

# Research on the Evolution of Ecosystem Structure and Functional Layout within Nature Reserve of Helan Mountain in Ningxia Based on Remote Sensing Indices

Wenlong Wang<sup>1,2</sup> Xueru Yang<sup>1,2</sup> Tingting Yan<sup>1,2</sup> Caiyong Wei<sup>1,2</sup> Qiaomin Li<sup>1,2</sup>

1. Ningxia Institute of Remote Sensing Survey, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

2. Ningxia Data and Application Center for High-resolution Earth Observation System, Yinchuan, Ningxia, 750021, China

## Abstract

This paper takes Nature Reserve of Helan Mountain in Ningxia as the research object and selects three remote sensing indices, namely Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Net Primary Productivity (NPP), and Above-ground biomass (AGB), to conduct a spatio-temporal analysis of its ecosystem structure and function from 2000 to 2023. The results show that: Between 2000 and 2023, affected by complex topography and landforms as well as precipitation and other climatic conditions, the NDVI, NPP, and AGB in the Helan Mountain area show an overall fluctuating upward trend, with a distribution pattern of relatively intact functional ecosystems in the southwest and slightly weaker structural and functional ecosystems in the northeast. This indicates that ecological restoration and management have had significant effects, from 2015 to 2023, after the implementation of various ecological protection policies, the values of all indicators steadily increased and the structural and functional characteristics of the ecosystem are generally improving. At the same time, it highlights that the ecological environment of the Helan Mountain Nature Reserve in Ningxia is extremely fragile, and the work of ecological protection still has a long way to go.

## Keywords

Nature Reserve of Helan Mountain; ecosystem structure function; NDVI; NPP; AGB

# 基于遥感指数的宁夏贺兰山自然保护区生态系统结构功能布局演变研究

王文龙<sup>1,2</sup> 杨雪茹<sup>1,2</sup> 闫亭廷<sup>1,2</sup> 魏采用<sup>1,2</sup> 李樵民<sup>1,2</sup>

1. 宁夏回族自治区遥感调查院, 中国·宁夏 银川 750021

2. 高分辨率对地观测系统宁夏数据与应用中心, 中国·宁夏 银川 750021

## 摘要

本文以宁夏贺兰山自然保护区为研究对象, 选取了归一化植被指数、净初级生产力和地上生物量3个遥感指数, 对其2000-2023年生态系统结构功能进行时空分析。结果表明: 从2000年至2023年, 受复杂地形地貌和降水量等气候条件影响, 贺兰山地区的NDVI、NPP和AGB整体上呈波动上升趋势, 具有西南地区功能性较为完整-北东地区生态系统结构功能略弱的分布格局, 2015-2023年, 生态保护各项政策实施后, 各项指标值稳步上升, 说明生态恢复治理效果显著, 生态系统结构功能总体向好。同时, 说明宁夏贺兰山自然保护区生态极端脆弱, 生态保护工作任重道远。

## 关键词

贺兰山自然保护区, 生态系统结构功能, 归一化植被指数, 净初级生产力, 地上生物量

**【基金项目】**宁夏重点研发计划项目《基于北斗的贺兰山生物多样性智能监测预警与保护修复关键技术研究与示范》(项目编号: 2021BEG02007); 宁夏矿区生态修复效果遥感精准监测关键技术研究与应用(项目编号: 2022BEG03063); 宁夏自然科学基金《基于多时空遥感的宁夏六盘山山前典型滑坡孕灾特征研究》(项目编号: 2023AAC03474)。

**【作者简介】**王文龙(1986-), 男, 中国山西大同人, 硕士, 高级工程师, 从事遥感测绘、地理信息系统等研究。

## 1 引言

生态系统结构功能研究对于识别关键物种和关键生态过程、指导生态保护与修复、促进可持续发展等方面都具有重要的意义。然而, 传统的监测方法主要依赖于地面调查, 侧重于特定物种或局部样地的分析, 往往效率低下, 难以满足不同尺度上的生态系统保护与结构功能评估需求。近年来, 遥感技术作为一种获取地表生物信息的新途径, 其广泛覆盖、连续监测和可重复性等特性, 赋予了其在大规模生态系统结构功能监测中显著的优势。

宁夏贺兰山作为内蒙古高原与宁夏平原的天然分界,具有显著的生态屏障功能,是干旱-半干旱过渡带的典型区域,其生态系统对防风固沙、水源涵养及生物多样性保护至关重要。国内学者对宁夏贺兰山自然保护区开展的生态遥感监测的研究<sup>[1-4]</sup>较少,且选择指标单一,也不能满足长时序监测的需求。本文基于遥感生态指数(RSEI)<sup>[5]</sup>和中国生物多样性核心监测指标遥感产品体系(EBVs)<sup>[6]</sup>,结合贺兰山森林生态系统的特征,选取了归一化植被指数(NDVI)、净初级生产力(NPP)、地上生物量(AGB)3个指标,对研究区开展23a间生态系统结构功能优劣演变研究,为自然保护区生态保护工作提供科学依据。

