

文章编号: 1008-2786-(2019)3-328-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000426

基于 Delphi-PSR 模型的祁连山国家级自然保护区生态安全评价

王毅^{1,2}, 谢蓉蓉^{1,2}, 王菲凤^{1,2*}, 王学福³, 郭生祥³

(1. 福建师范大学 环境科学与工程学院, 福州 350007; 2. 福建省资源循环与污染控制重点实验室, 福州 350007;

3. 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 祁连山是我国西部重要的生态安全屏障, 是国家生态安全核心区和重点治理区。为研究祁连山国家级自然保护区生态安全状况, 本文基于该自然保护区的生态系统结构和功能特征, 选取 24 项评价指标, 构建 PSR(压力—状态—响应)模型, 以 Delphi 经典法确定权重, 综合评价 2008 年、2016 年祁连山国家级自然保护区的生态安全状况。结果表明: 2008 年不安全感为 0.1934, 处于稍不安全状态; 2016 年为 0.2454, 较 2008 年增加了 26.9%, 处于很不安全状态。其中, 压力因子的不安全感由 0.1094 升至 0.1276, 增加了 16.6%; 状态因子由 0.0593 升至 0.0748, 增加了 26.1%; 响应因子由 0.0247 升至 0.0430, 增加了 74%; 说明响应层面不安全感上升最显著。2008 年与 2016 年相比, 人类活动增加及资源过度开发是祁连山保护区生态安全水平下降的主要原因, 具体表现在旅游客流量大幅度持续增加、水电和矿产的不合理开发。本研究成果可应用于其他复杂生态系统的安全评价, 为国家自然保护区生态安全提供科学管理和决策依据。

关键词: 生态安全评价; PSR 模型; Delphi 法; 祁连山国家级自然保护区

中图分类号: S759.9

文献标志码: A

城市化和工业化的迅速发展, 特别是自然资源的过度开采和消耗以及由此造成的环境污染已持续威胁着人类生存空间和人体健康, 水土流失、荒漠化、林草资源衰退和生物多样性下降等导致的生态破坏和环境污染问题在世界范围不断加剧, 维持生态安全已成为人类社会在 21 世纪实现可持续发展的一项重要任务^[1-2]。生态安全对国家安全和社会稳定仍然至关重要, 确保区域生态安全, 不仅有利于当地经济的发展, 而且有利于合理利用自然资源 and 有效保护生态环境^[3]。生态安全有广义和狭义两种概念之分, 广义概念注重人类的生存与发展, 指人类的生活品质、生存权利和适应环境变化能力等方

面不受威胁的状态; 狭义概念更注重生态系统自身特性, 指对生态系统的完整性、稳定性、可持续性以及受到破坏可恢复性的反映^[4]。从坚持人与自然和谐共生的角度来看, 生态安全可以定义为人类的生存发展、对自然资源的开发利用等过程不对自然生态系统的结构、功能造成威胁, 同时反过来生态系统又能够提供足够的生态系统服务来维持人类社会、经济的发展, 从而维护人与自然和谐共生的状态^[5-6]。目前关于生态安全研究的热点主要包括生态安全评价^[7]、生态安全预警^[8]和生态安全模式^[9]等方面, 最主要研究内容为生态安全评价。国外生态安全评价研究主要探讨生态安全与国家可持续发

收稿日期(Received date): 2018-10-24; 改回日期(Accepted date): 2019-04-11

基金项目(Foundation item): 福建省科技厅高校产学研合作项目(2016Y4002)。[Science and Technology Plan Projects of Department of Science and Technology of Fujian Province (2016Y4002)]

作者简介(Biography): 王毅(1994-), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境规划与评价。[WANG Yi (1994-), male, born in Zhangye, Gansu province, M. Sc. candidate, research on environmental planning and evaluation] E-mail: 439555782@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王菲凤(1968-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 环境规划与评价、水环境安全。[WANG Feifeng (1968-), female, Ph. D., professor, specialized in environmental planning and evaluation, water environment safety] E-mail: wffeng@126.com

展等宏观层面的相互关系,研究内容主要集中在生态系统风险和生态系统健康层面,对特定区域和尺度生态安全评价研究相对较少^[10]。国内目前生态安全评价研究主要包括生态安全评价方法、指标体系^[11]等方面,探讨以城市^[12],流域^[13-14]和天然草地^[15]等特定区域生态安全评价的研究成果相对丰富,对复杂生态区和国家层面的研究相对较少。

