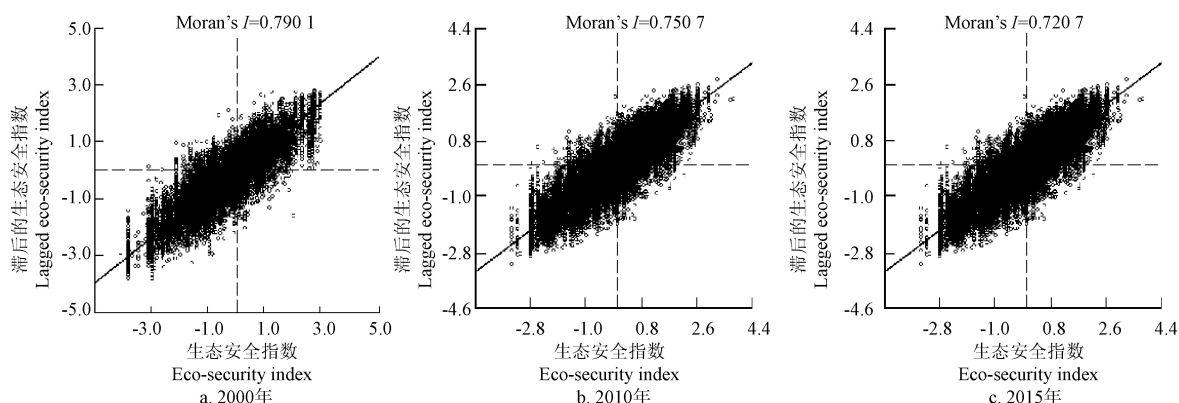


图 3 锡林郭勒盟 2000、2010 和 2015 年 Moran's I 散点图

Fig.3 Moran scatter plot in 2000, 2010 and 2015 in Xilin Gol League

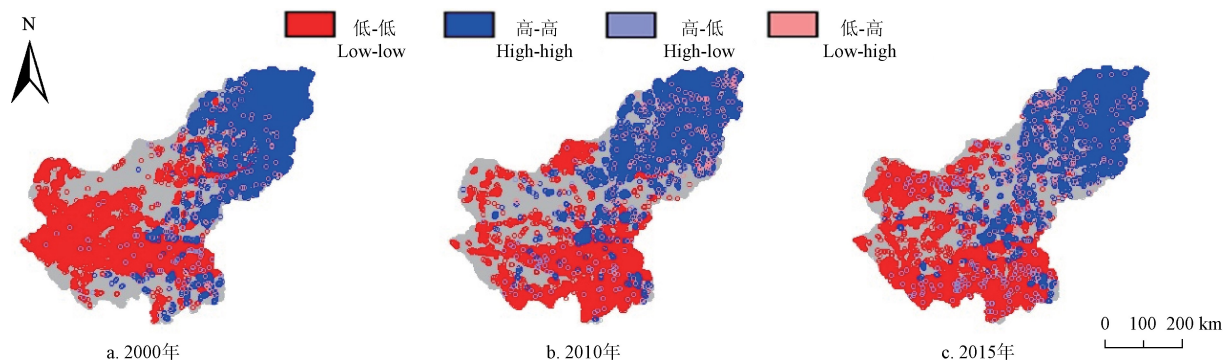


图 4 锡林郭勒盟 2000、2010 和 2015 年空间自相关 LISA 结果

Fig.4 LISA result of spatial autocorrelation in 2000, 2010 and 2015 in Xilin Gol League

综上, 锡盟生态安全指数较高的区域主要分布在东北部, 以草甸草原和典型草原植被为主; 生态安全指数较低的区域主要分布在南部, 以荒漠草原为主, 植被稀疏, 生态环境脆弱。这也表明生态安全指数高值区域容易对其周围产生正面影响, 而低值区可以影响其周围的高值区, 使其趋于不安全状态。干旱胁迫和资源开发利用活动在一定程度上加剧了区域的不安全状态<sup>[31]</sup>, 因此, 降低人为活动干扰, 合理利用草地资源, 保护和改善生态环境, 保障生态安全。