## 2 研究区概况

宁夏贺兰山国家级自然保护区位于宁夏回族自治区与内蒙古自治区交界处,为森林生态系统型自然保护区,地跨银川市永宁县、西夏区、贺兰县,石嘴山市平罗县、大武口区、惠农区,占地面积193536.32公顷。气候类型属于温带大陆性气候,年均气温5℃-8℃,年降水量150-400mm,年蒸发量高达2000mm,70%以上降水集中于6-9月,降水呈现“东多西少”的显著差异;土壤类型主要为灰钙土和风沙土,还分布有山地灰褐土和高原草甸土。植被类型主要包括山地草原带、山地疏林草原带、针叶林带、高山丛林草甸带。

## 3 数据源及预处理

### 3.1 数据源

本研究采用的影像数据为2000年8月、2005年7月、2010年8月、2015年9月、2020年9月、2023年7月的Landsat 8 OLI;平均气温、湿度等气象数据来源于地球资源数据云平台;植被类型数据来源于中国基础地理信息中心;土地利用地表覆盖数据通过遥感解译获取;基础地理和地形数据主要来源于地理空间数据云。

### 3.2 预处理过程

使用ARCGIS10.8将气象、植被类型、土地利用等资料处理为统一的坐标系和投影,使用ENVI5.3对遥感影像进行辐射校正、大气校正、几何校正、地形校正、镶嵌等处理。野外观测数据主要来源于贺兰山响水沟区域开展的生态系统类型及其土地分类调查和植被分布特征调查结果。

## 4 生态系统结构功能遥感参数选取

### 4.1 归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)

归一化植被指数是一种用于定量评估植被覆盖度和活性的遥感指标。它通过测量植被在红光和近红外波段的反射率差异,来反映植被的生长状况和生物量,用于评估生态系统的健康状况。NDVI值越大,代表生态系统越健康。归一化植被指数具体计算方法如下:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中:NDVI所计算的归一化植被指数;

NIR代表近红外波段;

R代表红光波段。

### 4.2 净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)

净初级生产力是指单位时间内绿色植物通过光合作用所固定的总能量减去呼吸作用所消耗的能量后剩余的部分,主要反映了植物在特定环境条件下的生产效率和生长状况,用于评估生态系统内能量的输入和输出状况,以及生态系统的能量流动状况和稳定性。NPP值越大,代表生态系统功能和稳定性越好。本研究通过CASA模型来计算净初级生产力,具体的计算方法如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t)$$

式中:NPP—净初级生产力;APAR—植被所吸收的光合有效辐射; $\epsilon$ —光能转化率; $t$ —时间; $x$ —空间位置。

### 4.3 地上生物量(Above-ground biomass, AGB)

地上生物量是生态系统结构功能的主要组成部分,指某一时刻单位面积内所有地上活体植被的干重总和,AGB作为植被地上部分生物质积累情况的指标,直接反映生态系统的结构状况、生产力水平,用于评估生态系统的结构完整性和稳定性。AGB值越大,代表生态系统结构完整性越好。地上生物量的估算基于遥感数据和随机森林(RF)模型,估算公式为:

$$AGB = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

其中, $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示输入特征, $f$ 表示机器学习模型的预测函数。

### 4.4 归一化处理

为了便于比较,本文采用极差法对各个数据源及计算过程中产生的中间数据进行归一化处理,消除数据间的量纲差异,确保栅格图具有相同的大小宽度以及经纬度四至坐标范围,便于多个指标直接的综合分析。归一化处理算法如下:

$$X_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

其中, $X_{\min}$ 为栅格数据最小值, $X_{\max}$ 为栅格数据最大值, $X_i$ 为栅格数据第*i*个像素值。

## 5 结论

### 5.1 野外实地调查结果

调查发现,研究区具有独特的植被垂直带谱。荒漠草原带(1,500-1,800米),主要分布沙蒿、红砂、短花针茅、沙生针茅、猫头刺等旱生植物。山地灌丛草原带(1,800-2,200米),以蒙古扁桃、小叶锦鸡儿等灌丛为主,混生冰草、蒿类等草本植物。山地森林草原带(2,200-2,800米),集中分布青海云杉纯林、油松林和山杨林混交,伴生虎榛子等灌木。亚高山灌丛草甸带(2,800-3,200米),以鬼箭锦鸡儿、