祁连山国家级自然保护区面积大、生态资源丰富,极具生态特色,作为甘肃河西地区的生态屏障,是我国具有重要生态地位的国家级自然保护区。由于近十多年生态保护与经济社会发展的矛盾日益突出,且受人为破坏和保护手段滞后等因素的影响^[17],保护区内出现了冰川退化、水源涵养林遭受破坏、河流污染和地表塌陷等诸多问题^[18],在保护区内从乱砍滥伐逐渐开始进行矿山勘探、开采,之后转变为大规模开发水电站,自然资源不合理开发不仅造成保护区内大气、土壤、水污染问题,更进一步加剧了保护区生态压力,成为影响保护区生态安全的首要原因^[19-20],显著制约了其可持续发展。目前对祁连山保护区生态安全综合定量评价研究的成果相对匮乏,仅有的研究成果只对保护区进行了单个年份的静态评价且未涉及资源开发对生态环境影响的相关指标^[21]。因此,本研究试图填补这一空白,本文基于 PSR 模型的基本理论框架,建立祁连山国家级自然保护区生态安全评价的指标体系,并以专家调研 Delphi 法合理赋权,通过 PSR 模型计算和综合分析,定量评价保护区 2008 和 2016 两个年份的生态安全状态,明确定位祁连山保护区生态系统健康程度和存在的主要问题,更好地理解保护区内生态与经济的关系,进而为制定有效可持续发展对策提供科学依据。进一步开展祁连山保护区生态安全评价研究对于丰富生态安全理论并拓展实证研究区域具有重要意义,也为研究复杂生态区生态安全评价方法提供重要补充。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

甘肃祁连山国家级自然保护区是 1988 年经国务院批准成立的森林和野生动物类型自然保护区,位于东经 97°25′~103°46′,北纬 36°43′~39°36′之间,南沿祁连山主脉与青海省接壤,西至肃南县界与

肃北蒙古族自治县相邻,东至天祝县与永登县相连,北至祁连山森林分布下线与河西走廊相邻,行政区划包括天祝、肃南、古浪、凉州、永昌、山丹、民乐、甘州八县(区)的祁连山林区部分地区,下辖 22 个自然保护区,183 个资源管护站。祁连山保护区总面积 198.72 万 hm^2 ,包括核心区 50.4 万 hm^2 ,缓冲区 38.7 万 hm^2 ,实验区 109.6 万 hm^2 ;此外,保护区设有外围保护地带 66.6 万 hm^2 ,属超大型自然保护区,具有多项重要生态功能,主要包括国家重点水源涵养林区(1980 年划定),国家天然林保护工程区(2001 年确定),国家重点生态公益林(2004 年认定)。2010 年,国务院将祁连山区列为全国 25 个重要生态服务功能区之一;《国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》(2016 年)将祁连山脉列为国家生态安全核心地区、生态修复治理地区^[22]。祁连山保护区属大陆性高寒半湿润山地气候,涵盖森林、草地、河流、冰川等各类生态资源,物种丰富多样,是雪豹、普氏原羚、白唇鹿、金雕等国家级重点保护野生动物栖息地和分布区。

1.2 研究数据来源

本文研究基础数据和资料来自《甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告(2008)》、《甘肃祁连山国家级自然保护区总体规划(2016—2025)》、《甘肃发展年鉴(2009)》、《甘肃发展年鉴(2017)》、《中国统计年鉴 2009》、《中国统计年鉴 2017》、《国家级自然保护区评审标准》和《中国第二次冰川编目》等。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

借鉴经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)共同提出的 PSR 模型基本结构框架^[23-25](图 2)。

祁连山保护区的冰川、森林、草原、流域等各具特征的生态环境在长期自然演变过程中,其水平、垂直分布差异十分明显,且保护区内核心区、缓冲区和试验区等不同区域划分跨度大、较分散、不规律,相关数据的获取与统计不具操作性和实现性。祁连山保护区虽然生态环境多样,但各个环境系统关联紧密,任何局部生态风险均会链式反应到整个保护区。因此在综合考虑祁连山生态系统复杂性和多元性的

表1 祁连山国家级自然保护区生态安全评价指标体系

Tab.1 Index system for ecological security evaluation
in Qilian Mountain National Nature Reserve