### 3.3 生态安全等级划分

#### 3.3.1 不同安全等级面积变化

在 2000、2010 和 2015 年锡盟生态安全评价的基础上, 利用 ArcGIS 空间分析的自然断点法将生态安全划分为安全、较安全、一般安全、不安全 4 个等级 (表 3 和图 5)。2000 年, 锡盟生态安全以较安全和一般安全为主, 分别占总面积的 29.56% 和 56.61%; 2010 年, 锡盟生态安全等级下降, 较安全和一般安全面积显著下降, 导致不安全面积增大; 2015 年, 较安全和安全面积显著增加, 其中较安全面积增至  $4.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 不安全面积减少至 23.95%, 表明 2015 年生态安全等级上升。

表 3 锡林郭勒盟生态安全等级划分结果  
Table 3 Classification of eco-security in Xilin Gol League

安全等级 Eco-security classification	2000 年		2010 年		2015 年	
	面积 Area/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%	面积 Area/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%	面积 Area/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	比例 Proportion/%
安全 Safe areas	1.23	6.13	1.22	6.02	1.32	6.55
较安全 Comparatively safe areas	5.94	29.56	2.67	13.18	4.43	22.04
一般安全 General safe areas	11.70	56.61	7.99	39.44	9.70	47.46
不安全 Unsafe areas	1.39	7.70	8.38	41.37	4.81	23.95

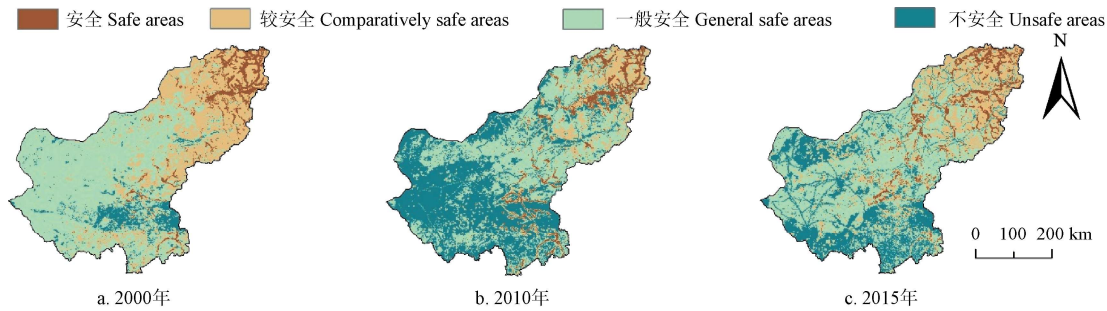


图 5 锡林郭勒盟生态安全等级空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of eco-security classification in Xilin Gol League

3. 3. 2 不同安全等级重心演变

利用重心模型计算了不同生态安全等级的重心坐标，其空间迁移见图 6。锡盟自西向东呈现出“不安全”→“一般安全”→“较安全”→“安全”的空间分布态势，与生态安全类型的空间分布一致，这表明锡盟西南地区存在较大的生态安全问题，且重心集中在苏尼特左旗和阿巴嘎旗。2000—2010 年，不安全和一般安全有向北偏移的趋势，不安全重心向东北迁移 101.28 km，一般安全重心向西北迁移 40.98 km，较安全重心向南迁移 75.59 km，安全重心点向南迁移了 32.30 km。2010—2015 年，安全重心向东北迁移，依然在西乌珠穆沁旗，并且迁移到与东乌珠穆沁旗交界处；较安全重心继续向东北迁移；一般安全和不安全重心分别向东南和西南回迁，不安全重心迁移至阿巴嘎旗。

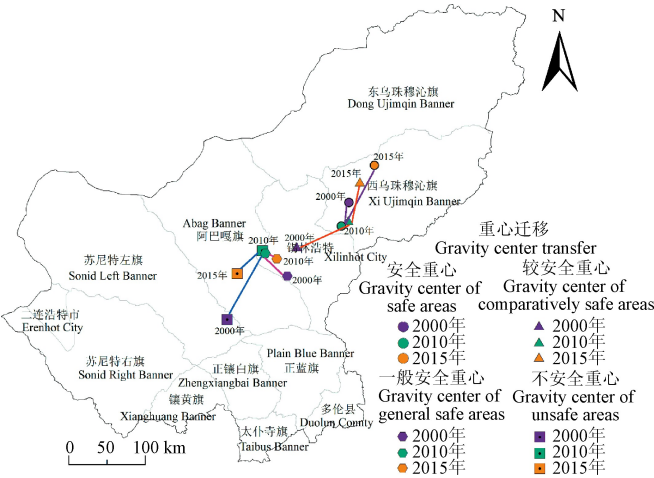


图 6 锡林郭勒盟 2000—2015 年生态安全重心演变  
Fig.6 Spatial migration of gravity centers in Xilin Gol League during 2000 - 2015