高山柳、苔草、蒿草草甸为主。高山流石滩稀疏植被带(>3,200 米)，零星分布雪灵芝、红景天等耐寒植物。

### 5.2 NDVI、NPP、AGB 计算结果

表 1 生态系统结构功能指标均值表

年份	生态系统结构功能指标均值		
	NDVI	NPP (克碳/平方米/年)	AGB (Mg/ha, 干重)
2000 年	0.20	76.16	43.22
2005 年	0.232	82.58	47.24
2010 年	0.25	102.107	49.94
2015 年	0.23	99.77	48.16
2020 年	0.35	109.68	54.67
2023 年	0.47	110.7	56.35

从表 1、图 1 可以看出,研究区从 2000 年至 2023 年期间, NDVI 指数具有较强的空间分异性, 呈现出先缓慢后急速上升的变化趋势。空间分布上, 北东方向主要为低覆盖植被, 反映出研究区北东部生态系统的功能状况较差, 而西南方向主要为中等以上覆盖植被, 说明研究区西南部生态系统健康程度较高; 从时间序列来看, 2000 年 -2015 年, NDVI 值逐年上升但变化平稳, 呈现出先升后降的趋势, 2015 年北东部下降明显, 说明植被覆盖面积急剧减少, 而 2015 年 -2023

年, 随着废弃矿山生态修复、划定生态红线等政策的落实, 地表植被覆盖面积逐渐增加, 生物多样性程度进一步提升。

从表 1、图 2 可以看出, 研究区从 2000 年至 2023 年期间, NPP 指数呈现出波动上升的变化规律。空间分布规律与 NDVI 相符合, 说明研究区西南部较北东部能够支持丰富的生物多样性, 生态系统更健康; 从时间序列来看, 2000 年 -2015 年, NPP 值呈现先升后降的变化趋势, 2015 年北东部波动明显, 而西南部变化趋势较缓, 说明受外界因素影响不大; 2015 年 -2023 年, NPP 值呈现缓慢上升趋势, 说明西南部植物群落的多样性和生产力稳定性逐年提升, 维持生态系统功能多样性力度更强。

从表 1、图 3 可以看出, 研究区从 2000 年至 2023 年期间, AGB 指数呈现出缓慢上升趋势。空间分布上, 贺兰山地区北东方向植被稀疏, 地上生物量较少, 而西南方向的高山草地和草原生态较为健康, 能够提供更好的土壤保持、水源涵养、生物栖息地等生态系统服务, 有利于维持生态系统服务功能; 从时间序列来看, 2000 年 -2015 年, AGB 值呈现先升后降的波动趋势, 2015 年北东部地上生物量减少明显, 2015 年 -2023 年, AGB 值呈现缓慢上升的变化趋势, 但西南部变化趋势不明显, 说明西南部具有较丰富的物种多样性和较强的生态系统的稳定性。