目标层 A	准则层 B	二级指标层 C	指标属性
甘肃祁连山 国家级自然 保护区生态 安全评价指 数	压力因子	人口密度	-
		旅游客流量增长率	-
		化肥施用量	-
		冰川退化指数	-
		人均水资源量	+
		人均草地面积	+
		人均森林面积	+
		水电站数量	-
		矿场数量	-
	状态因子	年降水量	+
		草地面积指数	+
		森林面积指数	+
		森林生态效益	+
		冰川面积指数	+
		脊椎动物种类	+
		物种丰富度	+
		高等植物种类	+
		专业技术人员占比	+
		保护区价值评价	+
	响应因子	地表水质达标率	+
		环保投资占比	+
		人均国民生产总值	+
		单位面积林业产值	+
		单位面积牧业产值	+

注:“-”该指标为负向指标,值越小,生态系统越安全;“+”该指标为正向指标,值越大,生态系统越安全。

式中: α_i 为某位专家对该项指标的赋分权重; θ_i 为某专家对该项指标的赋分; m 为生态安全评价指标个数。

④采取式(2)、(3)计算各项指标所占比重以及专家对其赋分的差异程度。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \beta)^2}{n} \quad (3)$$

式中: β 为专家赋分所得各项评价指标的权重; δ 为专家为各项指标赋分的差异程度(δ 越小,赋分值越接近); θ_i 为某专家对该项指标的赋分; n 为参加评价指标赋分专家的人数。

2.3 确定评价指标标准

由于本研究生态安全评价指标类型繁多,量纲各异,因此根据研究区域特征选取 2008 年、2016 年相关数据作为各项生态安全评价指标值,并参照相关国家、省、市、行业各种规定、强制性标准,甘肃省和全国统计年鉴的相关指标平均值、研究区域指标记录多年平均值及最高值、国家级自然保护区评审标准以及专家经验值确定各项指标的安全(不安全)标准值^[22,29-31]。

2.4 生态安全综合评价

各项评价指标的生态安全以不安全指数来表示:设 $K_i (i = 1, 2 \dots, m)$ 为第 i 个指标的现状值, $\varphi_i (i = 1, 2 \dots, m)$ 为第 i 个指标的不安全指数, $0 \leq \varphi_i \leq 1$, P_i 为评价指标的标准值(安全或不安全值),则

(1)对于与祁连山保护区生态安全正相关的指标,即越大越安全的指标:①当 $K_i > 0, P_i > 0$ 时,如 $K_i > P_i$,则 $\varphi_i = 0$;如 $K_i < P_i$,则 $\varphi_i = 1 - K_i/P_i$;②当 $K_i < 0, P_i < 0$ 时,如 $|K_i| > |P_i|$,则 $\varphi_i = P_i$;如 $K_i \leq P_i$,则 $\varphi_i = 0$;③当 $K_i > 0 > P_i$ 时,则 $\varphi_i = 0$;④当 $K_i < 0 < P_i$ 时,则 $\varphi_i = 1$ 。

(2)对于与祁连山保护区生态安全负相关的指标,即越小越安全的指标:①当 $K_i > 0, P_i > 0$ 时,如 $K_i \leq P_i$,则 $\varphi_i = 0$;如 $K_i > P_i$,则 $\varphi_i = 1 - P_i/K_i$;②当 $K_i < 0, P_i < 0$ 时,如 $|K_i| < |P_i|$,则 $\varphi_i = 1 - P_i/K_i$;如 $|K_i| > |P_i|$,则 $\varphi_i = 0$;③当 $K_i > 0 > P_i$ 时,则 $\varphi_i = 1$;④当 $K_i < 0 < P_i$ 时,则 $\varphi_i = 0$ 。

采用公式(4)进行祁连山生态安全综合评价。

$$\varphi_z = \sum_{i=1}^{24} E_i \times \varphi_i \quad (4)$$

式中: φ_z 为综合不安全度; E_i 为该项评价指标所占权重; φ_i 为该项评价指标不安全指数。

祁连山自然保护区生态安全综合评价计算结果,见表2、表3。

2.5 确定生态安全评价等级

本研究依据保护区生态安全综合评价分值高低及生态系统演变特征,借鉴李梦娣^[32]、徐浩田^[33]等人研究成果,将生态不安全 φ_z 划分为 5 个等级, φ_z 范围在 $[0, 1]$ 之间, $\varphi_z = 0$ 表示生态安全状态 $\varphi_z = 1$ 表示生态最不安全状态, φ_z 数值越大,生态不安全度越高,详见表4。