综合上述，不安全和一般安全重心北移之后又回迁，主要集中在苏尼特左旗和阿巴嘎旗境内，西南地区生态

安全局势严峻；较安全和安全重心一直向东北迁移，西乌珠穆沁旗地位显著，整个东北地区生态安全度提高。西南地区的苏尼特右旗在持续的退耕还林还草等管理政策支持下，生态安全水平有所上升。

3. 4 生态安全调控对策与途径

区域生态安全评价是区域生态安全调控的基础，是进行生态安全管理的技术支撑。基于生态安全评价及等级结果，利用 ArcGIS 的 spatial analysis 功能，空间叠加植被、土壤、气候、土地利用等因素，将全盟划分为 6 个生态分区。综合考虑区域生态功能及土地用途，将 6 个分区分别命名为核心保育区、生态管护区、传统利用区、生态恢复区、退耕还林还草区、沙源治理区（图 7）。根据各个区域的特点，制定“一区一策”措施，加强生态安全调控和管理。

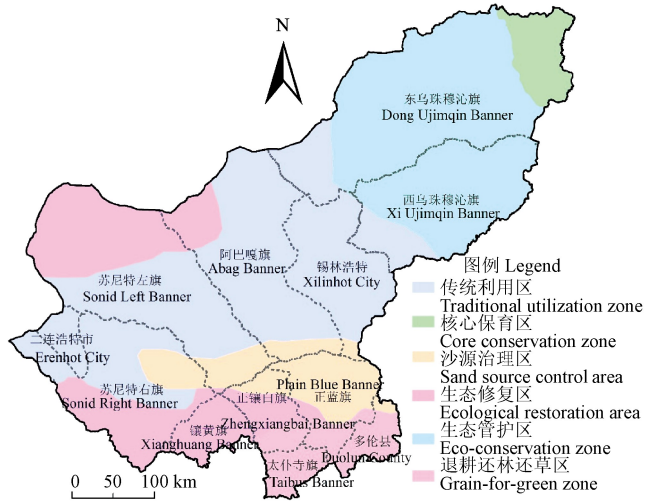


图 7 锡林郭勒盟生态分区调控  
Fig.7 Ecological regulation on different zones in Xilin Gol League

1) 核心保育区: 面积 7 218.28 km<sup>2</sup>, 约占全盟总面积的 3.52%, 主要分布在东乌珠穆沁旗东北部。干旱胁迫、掠夺式开发、过度放牧等自然和人为干扰造成草原功能下降。建议将草甸草原区划为禁牧区, 实行最严格保护; 其他区域引导牧民合理放牧, 以草定畜, 保持生态平衡。此外, 可开展一定范围的核心景观参观游憩, 但要统一管理游客数量、路线和行为等。

2) 生态管护区: 面积 58 324.12 km<sup>2</sup>, 约占全盟总面积的 26.57%, 分布在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗大部分区域。该区生态状况相对较好, 土地利用方式改变导致高覆盖草地退化成中低覆盖草地, 加之自然环境变化, 仍需加强生态保护。建议进一步巩固生态恢复效果; 控制沿河放牧的牲畜数量, 建立农-牧-特色产业综合经济区; 建立生态安全保护屏障。

3) 传统利用区: 面积 76 970.62 km<sup>2</sup>, 约占全盟总面积的 37.99%, 主要分布在锡林浩特市、阿巴嘎旗大部、苏尼特左旗中部、苏尼特右旗北部、二连浩特市北部。该区以中低覆盖草地为主, 草地退化较为严重, 放牧等人类干扰活动强度大。建议在草畜平衡区发展生态畜牧业; 重要湖泊及湿地禁止干扰强度较大的人为开发工程; 退化草地以自然恢复为主, 通过禁牧或季节性休牧, 促进草地生态系统良性发展。

4) 生态修复区: 面积 35 426.42 km<sup>2</sup>, 占全盟面积的 17.49%, 主要分布在苏尼特左旗北部、苏尼特右旗南部、镶黄旗、正镶白旗中部。该区生态安全度最低, 以低植被覆盖为主, 该区生态本底较差, 草场植被覆盖度低, 主要是荒漠草原, 过度放牧、城镇化及工矿用地增加造成生态退化。建议实施适宜的生态恢复工程, 提高植被覆盖度。

