引文格式：马踏泉,刘睿,李政. 自然保护区监测预警指标体系构建与应用研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 54-58. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.12.012

自然保护区监测预警指标体系构建与应用研究

马踏泉[1,2]，刘　睿[1,2*]，李　政[3]
（1. 重庆师范大学 地理与旅游学院，重庆 401331；2. 国家地球系统科学数据中心，北京 100101；
3. 重庆市地理信息和遥感应用中心，重庆 401121）

摘　要：开展自然保护区监测预警对于维护区域生态安全意义重大。研究从人类活动和生态系统2个方面选取指标，建立综合监测预警指标体系，并在大巴山国家级自然保护区开展成果应用。结果表明：①大巴山自然保护区现状人类活动总体较少，主要以农业开发、交通开发、居民点与其他活动等类型为主，呈逐年减少趋势，但交通开发存在不同程度的新增，表现为“黄色预警”状态；②现状生态系统健康水平较高，呈逐年趋好态势，但空间分异明显，表现为“绿色预警”状态；③综合人类活动“黄色预警”和生态系统健康“绿色预警”状态，采取“最低原则”，判定综合预警级别为中警，警情信号为黄色。

关键词：自然保护区；监测预警指标体系；人类活动；生态系统；大巴山
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0054-05

Research on the Construction and Application of Monitoring and Early Warning Index SysteminNature Reserve

MA Taquan[1,2], LIURui[1,2], LI Zheng[3]
(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331,China;
2. National Earth System Science Data Center, Beijing 100101, China;
3. Chongqing Geographic Information and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401121, China)

Abstract: Carrying out monitoring and early warning of nature reserves is of great significance for maintaining regional ecological security. We selectedindexes from human activities and ecosystem, established a comprehensive monitoring and early warning index system, and applied the results in Daba Mountain National Nature Reserve. The results show that①the current human activities in Daba Mountain Nature Reserve are generally less, mainly focus on agricultural development, traffic development, residential areas and other activities, showing a decreasing trend year by yearwhile traffic development has increased to various degrees, showing a “yellow alert” state. ②The current level of ecosystem health is relatively high, showing a trend of improvement year by year, but with significant spatial differentiation, manifested as a “green warning” state. ③On the basis of these, we adopted the “minimum principle” to determine the comprehensive warning level. The comprehensive warning level is determined to be medium alarm, and the warning signal is yellow.

Key words: nature reserves, monitoring and early warning index system, human activities, ecosystem, Daba Mountain

近年来，国家非常重视对于保护区内部人类活动和生态状况的监测与反馈，部分学者尝试选取人类活动指标，监测人类活动的构成和数量，但大多从科研角度出发，也忽视了对生态系统系统健康水平的监测，研究结果对管理决策的支撑作用较小。因此，如何利用现代遥感技术，克服“碎片化”、“孤岛化”等现实困境，定量研究自然保护区内人类干扰和生态系统健康现状、变化和规律，做到事前发现，立即扼杀；事中处理，化解矛盾。并逐步形成常态化的监测预警机制，成为研究热点。

本研究以服务政府管理决策为目标，基于自然保护区管控要求设立人类活动干扰约束性指标，重点监测保护区内部人类活动干扰程度大小和变化趋势；将偏自然的系统内部“压力-活力-组织-弹性”理论与表征“人地相互关系”的PSR模型有机结合，重视自然保护区内部生态斑块的“质量”“数量”和“格局”，测度生态系统健康水平，揭示保护区内部生物流和生物多样性状态[5]。自然保护区监测预警指标体系的构建，可以帮助决策者掌握自然保护区人类活动干扰及其生态系统健康状态、分布与

收稿日期：2023-06-16。
项目来源：重庆市自然科学基金面上项目（cstc2020jcyj-msxmX0521）。
第一作者简介：马踏泉（1998—），硕士研究生，研究方向为生态系统服务可持续发展，E-mail：mataquan1998@163.com。
通信作者：刘睿（1983—），博士，教授，研究方向为地理时空大数据挖掘，E-mail：liur@cqnu.edu.cn。