表 2 甘肃祁连山国家级自然保护区生态安全评价指标实际值、权重值及生态不安全度

Tab.2 Actual values, weight value and ecological insecurity degree of national nature reserve in Qilian Mountain

评价指标		指标值				权重	赋分 差异度	不安全度	
		实际值		标准值				2008 年	2016 年
		2008 年	2016 年	2008 年	2016 年				
生态系统 压力 指标	人口密度/人·hm ²	0.258	0.0725	0.562	0.575	0.036784	0.0117	0	0
	旅游客流量增长率/%	7.0	46.3	6.34	22.1	0.044386	0.0147	0.0042	0.0232
	化肥施用量/t·km ²	1.91	1.90	1.79	2.06	0.035786	0.0185	0.0022	0
	冰川退化指数/%	21.56	24.88	18	18	0.046039	0.0146	0.0076	0.009
	人均水资源量(m ³ /人)	4988	3907	2071	2354	0.03495	0.0210	0	0
	人均草地面积(m ³ /人)	1.78	4.99	0.27	0.54	0.052237	0.0132	0	0
	人均森林面积(m ³ /人)	0.88	5.53	0.117	0.194	0.048289	0.0131	0	0
	水电站数量/座	28	42	0	0	0.050568	0.0152	0.0506	0.0506
	矿场数量/处	96	144	0	0	0.044762	0.0149	0.0448	0.0448
生态系统 状态 指标	年降水量/mm	320	307.9	361.0	380.7	0.034228	0.009	0.0039	0.0065
	草地面积指数/%	46.8	36.2	46	46	0.05121214	0.0116	0	0.011
	森林面积指数/%	22.9	21.8	28.5	28.5	0.044112	0.010	0.0086	0.010
	森林生态效益/亿元	1548	1496	1441	1441	0.031138	0.010	0	0
	冰川面积指数/%	5.20	4.96	7.9	7.9	0.02764	0.0136	0.0095	0.01
	脊椎动物种类/种	286	286	300	300	0.043406	0.0115	0.002	0.002
	物种丰富度/%	30.4	30.4	40	40	0.040908	0.0148	0.0098	0.0098
	高等植物种类/种	1311	1311	2000	2000	0.045099	0.010	0.0155	0.0155
	专业技术人员占比/%	44.6	51.3	20	20	0.047578	0.010	0	0
	保护区价值评价/分	79	79	100	100	0.048019	0.013	0.01	0.01
生态系统 响应 指标	地表水质达标率/%	98.6	94.4	100	100	0.053255	0.0179	0.0007	0.003
	环保投资占比/%	21.3	19.02	2.3	2.52	0.037461	0.0130	0	0
	人均国民生产总值/元	10992	20084	12414	27643	0.036738	0.009	0.004	0.01
	单位面积林业产值/万·hm ⁻²	0.029	0.26	0.022	0.048	0.028435	0.0112	0	0
	单位面积牧业产值/万·hm ⁻²	0.099	0.063	0.214	0.33	0.03697	0.009	0.02	0.03

表 3 甘肃祁连山国家级自然保护区生态安全综合评价

Tab.3 Comprehensive evaluation of ecological security
of national nature reserve in Qilian Mountain

2008 年			2016 年		
综合不安全值	准则层	准则层 不安全值	综合不安全值	准则层	准则层 不安全值
0.1934	压力因子	0.1094	0.2454	压力因子	0.1276
	状态因子	0.0593		状态因子	0.0748
	响应因子	0.0247		响应因子	0.0430

3 结果与分析

根据公式(4)计算得出,甘肃祁连山自然保护区 2008、2016 年的生态综合不安全度分别为 0.1934 和 0.2454,对照生态安全等级划分标准(表 4),祁连山保护区生态安全状况 2008 年处于第Ⅰ等级(稍不安全),2016 年处于第Ⅱ等级(很不安全)。

图 3 直观地显示出,2016 年与 2008 年相比较,压力、状态、响应因子层生态不安全度均有所上升,2008 年和 2016 年压力因子层不安全度都处于最高。从各分指标和综合不安全度评价结果可知,2008 年