5) 退耕还林还草区: 面积 11 213.94 km<sup>2</sup>, 占全盟面积的 5.54%, 主要分布在太仆寺旗和多伦县, 并包括正蓝旗和正镶白旗的一部分。传统的畜牧业生产方式(靠天养畜, 全年放牧)导致超载过牧, 农田扩张侵占部分草地。建议合理划分草场, 积极推行禁牧、休牧等措施, 让草原休养生息; 发展新型畜牧业方式, 将种植和养殖有机结合, 减轻草场压力。

6) 沙源治理区: 面积 18 036.72 km<sup>2</sup>, 占全盟面积的 8.90%, 主要包括浑达克沙地, 为锡盟沙地的集中分布区。气候变化和人类活动的双重影响导致该区地下水位下降、草场退化、沙化加剧。建议在京津风沙源治理工程政策的指导下, 以“点面结合、综合治理”为原则, 实行集中连片治理; 划定禁牧、休牧、轮牧区, 遵循草畜平衡原则发展生态畜牧业。

## 4 讨 论

锡盟生态安全状况整体好转, 局部恶化。东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、二连浩特市等在 2000—2010 年生态安全指数下降趋势明显, 在 2010 年之后逐步恢复。究其原因, 国家政策对区域生态保护与发展具有导向性<sup>[35]</sup>。国家实施的退耕还林、天然林保护等生态保护与修复工程效果逐步显现, 是影响

锡盟生态安全的重要驱动力。如 2000—2015 年锡盟植被 NDVI 整体呈现增长趋势(图 8), 特别是 2010 年以来, NDVI 增长趋势明显, 促使生态系统得到一定程度的恢复。此外, 生态保护虽然取得一定成效, 但由于人类活动干扰强度较大, 生态保护力度还远远不够。因此, 要以生态修复为契机, 加快自然生态系统恢复, 提升生态系统服务功能, 构建区域生态安全格局<sup>[36-37]</sup>。

土地利用是促使生态安全时空变化的主要驱动力之一<sup>[6]</sup>。2000 年以来, 锡盟土地利用变化的特点是草地减少, 非农地快速增加。根据锡林郭勒盟统计年鉴(2016 年), 锡盟城镇化率不断提高, 2015 年达到 63%; 此外, 锡盟是以煤炭开采为基础的资源型地区, 2000、2010 和 2015 年工矿用地面积分别为 171.43、289.17、323.58 km<sup>2</sup>, 2000—2010 年面积增加 117.74 km<sup>2</sup>, 增长速率为 68.68%; 2010—2015 年面积增加 34.41 km<sup>2</sup>, 增长速率为 11.90%。因此, 合理保障工业用地和城镇用地规模, 促进生态用地与建设用地协调开发, 将有助于保障区域生态健康发展。

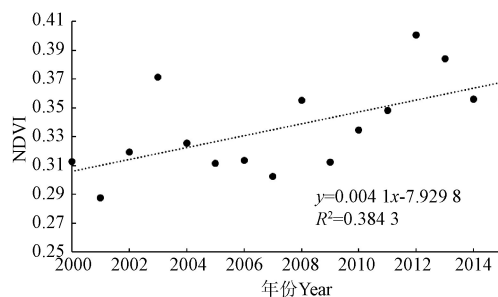


图 8 锡林郭勒盟 2000—2015 年植被 NDVI 变化  
Fig.8 Changes of vegetation NDVI in Xilin Gol League during 2000—2015

锡盟生态安全重心向东北迁移主要是由生态响应增强所致, 而非生态压力减小。因此, 在进行生态调控时, 应当按照“一区一策”原则, 采用生态安全与社会协调发展的调控模式; 依托现有生态保护与建设工程, 构建以生态安全预警、调控、管理等为导向的生态安全决策支持系统。

研究虽取得了一些结果, 尚存在以下改进之处: 1) 虽然分析了生态安全的时空变化态势, 但并未进行详细的驱动力分析, 后续将全面刻画生态安全驱动机制, 进一步明确各驱动因子的贡献率及作用方向, 为区域生态安全提供技术支撑。2) 后续可进一步划分调控小区, 明确生态空间定位及调控目标和调控措施, 合理利用生态资源, 增强区域社会发展的生态支撑力。