动态变化，及时评估和预警生态风险，是微观生态本底与宏观生态系统的有机结合，也是落实自然保护区管控的关键举措。

1　监测预警指标体系的构建

1.1　人类活动监测预警指标

1.1.1　人类活动清单编制

本研究依据《关于做好自然保护区范围及功能优化调整前期有关工作的函》等自然保护区管控规则，参考中华人民共和国生态环境标准《自然保护地人类活动遥感监测技术规范》（HJ 1156–2021），将人类活动类型、定义与《第三次全国国土调查技术规程》（TD/D 1055–2019）充分衔接，形成新的分类和定义。自然保护区内部人类活动危害性优先顺序为：矿产资源开发>工业开发>旅游开发>能源开发>交通开发>养殖开发>农业开发>居民点与其他活动[6]。

1.1.2　人类活动变化监测

人类活动变化监测是以人类活动清单为依据，以行业调查数据和高分辨率遥感数据为基础，对覆盖自然保护区的区域进行排查和判读，对比分析监测期前后地物情况，核实人类活动变化图斑类型，从而揭示监测区域人类活动范围新增、不变、减少的情况。变化类型中，危害性优先顺序为：新增>不变>减少。同时采用人类活动数量变化幅度[2]，评价自然保护区内部人类活动变化强度，具体公式如下：

$$IHAC=(A_i-B_i)/B_i \tag{1}$$

式中，IHAC 变量为保护区人类活动变化强度指数；A_i 变量为2020年保护区第 i 个乡镇的人类活动数量；B_i 变量为2019年保护区第 i 个乡镇的人类活动数量。依据该指数，保护区变化强度划分为明显（IHAC > 10%）、较明显（5% < IHAC ≤ 10%）、较小（IHAC ≤ 5%）和无变化（IHAC = 0%）4个级别[2]。

1.2　生态系统健康监测预警指标

1.2.1　生态系统健康指标体系的构建

自然保护区生态系统是自然资源、人类社会活动以及制度约束之间相互影响、紧密联系形成的复杂系统[7]。研究将表征“人地相互关系”的压力–状态–响应（PSR）模型与反映生态系统内部自身环境状态的“活力–组织–弹性”理论相结合，遵从指标选取的科学性、代表性以及稳定性等原则，参照相关学者的研究成果[5,7]，结合数据的可获得性，选取9个因子构建自然保护区生态系统健康水平评价指标体系。其中，“压力”指标用来描述人类活动对保护区造成的压力，说明引起保护区生态变化的人类活动范围与强度。“状态”指标用来描述保护区自身面对上述“压力”所呈现出的状况，本研究综合考虑生态系统自身对环境变化的适应与自我恢复能力，重视保护区内部生态斑块的质量、数量以及格局。其中，“活力”指新陈代谢能力，用NDVI来表征；“组织”指景观要素的整体稳定性及局部之间的互通性，用景观多样性指数、斑块丰富度、平均斑块面积和景观破碎度表征；“弹性”指保护区在受到外界破坏的情况下自我调节、自我恢复的能力，用生态弹性度表征。“响应”指标是用来描述社会、舆论对与人类活动造成的生态环境状况压力所表现出的状态做出的反应，包括政策与措施的实施力度及效果，用自然保护区核心区面积来表示[8–10]。

1.2.2　部分指标的计算

以土地利用产品和遥感产品为基础，利用科学的方法对各指标进行计算，人口密度由收集到的各乡镇人口统计数据面积加权获得，状态项目层中的景观多样性指数、斑块丰富度、平均斑块面积、景观破碎度由Fragstats4.2软件平台计算生成，其他重要指标情况如下：