表4 生态安全等级划分标准
Tab.4 Classification standard of ecological security

生态不安全度区间	等级	生态安全状态	特征
$0.0 < \varphi_z < 0.2$	I	稍不安全	保护区生态系统结构相对完整,植被覆盖度中等,生态环境受到一定破坏,尚可维持基本生态功能
$0.2 < \varphi_z \leq 0.4$	II	很不安全	保护区生态系统结构存在缺陷,植被覆盖度稍低,生态功能开始退化,生态压力大,生态灾害时有发生
$0.4 < \varphi_z \leq 0.6$	III	非常不安全	保护区生态系统结构缺陷较大,植被覆盖度较低,生态功能很弱,生态异常较多,生态问题显著
$0.6 < \varphi_z \leq 0.8$	IV	特别危险	保护区生态系统很不完整、状态很不稳定,物种丰富度很低,植被覆盖度差,生态环境受到很大破坏,恢复困难
$0.8 < \varphi_z \leq 1.0$	V	极度危险	保护区生态系统结构极不完整、状态极不稳定,植被覆盖度极低,物种丰富度极低,生态功能极弱,生态环境受到极大破坏

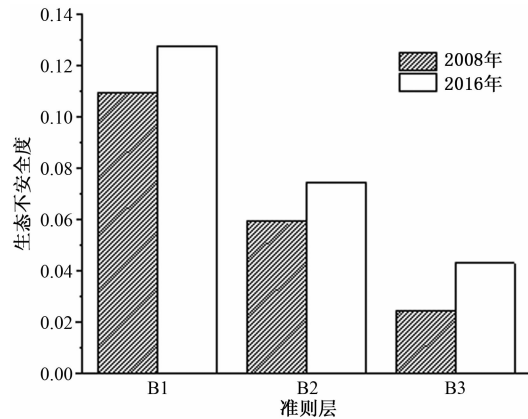


图3 准则层不安全度
(B1 = 压力因子; B2 = 状态因子; B3 = 响应因子)
Fig.3 Unsafe degree of criterion layer (B1 = Pressure factor; B2 = State factor; B3 = Response factor)

保护区生态系统结构相对完整,生态环境受到的破坏程度较小,尚可基本维持原有的生态功能;2016年保护区生态状况特别表现为生态系统结构存在缺陷,生态功能水平开始退化,生态异常增多,水源水质变差,生态效益降低等。

3.1 压力因子分析

分析表3,2008年、2016年保护区的压力因子层生态不安全度分别为0.1094和0.1276,占总不安全度比重分别达到56.7%和51.9%,上升幅度为16.6%,由此说明保护区生态压力较大且始终是影响生态安全的主要方面,人为活动持续影响保护区生态系统、不利因素不断积累。由表2可知,2008、2016年水电站数量、矿场数量指标占压力层不安全度远远高出其他指标,不安全度分别达0.0506、0.0448,处于第一、第二位;旅游客流量增长率指标

不安全度增长最快,由2008年的0.0042升至2016年的0.0232,增幅高达452%;2008年化肥施用量指标不安全度为0.0022,占压力层不安全度比重最小,仅为2%,2016年已达安全值范围内;2008、2016年冰川退化指数指标不安全度有所增加,分别为0.0076、0.009,其他指标处于安全值范围内。由此说明,2008—2016年间自然资源的过度开发与消耗始终是保护区生态压力较大的主要原因,所造成的生态破坏和环境污染必然导致生态不安全度上升;人类活动的频繁干扰也逐渐成为影响保护区生态安全的主要因素,且由于人口膨胀、超载放牧、过度开垦、乱砍滥伐等导致的气候恶化,从而加剧了冰川的萎缩,致使人为活动成为影响使冰川退化指数指标不安全度增加的部分因素;化肥施用量情况较从前有所改善,一定程度减少对保护区土壤环境的生态压力。此外,2008年保护区人口密度为0.258人/hm²,2016年为0.0725人/hm²,表明总体上保护区内人口迁移完成度较好,保护区内人为活动的减少对生态不安全度的降低具有一定的积极作用。

3.2 状态因子分析

2008年、2016年祁连山自然保护区状态因子层生态不安全度分别为0.0593和0.0748,占总不安全度的30.66%和30.5%,不安全度上升率为26.1%。由表2可知,2008、2016年高等植物种类指标生态不安全度最高,达0.0155;2008—2016年,年降水量不安全度由0.0039上升至0.0065;森林面积指数不安全度由0.0086上升至0.01;冰川面积指数由0.0095增至0.01。草地面积指数2008年处于安全值范围内,2016年不安全度达0.011,且已