## 5 结 论

1) 2000—2015 年, 锡盟以一般安全为主, 近年来生态安全值缓慢上升。区域生态安全空间分布差异显著, 表现出“东北高西南低”的特征; 高度安全区基本稳定在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗, 且呈现集聚状态, 这主要归因于国家生态保护与恢复工程的实施有效促进了区域生态安全水平提高。

2) 生态安全重心向东北方向迁移, 集中于西乌珠穆沁旗境内; 不安全重心主要在西南方向, 集中在苏尼特左旗和阿巴嘎旗境内。锡盟东北区域生态安全状态良好, 西南区域生态安全局势较为严峻, 应当依据当地的生态承载力, 开展生态保护规划研究, 减轻人为干扰, 改善和调控生态环境, 进一步保护草原生态环境。

3) 锡盟生态安全调控对策和途径以生态分区为基础, 根据每个分区的生态特征和生态承载力大小, 制定一区一策措施。6 个分区分别为核心保育区、生态管护区、传统利用区、生态恢复区、退耕还林还草区、沙源治理区, 应当严格执行各区生态保护措施, 合理利用资源, 促进区域生态安全。

#### [参 考 文 献]

- [1] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3382—3392.  
Ye Xin, Zou Changxin, Liu Guohua, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3382—3392. (in Chinese with English abstract)
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. Science, 2015, 348: 1217—1217.
- [3] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407—419.  
Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407—419. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建: 以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250—258.  
Yang Shanshan, Zou Changxin, Shen Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: A case study of Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 250—258. (in Chinese with English abstract)
- [5] Yang Qing, Liu Gengyuan, Hao Yan, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through energy-ecological footprint hybrid indicators[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 678—695.
- [6] Li Zhaotian, Yuan Mengjiao, Hu Mengmeng, et al. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMALTE model: A case study of the Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 595—602.
- [7] Burger J, Gochfeld M, Kosson D S, et al. Evaluation of ecological resources at operating facilities at contaminated sites: The Department of Energy's Hanford Site as a case study[J]. Environmental Research, 2019, 170: 452—462.
- [8] Lu Shasha, Li Junpu, Guan Xingliang, et al. The evaluation of forestry ecological security in China: Developing a decision support system[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 664—678.
- [9] Bouma J. Land quality indicators of sustainable land management across scales[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 88(2): 129—136.
- [10] Vasu D, Srivastava R, Patil N G, et al. A comparative assessment of land suitability evaluation methods for agricultural land use planning at village level[J]. Land Use Policy, 2018, 79: 146—163.
- [11] Li Qian, Yu Yang, Jiang Xiaoqian, et al. Multifactor-based environmental risk assessment for sustainable land-use planning in Shenzhen, China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 657: 1051—1063.
- [12] Sheng Huaxia, Xu Hongni, Zhang Luoping, et al. Ecosystem intrinsic value and its application in decision-making for sustainable development[J]. Journal for Nature Conservation, 2019, 49: 27—36.
- [13] Kaenchan P, Guinée J, Gheewala S H. Assessment of ecosystem productivity damage due to land use[J]. Science of The Total Environment, 2018, 621: 1320—1329.
- [14] Newton A, Brito A C, Icely J D, et al. Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons[J]. Journal for Nature Conservation, 2018, 44: 50—65.
- [15] Raphael S, Aude J, Aurélien B. An integrative approach to assess ecological risks of surface water contamination for fish populations[J]. Environmental Pollution, 2017, 220: 588—596.
- [16] Chu Xi, Deng Xiangzheng, Jin Gui, et al. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2017, 101: 43—51.
- [17] Herrick J E, Shaver P, Pyke D A, et al. A strategy for defining the reference for land health and degradation assessments[J]. Ecological Indicators, 2019, 97: 225—230.
- [18] 王石英, 蔡强国, 吴淑安. 首都圈上风向农牧交错带的土地利用评价[J]. 资源科学, 2004(26): 67—73.  
Wang Shiyang, Cai Qiangguo, Wu Shuan. GIS-Based land-use evaluation for dust storm prevention in the windward metropolitan region of Beijing, China[J]. Resource Science, 2004(26): 67—73. (in Chinese with English abstract)
- [19] 裴欢, 魏勇, 王晓妍, 等. 耕地景观生态安全评价方法及其应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 212—219.  
Pei Huan, Wei Yong, Wang Xiaoyan, et al. Method of cultivated land landscape ecological security evaluation and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 212—219. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057—1063.  
Zhang Kun, Lin Naifeng, Xu Delin, et al. Research advance on ecological security in China: Assessment models and management measures[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1057—1063. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周迎雪, 李贻学, 孙仪阳, 等. 基于不同评价模型的土地生态安全评价: 以山东半岛蓝色经济区为例[J]. 中国人