1）人类干扰强度。人类干扰强度是人类活动对生态环境所施加的压力，指数越大则人类活动影响强度越大；反之，越小[8]。人类干扰强度指数（HIS）计算公式如下：

$$HIS=\frac{\sum S_c+S_a+S_r}{S}\times 100\% \tag{2}$$

式中，HIS 为人类干扰强度；S_c、S_a、S_r 分别为建设用地、农业用地、道路用地的面积；S 为自然保护区总面积。

2）归一化植被指数。归一化植被指数即Normalized Difference Vegetation Index，简称NDVI，是气候、环境等多种因素综合作用的结果，表征区域植被生长状态，能很好的揭示自然保护区植被状态[7]，其计算公式为：

$$DNVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \tag{3}$$

式中，DNVI 为归一化植被指数；R 为红光波段的反射值；NIR 为红外波段的反射值。

3）生态弹性度。生态弹性度指生态环境系统的可变化余地大小，是自我维持、自我调节及其抵抗各种压力与扰动的能力大小[9]，其（EEI）指数计算公式为：

$$EEI=\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{S_i\times F_i}{S}\right| \tag{4}$$

式中，EEI为生态弹性度指数；S_i为i类土地利用类型的面积；F_i为i类土地利用的弹性分值，依据土地利用类型对生态环境的作用大小赋值；S为自然保护区总面积。

1.2.3 指标标准化处理

自然保护区不同的生态健康评价指标量纲将会对评价结果产生很大的影响，因此在评价之前应该对格网数据进行标准化处理[7]。

$$\text{正项指标：}\ X_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{j\min}}{x_{j\max}-x_{j\min}}\ (i=1,2,3,\cdots,n;\ j=1,2,3,\cdots,m) \tag{5}$$

$$\text{负项指标：}\ X_{ij}=\frac{x_{j\max}-x_{ij}}{x_{j\max}-x_{j\min}}\ (i=1,2,3,\cdots,n;\ j=1,2,3,\cdots,m) \tag{6}$$

式中，X_{ij}为标准化后的值；x_{ij}为第i个格网第j项指标的值；$x_{j\min}$、$x_{j\max}$为区域内第j项指标的最小值、最大值。指标标准化值介于[0,1]之间，其值越大，生态健康状况越好；反之，越差。

1.2.4 生态系统健康级别判定标准

依据自然保护区生态健康评价指标体系，对各指标进行标准化后，采用层次分析法和熵值法求取组合权重，并利用综合指数法对自然保护区各格网的生态系统健康水平进行测算，依据自然断裂点法将其划分为健康、亚健康和不健康3个状态区间。其中，健康状态指人为干扰强度小于系统自调控阈值，生态系统保持动态平衡；亚健康状态指人为干扰强度超过系统自调控阈值，生态系统结构和功能改变，生态质量不断下降，但可通过人工或自然恢复对其进行改善；不健康状态指生态系统进一步恶化，其自然恢复难度加大，采取人为调控进行人工恢复，恢复可能性较大。

1.3 综合监测预警指标体系

1.3.1 综合监测预警流程

将人类活动和生态系统健康监测预警指标有机结合，构建自然保护区综合监测预警指标体系，用于对自然保护区内部人类活动干扰强度大小和生态健康水平现状及变化情况进行监测。综合2种预警结果，采用“最低”原则，发出自然保护区监测综合预警信号，其中红色代表重警、黄色代表中警、绿色代表无警。以此达到“刚性”与“弹性”相结合、静态和动态相结合的多元化、多体系、多维度的综合监测，支撑自然保护区管控决策。

1.3.2 人类活动监测预警

自然保护区人类活动监测预警以服务政府决策为基本出发点，依托自然保护区管控规则和编制的人类活动清单，将分布在核心区和一般控制区内现状人类活动的数量多少、类型危害性程度以及变化情况有机结合，进行定量、定性上的区分和评判，开展监测预警，从而揭示政府处理人类活动危害的紧急性状态。警情从小到大分为无警、中警、重警3个等级，分别用绿色、黄色和红色显示。