上升为 2016 年状态层不安全度贡献值第二位; 2008、2016 年脊椎动物种类指标不安全度均为 0.002, 物种丰富度指标不安全度均为 0.0098, 保护区价值评价指标不安全度均为 0.01; 其他指标处于安全值范围内。可见, 高等植物物种丰富度是制约保护区生态安全状况的主要因素, 草地的退化是 2016 年状态因子层生态不安全度上升的主要原因, 致使保护区部分地区存在荒漠化风险, 草地生物活动范围减小, 生态环境状况恶化。因此, 亟需加强对区内动植物资源最大限度的保护, 且对环境污染源进行全面治理、达标排放。

3.3 响应因子分析

生态系统面临一定程度的压力或受到外界的持续干扰时, 必然会出现一定的反馈响应, 2008 年、2016 年祁连山自然保护区状态因子层生态不安全度分别为 0.0247 和 0.043, 占总不安全度的 12.8% 和 17.5%, 不安全度上升 74%。由表 2 可知, 2008、2016 年单位面积牧业产值指标生态不安全度最高, 分别为 0.02 和 0.03; 地表水质达标率指标不安全度由 2008 年的 0.0007 上升至 2016 年的 0.003, 表明水质下降最显著; 人均国民生产总值指标不安全度由 2008 年的 0.004 上升至 2016 年的 0.01, 其他指标处于安全值范围内。对比分析结果显示, 单位面积牧业产值较低是影响响应层面生态不安全度上升的主要因素, 保护区草地面积指数降低, 草地环境恶化且牧草质量状况变差也导致单位面积牧业产值较低。随着保护区内水电站、矿场数量的增加、周边景区、社区不断的发展建设, 区内主要河流(黑河、疏勒河等)、冰川自然资源(“七一”冰川、“八一”冰川等)被开发利用, 致使祁连山水质情况出现恶化, 地表水质达标率指标不安全度急剧上升, 生态功能的稳定性降低, 且目前保护区内居民收入水平较低, 收入方式单一。

4 结论

基于 Delphi-PSR(压力—状态—响应)模型的理论内涵, 探究祁连山国家级自然保护区生态安全评价指标体系构建和专家调研的指标权重赋予, 计算保护区总体区域和各层面因子的生态不安全度, 综合评价其不同时期的生态安全状态和定量变化, 得出:

(1) 2008—2016 年, 祁连山国家级自然保护区生态不安全度呈现显著增加的态势, 2008 年不安全度为 0.1934, 为稍不安全状态, 2016 年发展到很不安全状态, 不安全度增加了 26.9%, 达 0.2454。其中, 压力、状态、响应三个层面的不安全度在 2008—2016 年期间, 分别由 0.1094 升至 0.1276、0.0593 至 0.0748、0.0247 至 0.043, 响应层面不安全度上升最显著, 增加了 74%, 是区域不安全度不利发展的关键要素。

(2) 为有效防控生态环境系统面临的风险, 亟待加快保护区移民协调工作, 拓展社区居民的收入方式和途径, 减轻当地居民对于保护区内森林、草地等自然资源的过度依赖; 同时, 充分借鉴国际国内相关管理经验, 积极探索祁连山国家公园体制试点建设路径, 采取因地制宜的生态保护和修复措施, 强化实施动态生态监测, 以对症解决目前保护区内过度开发、生态破坏、环境污染、管理低效等问题, 改善提升祁连山国家级自然保护区的生态系统安全和可持续发展水平。

参考文献(References)

- [1] LIU Dan, CHANG Qing. Ecological security research progress in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**: 111–121.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(3): 354–358. [XIAO Duning, CHEN Wenbo, GUO Fuliang. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(3): 354–358]
- [5] TIAN Jingyi, GANG Gengshi. Research on regional ecological security assessment[J]. *Energy Procedia*, 2012, **16**: 1180–1186.
- [6] DIAO Zhaoyang, SU Derong, LV Shihai, et al. A study of ecological security assessment for natural reserve[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, **1092/1093**: 1081–1086.
- [7] HAN Baolong, LIU Hongxiao, WANG Rusong. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. *Ecological Modelling*, 2015, **318**(SI): 217–225.
- [8] BAHRAMINEJAD M, RAYEGANI B, JAHANI A, et al. Proposing