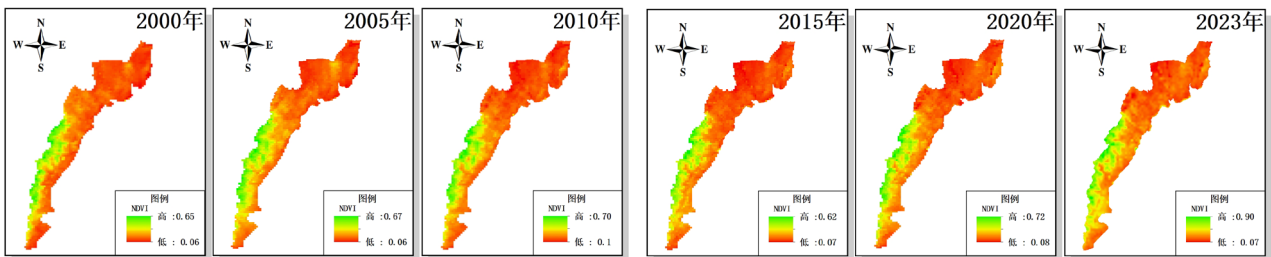


图 1 贺兰山区域 NDVI 分布图

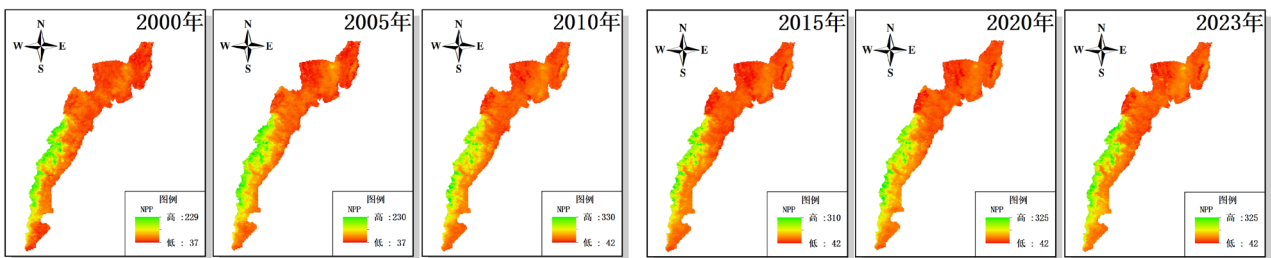


图 2 贺兰山区域 NPP 分布图

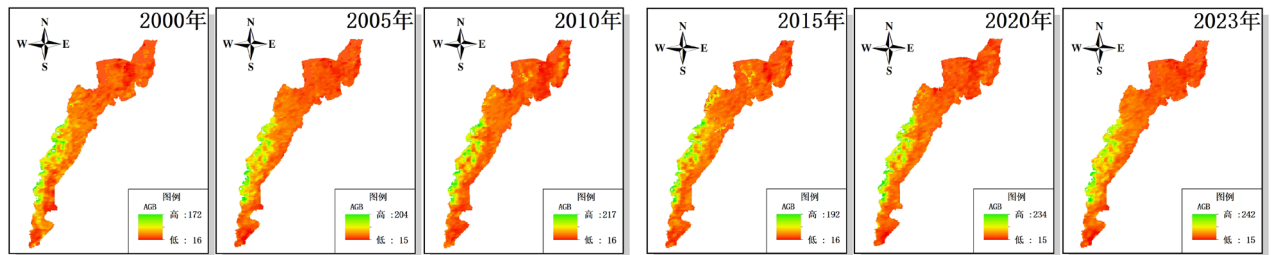


图 3 贺兰山区域 AGB 分布图

综上所述,从2000年至2023年,贺兰山地区的NDVI、NPP和AGB整体上呈波动上升趋势,具有西南地区功能性较为完整-北东地区生态系统结构功能略弱的分布格局,说明生态恢复治理效果显著,生态系统结构功能总体向好。

1. 空间分布特征。贺兰山地区西南地区受复杂地形地貌和降水量等气候条件影响,植被覆盖度高、生产力强、生物量丰富,能够提供多种生态服务,生态系统结构功能较为完整,植被的多样性和生态系统的稳定性较高;而北东地区受采矿、过度放牧等人为干扰和平坦地形地貌影响,植被覆盖度低、生产力强、生物量少,生态系统功能较为略弱。

2. 时间变化趋势。2000年-2015年,受气候变化与早期开发影响,北东部生态系统结构功能变化较明显,说明研究区不同类型植被均对生态系统结构功能直接响应,2015-2023年,生态保护各项政策实施后,各项指标值稳步上升,印证了保护措施的有效性。同时,说明宁夏贺兰山自然保护区生态极端脆弱,生态保护工作任重道远。

## 6 讨论与结论

1. 本文采用了NDVI、NPP和AGB3个遥感指标综合评估贺兰山生态系统结构功能,研究结果与前人研究结果一致,说明指标选择有效可靠,能够从不同角度和层面反映研究对象的特征,本次研究结果准确可信,可为贺兰山地区生态系统功能有关研究提供数据支持。

2. 宁夏贺兰山自然保护区作为国家级自然保护区,在采取废弃矿山生态修复与治理、封山育林、划定生态红线等相关保护措施后,主要影响生态系统结构功能的因素为降水

量、气温、地形、高程等,今后应持续关注该地区生态系统结构稳定性,进一步研究抵御外界干扰的因素和恢复力,探索提出针对性的生态环境质量提高措施。

3. 生物多样性是生态系统健康的重要指标,NDVI、NPP、AGB与生物多样性之间存在复杂的关系,NDVI、NPP和AGB的增加可能会促进区域生物多样性的提升,受到遥感估算结果准确性和气候等其他因素的影响,对于NDVI、NPP、AGB值和物种多样性之间的关系模式,还有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] 林妍敏,南雄雄,胡志瑞,等.西北典型生态脆弱区植被覆盖度时空变化及其生态安全评价:以宁夏贺兰山为例[J].生态与农村环境学报,2022,38(05):599-608.
- [2] 李婷婷,马超,郭增长.2004-2015年贺兰山自然保护区植被NPP时空变化与气候响应[J].水土保持研究,2020,27(06):254-261.
- [3] 周梦云,蔡永立,张瑞峰,等.宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化研究[J].生态科学,2019,38(05):78-85.
- [4] He Y, Chen Y, Zhong L, et al. Spatiotemporal evolution of ecological environment quality and its drivers in the Helan Mountain, China [J]. Journal of Arid Land, 2025, 17 (2): 224-244.
- [5] 陈宜欣,宁晓刚,张翰超等.遥感生态指数(RSEI)模型及应用综述.自然资源遥感,2024,36(3):28-40.
- [6] 任涓,陶胜利,胡天宇等.中国生物多样性核心监测指标遥感产品体系构建与思考.生物多样性,2022,30(10):22530.