- 口·资源与环境, 2016, 26(11): 207—210.
- Zhou Yingxue, Li Yixue, Sun Yiyang, et al. Evaluation of land eco-security based on different evaluation model: A case in Shandong Peninsula Blue Economic Zone[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(11): 207—210. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王世金, 魏彦强. 生态安全阈值研究述评与展望[J]. 草业学报, 2017, 26(1): 195—205.
- Wang Shijin, Wei Yanqiang. Overview and prospects for ecological safety threshold research[J]. Acta Prataculture Sinica, 2017, 26(1): 195—205. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王永杰, 张雪萍. 生态阈值理论的初步探究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 282—286.
- Wang Yongjie, Zhang Xueping. Pilot study of the theory of ecological threshold[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(12): 282—286. (in Chinese with English abstract)
- [24] 贺丽娜, 康慕谊, 徐广才. 锡林郭勒盟生态经济类型区划分及可持续发展研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(3): 307—313.
- He Lina, Kang Muyi, Xu Guangcai. Integrated eco-economic regionalization and sustainable development in Xinlinguole League[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(3): 307—313. (in Chinese with English abstract)
- [25] 康虎彪, 刘传庚, 谭玲玲, 等. 能源产业基地综合环境承载力评价研究: 以内蒙古锡林郭勒盟煤炭资源开发为例[J]. 中国能源, 2010, 32(3): 26—29.
- Kang Hubiao, Liu Chuangeng, Tan Lingling, et al. Evaluation of the comprehensive environmental carrying capacity of the energy industry base: A case study in Xinlinguole League, Inner Mongolia[J]. China Energy, 2010, 32(3): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [26] 根少子, 阿拉腾图雅. 锡林郭勒盟生态安全评价研究[J]. 内蒙古林业科技, 2011, 37(1): 45—49.
- Gen Shaozi, Alatengtuya. Ecological security evaluation of Xilinguole League[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2011, 37(1): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [27] 魏东, 全元, 王辰星, 等. 国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究: 以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2821—2829.
- Wei Dong, Quan Yuan, Wang Chenxing, et al. The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: A case study in Xilingol League, Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2821—2829. (in Chinese with English abstract)
- [28] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6755—6766.
- Meng Jijun, Zhu Likai, Yang Qian, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6755—6766. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王琦, 付梦娣, 魏来, 等. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建: 以安徽省宁国市为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4546—4554.
- Wang Qi, Fu Mengdi, Wei Lai, et al. Urban ecological security pattern based on source-sink landscape theory and MCR model: A case study of Ningguo City, Anhui Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4546—4554. (in Chinese with English abstract)
- [30] 潘竞虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化: 以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3126—3136.
- Pan Jinghu, Liu Xiao. Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: A case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126—3136. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李晶, 蒙古军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建: 以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 706—715.
- Li Jing, Meng Jijun, Mao Xiyan. MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(4): 706—715. (in Chinese with English abstract)
- [32] 董玉红, 刘世梁, 安楠楠, 等. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1860—1871.
- Dong Yuhong, Liu Shiliang, An Nannan, et al. Landscape pattern in Da'an City of Jilin province based on landscape indices and local spatial autocorrelation analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1860—1871. (in Chinese with English abstract)
- [33] 邢学勤, 董春. 辽宁省城市竞争力重心时空迁移分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 110—115.
- Xin Xueqin, Dong Chun. Analysis of spatial and temporal migration of urban competitiveness in Liaoning province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 110—115. (in Chinese with English abstract)
- [34] 郭碧云, 张正峰. 农牧交错区土地利用重心迁移研究: 以河北省沽源县为例[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 217—221.
- Guo Biyun, Zhang Zhengfeng. Migration of land-use barycenters in farming-pastoral areas: A case study of Guyuan County, Hebei Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 217—221. (in Chinese with English abstract)
- [35] 缪丽娟, 徐霞, 兰玉芳, 等. 退牧还林(草)工程对中国北方农牧交错带人文环境影响评价: 以太仆寺旗为例[J]. 北京师范大学学报, 2013, 49(1): 46—50.
- Miao Lijuan, Xu Xia, Lan Yufang, et al. Assessing Grain-for-green impact on human environment in the farming-pastoral zone of Taipusiqi[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49(1): 46—50. (in Chinese with English abstract)