1.3.3 生态系统健康监测预警

自然保护区生态系统健康监测预警主要依据监测期末的生态健康状态水平和监测期间生态健康趋好、不变和趋差的变化规律进行警情预报[7]。当期末生态系统维持健康状态，且呈现出趋好或者不变的态势，显示无警；当期末生态系统健康维持亚健康状态，且呈现出趋好或者不变的态势，或生态系统健康维持健康状态，呈现趋差态势，显示中警；生态系统健康维持不健康状态，或者维持亚健康状态且呈现下降趋势，显示重警。自然保护区生态健康趋势计算方法如下：

$$\Delta EHI=EHI_j-EHI_i \tag{7}$$

式中，EHI为生态健康指数；EHI_j为监测末期生态健康指数；EHI_i为监测初期生态健康指数；ΔEHI为监测期内的生态健康指数变化量，当$\Delta EHI<0$为趋差，$\Delta EHI=0$为不变，$\Delta EHI>0$为趋好。

2 试点区域的选择与方法

2.1 试点区域的选择

试点是对自然保护区监测预警指标体系可行性和有效性的检验过程。重庆大巴山国家级自然保护区作为温带和亚热带分界线，是国家重要的涵养水源生态功能区，对其开展试点评估具有重要意义。保护区东、北两面接壤陕西省，西连四川省，南接重庆市的巫溪县、开州区，属于四川盆地与秦岭造山带的过渡地带[9-10]，面积为11 2614.58 hm^2，其中核心区、一般控制区分别占比53.92%、46.08%。

2.2 数据来源与预处理

研究数据主要包括社会经济数据、文本数据和空间数据。社会经济数据为乡镇人口数据，来源于统计年鉴。文本数据为官网发布的自然保护区管控规则、相关技术规范等。空间数据中土地利用数据来源于行业部门提供的变更调查数据；DEM数据来自于地理空

间数据云网站（http://www.gscloud.cn）提供的数字高程数据；NDVI数据源来自于USGS美国地质勘探局（http://glovis.usgs.gov）提供的Modis数据，通过最大合成法得到；行政区划数据来源于2017年国家基础信息中心（www.webmap.cn）公布的全国1∶100万基础地理数据库；自然保护区矢量范围来源于行业部门收集成果。同时为方便多元数据的转化与兼容，丰富评价单元属性维度，细化评价区域空间精度，采用格网法进行空间索引的建立与矢量数据的栅格化，本研究生成2 150个1 km×1 km的格网，对保护区开展基于格网模型的生态系统健康评价。

3　结果分析

3.1　人类活动监测预警分析

3.1.1　人类活动现状监测

从数量和构成上看，2020年大巴山自然保护区内以林地、草地、水域等类型的生态用地为主，人类活动整体较少，达4 528.32 hm^2，仅占保护区总面积的4.02%，以农业、交通、居民点等生产性活动最为典型。其中，农业开发是主要的人类活动，由旱地、水田、园地等具体用地类型构成，面积达4 239.93 hm^2，占人类活动地类总面积的93.63%；交通开发活动次之，面积达173.47 hm^2，主要为农村道路、公路用地、交通服务设施用地以及铁路用地等现状设施；居民点与其他活动面积共106.64 hm^2，占比2.36%。

从地理空间分布上看，大巴山人类活动多发生在一般控制区，核心区内较少。核心区内不存在对生态环境危害严重的矿产资源开发性活动，同时对保护区生态环境质量影响相对较大的工业开发、能源开发和旅游开发总面积仅为0.16 hm^2。一般控制区内人类活动地类总面积为2 805.22 hm^2，呈现出农业开发 > 交通开发 > 居民点与其他活动>养殖开发 > 矿产资源开发 > 旅游开发 > 能源开发 > 工业开发的现状。人类活动集中分布于保护区东部，城口县境内的东安镇、岚天乡以及河鱼乡等区域。