- an early-warning system for optimal management of protected areas (case study: Darmiyan protected area, Eastern Iran) [J]. *Journal for Nature Conservation*, 2018, **46**: 79–88.
- [9] SU Yongxian, CHEN Xiuzhi, LIAO Jishan, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, **19**: 35–46.
- [10] ANDREA Y, CAMILO M, MIRIAM A, et al. Methodological proposal for ecological risk assessment of the coastal zone of Antioquia, Colombia [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **130**: 242–251.
- [11] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 等. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价 [J]. *生态学报*, 2010, **30** (23): 6495–6503. [LI Zhongcai, LIU Linde, SUN Yufeng, et al. Assessment method of regional ecological security based on Pressure-State-Response model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30** (23): 6495–6503]
- [12] BAI Xiaorui, TANG Jingchun. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 881–887.
- [13] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价 [J]. *资源科学*, 2014, **36** (8): 1702–1711. [XIE Xuefeng, WU Tao, XIAO Cui, et al. Ecological security assessment of Dongyang river watershed using PSR modeling [J]. *Resources Science*, 2014, **36** (8): 1702–1711]
- [14] 杨志, 赵冬至, 林元烧. 基于 PSR 模型的河口生态安全评价指标体系研究 [J]. *海洋环境科学*, 2011, **30** (1): 139–142. [YANG Zhi, ZHAO Dongzhi, LIN Yuanshao. Study on evaluation index system of estuary ecological security based on PSR model [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, **30** (1): 139–142]
- [15] 董世魁, 吴娱, 刘世梁, 等. 阿尔金山国家级自然保护区草地生态安全评价 [J]. *草地学报*, 2016, **24** (4): 906–909. [DONG Shikui, WU Yu, LIU Shiliang, et al. Evaluation on grassland eco-security of the Altun mountain National Nature reserve [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, **24** (4): 906–909]
- [17] 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议 [J]. *冰川冻土*, 2017, **39** (2): 229–234. [WANG Tao, GAO Feng, WANG Bao, et al. Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39** (2): 229–234]
- [18] 丁文广, 刘迎陆, 田莘冉, 等. 祁连山国家级自然保护区创新管理机制研究 [J]. *环境保护*, 2018, **46** (Z1): 41–46. [DING Wenguang, LIU Yingliu, TIAN Shenran, et al. A research on innovative management mechanism of Qilian mountain National Nature reserve [J]. *Environmental Protection*, 2018, **46** (Z1): 41–46]
- [19] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究 [J]. *生态学报*, 2019, **39** (07): 2343–2352. [LI Yongge, LI Zongxing, FENG Qi, et al. Research on the development of the ecological protection of the Qilian Mountains based on ecological redline [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39** (07): 2343–2352]
- [20] 杜群, 杜殿虎. 生态环境保护党政同责制度的适用与完善—祁连山自然保护区生态破坏案引发的思考 [J]. *环境保护*, 2018, **46** (6): 46–49. [DU Qun, DU Dianhu. The application and improvement of the party and government accountability in ecological environment protection: the case study of Qilian Mountain Nature Reserve [J]. *Environmental Protection*, 2018, **46** (6): 46–49]
- [21] 唐飞飞. 祁连山国家级自然保护区生态安全评价 [D]. 兰州大学, 2014: 15–24. [TANG Feifei. The evaluation of ecological security in Qilian Shan National Nature Reserve [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 15–24]
- [22] 国家林业局调查规划设计院. 甘肃祁连山国家级自然保护区总体规划 (2016—2025 年) [M]. 北京: 国家林业局调查规划设计院, 2016: 1–206. [Academy of Forestry Investigation and Planning. Gansu Qilian mountain nature reserve master plan (2016–2025) [M]. Beijing: Academy of Forestry Investigation and Planning, 2016: 1–206]
- [23] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究 [J]. *土壤*, 2003 (1): 2–7. [ZUO Wei, ZHOU Huizhen, WANG Qiao. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety [J]. *Soils*, 2003 (1): 2–7]
- [24] LIANG Pei, LI Mingdu, GUI Jieyue. Ecological security assessment of Beijing based on PSR Model [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 832–841.
- [25] 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 等. 基于 PSR 模型的区域生态持续性评价概念框架 [J]. *地理科学进展*, 2012, **31** (7): 933–940. [PENG Jian, WU Jiansheng, PAN Yajing, et al. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: conceptual framework [J]. *Progress in Geography*, 2012, **31** (7): 933–940]
- [26] 袁勤俭, 宗乾进, 沈洪洲. 德尔菲法在我国的发展及应用研究—南京大学知识图谱研究组系列论文 [J]. *现代情报*, 2011, **31** (5): 3–7. [YUAN Qinqian, ZONG Qianjin, SHEN Hongzhou. Review of development and application of Delphi method in China [J]. *Modern Information*, 2011, **31** (5): 3–7]
- [27] LANDETA J. Current validity of the Delphi method in social sciences [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006, **73** (5): 467–482.
- [28] 陈扬. 太湖流域河网—湖泊水环境安全评价体系构建—基于德尔菲法的研究 [J]. *科学技术创新*, 2018 (26): 7–8. [CHEN Yang. Construction of water environment safety evaluation system of Taihu lake based on Delphi method [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2018 (26): 7–8]
- [29] 杨全生, 刘建泉, 汪有奎, 等. 甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告 [R]. 甘肃: 甘肃科学技术出版社, 2008: 1–196. [YANG Quansheng, LIU Jianquan, WANG Youkui, et al. Comprehensive scientific investigation report of national nature