- [36] 李兴华, 魏玉荣, 张存厚. 内蒙古草地面积的变化及其成因分析:以锡林郭勒盟多伦县为例[J]. 草业科学, 2012, 29(1): 19—24.  
Li Xinghua, Wei Yurong, Zhang Cunhou. Variation of grassland area and its cause in Inner Mongolia: A case study on Duolun county of Xinlin Gol League[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(1): 19—24. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000—2010 年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1194—1204.  
Hang Yuling, Bao Gang, Bao Yuhai, et al. Spatio-temporal changes of vegetation coverage in Xilin Gol grassland and its responses to climate change during 2000—2010[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(6): 1194—1204. (in Chinese with English abstract)

## Ecological security evaluation and ecological regulation approach in Xilin Gol League

Shi Nana, Xiao Nengwen, Wang Qi, Han Yu, Gao Xiaoqi, Quan Zhanjun\*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Ecological Processes and Functions Assessment,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In the concept framework of natural ecology and human disturbance, ecological security evaluation model in XilinGol League was constructed to analyze the spatial and temporal evolution pattern of ecological security during 2000—2015. The spatial agglomeration state was analyzed by local spatial autocorrelation, and then the trajectory of the ecological security center was tracked by the gravity center migration model. Finally, ecological regulation was put forward. The results showed that: 1) the spatial distribution of ecological security is significantly different, and the northeast is high, and southwest is low. They presents a trend of spatial agglomeration; the high-high value area is adjacent to the low-low value area; 2) the ecological security value is rising, and the ecological security is improved, but the general security area is still widely distributed; 3) the center of ecological security is mainly located in Xiuzhumuqin Banner, and it moved northeast. the center of insecurity is moving southwest to Abaga Banner; 4) Land use is the main driving force for the change of ecological security. It is suggested to carry out regional ecological regulation, implement “one region one policy” and implement a new mode of ecological protection and social coordinated development. The overall ecological security situation in Xilin Gol League has improved and partially deteriorated. National policies have directive impacts on regional ecological protection and development. Although some achievements have been made in ecological protection, the intensity of ecological protection is far from enough because of the strong interference of human activities. The effect of ecological protection and restoration projects such as returning farmland to forests and natural forest protection implemented by the state has gradually emerged, which is an important driving force affecting the ecological security of Xilin Gol League. For example, NDVI showed an overall growth trend from 2000 to 2015, especially since 2010, the NDVI growth trend was obvious, which promoted ecosystem recovery to a certain extent. Therefore, we should take ecological restoration as an opportunity to accelerate the restoration of natural ecosystems, enhance ecosystem services and build regional ecological security pattern. The shift of the focus on ecological security to the northeast is mainly due to the enhancement of ecological response, rather than the decrease of ecological pressure. Therefore, when carrying out ecological regulation, we should adopt the regulation mode of coordinated development of ecological security and society in accordance with the principle of “one region, one policy”; relying on existing ecological protection and construction projects, we should build an ecological security decision support system oriented by early warning, regulation and management of ecological security. In the follow-up, we can further divide the control zones, clarify the ecological spatial orientation, control objectives and control measures, make rational use of ecological resources, and enhance the ecological support of regional social development. Land use is one of the main driving forces for spatio-temporal change of ecological security. The urbanization rate of Xilin Gol League has been continuously increasing, reaching 63% in 2015. In addition, Xilin Gol League is a resource-based area based on coal mining. In 2000—2010, the area of industrial and mining land increased by 117.74 km<sup>2</sup>, 68.68%, respectively. During 2010—2015, the area increased by 34.41 km<sup>2</sup>, with an increase rate of 11.90%. Based on the ecological zoning, according to the ecological characteristics and ecological carrying capacity of each zoning, ecological security control countermeasures and approaches are formulated in XilinGol League. The six zones are core conservation area, and the ecological protection measures should be strictly implemented in all zones to make rational use of resources and promote regional ecological security.

**Keywords:** land use; ecology; ecological security; spatial autocorrelation; gravity centers migration; Xilin Gol League