3.1.2　人类活动变化监测

由表1可得，2019—2020年间，人类活动由原来的4 669.72 hm^2减少至4 528.31 hm^2，共计减少141.41 hm^2，整体状况趋好。其中，农业开发减少最多，从4 379.37 hm^2减少至4 239.93 hm^2，共减少了139.44 hm^2，其次是居民点与其他活动，减少达9.56 hm^2，表明有序退出成效明显。但由于基数仍然较大，未来还需进一步强化生态搬迁成效。除此之外，部分人类活动呈现出增加的态势，例如交通开发增加了7.9 hm^2，新增的主要为未硬化或硬化较少的农村道路。从地理空间分布上看，一般控制区人类活动新增明显多于核心区，两者新增的面积分别为56.47 hm^2、5.50 hm^2。

3.1.3　人类活动监测预警

大巴山自然保护区内人类活动面积达4 528.31 hm^2，其中核心区为1 723.11 hm^2，一般控制区为2 805.2 hm^2，人类活动类型较多，尤其是一般控制区存在一定量的

表1　大巴山自然保护区乡镇人类活动变化数量和幅度情况

乡镇	工业开发	交通开发	居民点与其他活动	矿产资源开发	旅游开发	能源开发	农业开发	养殖开发	总体情况
北屏乡	0.00	0.70	−1.59	0.00	−1.12	0.00	−15.39	0.00	−17.40
东安镇	0.00	1.90	−2.53	0.50	0.34	0.00	−7.92	−0.03	−7.73
高观镇	0.00	2.61	−0.61	0.00	0.00	0.00	−25.90	−0.14	−24.03
高楠镇	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	−1.65	0.02	−1.59
河鱼乡	0.00	0.43	0.09	0.00	−0.02	0.00	−7.66	−0.05	−7.21
厚坪乡	0.00	0.00	−0.14	0.00	0.00	0.00	−4.36	0.01	−4.50
岚天乡	0.03	0.92	−0.10	0.00	0.00	0.00	−8.62	−0.01	−7.78
蓼子乡	0.00	0.00	−0.55	0.00	0.00	0.00	−10.14	0.09	−10.60
龙田乡	0.00	0.28	−0.14	0.00	0.00	0.00	−4.92	0.00	−4.78
明中乡	0.00	1.25	−0.71	0.00	0.00	0.00	−25.73	0.01	−25.18
咸宜镇	0.00	−0.19	−2.96	0.08	0.00	0.00	−27.17	0.00	−30.24
左岚乡	0.00	0.00	−0.36	0.00	0.00	0.00	0.02	−0.02	−0.36
总体情况	0.03	7.90	−9.56	0.58	−0.8	0.00	−139.44	−0.12	−141.41
变化幅度	较小	较小	较明显	较明显	较明显	无变化	较小	较小	较小

注：数据为2020年和2019年人类活动面积的差值。

矿产资源开发。近1 a，人类活动虽呈减少趋势，但交通开发、养殖开发、特殊开发、能源开发等均呈现不同程度的增加，一定程度上对生态环境会产生危害。依据自然保护区人类活动监测预警规则，保护区人类活动主要以中警为主，呈现黄色预警。

3.2 生态系统健康监测预警分析

由图1可得，2020年大巴山自然保护区生态健康平均指数为0.80，维持健康水平，整体状况良好。其中，核心区和一般控制区平均健康指数分别达0.80、0.79，人为干扰强度均小于系统自调控阈值，生态系统保持一种动态的平衡。各乡镇内部多呈现健康和亚健康状态，不健康区域较小，空间分布格局差异明显。城口县乌巴山镇生态健康平均指数最高，达到0.82，巫溪县红池坝经济开发区最低，生态健康平均指数仅为0.77，主要原因是人类活动开发强度的差异。

从变化情况来看，2019—2020年间，生态系统健康指数由原来的0.79上升至0.80，整体状况趋好。其中，自然保护区核心区生态健康指数不变，一般控制区从监测期初的0.78增长至监测期末的0.79。保护区内大部分乡镇ΔEHI＞0，生态系统健康水平进一步变好，生态健康指数增长变化最为明显的是天元乡，增长了0.02，而红池坝经济开发区和土城镇2个乡镇在监测期间生态健康水平趋差。