- reserve in Qilian mountain [R]. Gansu: Gansu Science and Technology Press, 2008: 1–196]
- [30] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化—基于中国第一、二次冰川编目数据 (英文) [J]. 地理科学, 2018, **70** (2): 206–220. [SUN Meiping, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian mountains in the past half century: based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **70** (2): 206–220]
- [31] 蒋丽君. 甘肃祁连山自然保护区地表水质量现状评价 [J]. 甘肃水利水电技术, 2017, **53** (8): 12–15, 19. [JIANG Lijun. The evaluation based on surface water quality in Gansu Qilian mountain natural reserve [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2017, **53** (8): 12–15, 19]
- [32] 李梦娣, 范俊韬, 孔维静, 等. 河流山区段水生态安全评估—以太子河为例 [J]. 应用生态学报, 2018, **29** (08): 2685–2694. [LI Mengdi, FAN Juntao, KONG Weijing, et al. Assessment of aquatic ecological security for mountainous rivers: a case study in the Taizi river Basin Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29** (08): 2685–2694]
- [33] 徐浩田, 周林飞, 成 遣. 基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究 [J]. 生态学报, 2017, **37** (24): 8264–8274. [XU Haotian, ZHOU Linfei, CHENG Qian. Study on ecosystem health evaluation and risk assessment for Linghekou wetlands based on a PSR model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37** (24): 8264–8274]

Evaluation on Eco-security of Qilian Mountain National Nature Reserve Based on Delphi-PSR Model

WANG Yi^{1,2}, XIE Rongrong^{1,2}, WANG Feifeng^{1,2*}, WANG Xuefu³, GUO Shengxiang³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Key laboratory of Resource Cycle and Pollution Control of Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3. Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve Administration, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract: To study the ecological security of Qilian Mountain National Nature Reserve (QMNNR), 24 assessment indexes were selected and endowed with weights by classical Delphi method according to the structure and function of ecosystem of QMNNR in Gansu Province. Afterward, PSR (Pressure-State-Response) model was constructed to comprehensively evaluate the ecosystem security levels of QMNNR in 2008 and 2016, respectively. This study focused on exploring the research approach of the dynamic changes of ecological security and providing scientific basis for the improvement of ecological security situation in QMNNR. The results showed that QMNNR was at 0.1934 insecure degree in 2008 which demonstrated a bit of insecure level state, however, at 0.2454 insecure degree in 2016 which indicated a quite unsafe level state. Compare to 2008, the ecosystem insecure degree of QMNNR increased by 26.9 % in 2016, i. e. one grade decrease of security level. The insecure degree of pressure factor increased from 0.1094 to 0.1276 (16.6%); while, insecure status factor from 0.0593 to 0.0748 (26.1%), and the response factor from 0.0247 to 0.043 (74%). It suggests that the intensified human activities along with the excessive exploitation of resources were the main causes for the declining of the ecological security level of the QMNNR in 2016, especially the extreme continuous increasing number of tourists or visitors, over-exploited of hydropower stations and mines. To sum up, reasonable and efficient measures that closely related to its local conditions are urgently needed for the protection and restoration of QMNNR. This study has provided scientific management ways, as well as decision-making basis for the ecological security of national nature reserves.

Key words: eco-security evaluation; PSR model; Delphi method; Qilian Mountain National Nature Reserve