综上所述，大巴山国家级自然保护区现状生态系统健康水平整体较高，呈现健康状态，且在监测期内呈现趋好的趋势。因此，生态系统健康监测预警等级为无警，呈现警情状态为绿色预警。

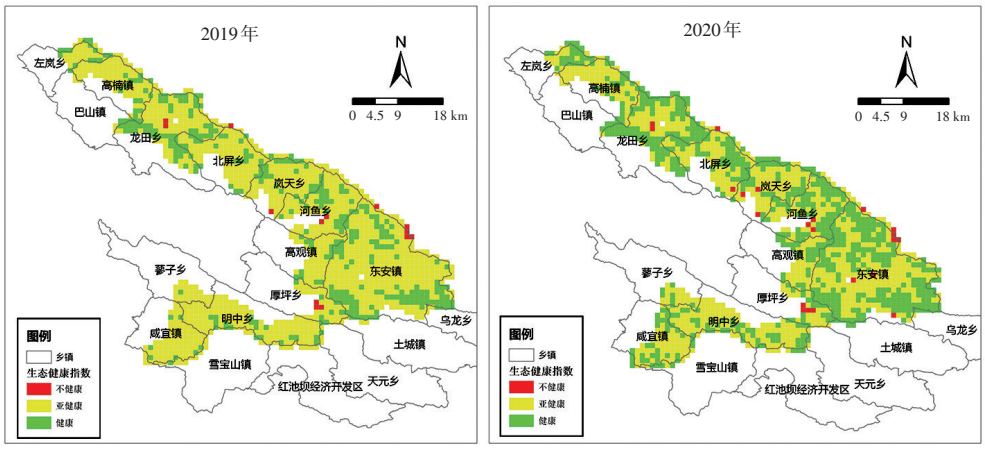


图1 大巴山自然保护区内各乡镇公里格网生态健康水平

（审图号：渝S(2023)079号）

4 结 语

本研究以服务政府管理决策为目标，将人类活动干扰约束性指标和生态系统健康预期性指标有机结合，构建自然保护区监测预警指标体系，并对大巴山国家级自然保护区开展试点。研究结果能够准确反映自然保护区内部人类活动和生态系统健康的现状规模、空间分布、变化趋势、变化强度等基本情况，揭示保护区的警情状态，是刚性与弹性、静态和动态、微观生态本底和宏观生态系统间的有机结合。

参考文献

[1] 宋拥军,吴静,王慧敏,等. 基于地理国情的自然保护区人类活动监测研究[J]. 地理空间信息,2020,18(10):5-9

[2] 刘晓曼,付卓,闻瑞红,等. 中国国家级自然保护区人类活动及变化特征[J]. 地理研究,2020,39(10):2 391-2 402

[3] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境质量报告[M]. 北京: 中国环境出版社,2018

[4] 唐小平,刘增力,马炜. 我国自然保护地整合优化规则与路径研究[J]. 林业资源管理,2020(1):1-10

[5] 李政,何伟,杨皎,等. 基于GIS格网模型的长江上游山丘区国土利用生态健康评价:以四川省宜宾市为例[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2020,43 (3):417-426

[6] 中华人民共和国生态环境部. 自然保护地人类活动遥感监测技术规范: HJ 1156-2021[S].

[7] 李政. 土地生态安全时空演变与情景模拟研究[D]. 成都:四川师范大学,2019

[8] 刘佳琦,栗云召,宗敏,等. 黄河三角洲人类干扰活动强度变化及其景观格局响应[J]. 地球信息科学学报,2018,20(8): 1 102-1 110

[9] 彭建,王仰麟,吴健生,等. 区域生态系统健康评价:研究方法与进展[J]. 生态学报,2007(11):4 877-4 885

[10] 邬玉琴. 大巴山自然保护区森林生态系统服务价值评价[D]. 重庆:重庆师范大学,2018