基于 PSR 模型的能源—生态复合区生态安全预警研究
——以山西省忻州市为例

赵鹏宇[1]，薛慧敏[2]

(1.忻州师范学院 五台山文化研究中心，山西 忻州 034000；2.忻州师范学院 地理系，山西 忻州 034000)

摘　要：[目的] 以山西省忻州市为例，探讨能源与生态复合区生态安全预警，为区域生态保护规划及区域高质量发展提供依据。[方法] 基于 PSR 概念模型框架，从人口、资源、经济、环境、生态要素选取了 21 个指标建立了能源—生态复合区生态安全预警评价指标体系，采用熵值法确定权重，对山西省忻州市 2000—2018 年生态安全预警进行分析。[结果] ①2018 年忻州市 14 县综合预警值介于 0.356 2～0.587 0 之间，平均值为 0.491 2，预警等级处于中警至轻警范围内。其中忻府区、定襄、五台、繁峙、静乐 5 县(区)警情为中警状态，其余 7 县(市)均为轻警状态，忻州市整体生态安全并不乐观，生态安全等级较低。②2000—2018 年忻州市生态安全预警值呈波动缓慢上升趋势，警情为中警等级的县减少，轻警等级的县增加。[结论] 研究区生态安全空间上呈现不均衡性，警情整体趋于改善，主要取决于系统压力中的经济、资源、环境压力趋缓。

关键词：生态安全；动态预警；熵值法；忻州市

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)02-0285-06　　**中图分类号**：X171

文献参数：赵鹏宇，薛慧敏. 基于 PSR 模型的能源—生态复合区生态安全预警研究[J]. 水土保持通报，2020，40(2)：285-290. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.041；Zhao Pengyu，Xue Huimin. A study on pre-warning of ecological security in energy-ecological recombination region based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：285-290.

A Study on Pre-warning of Ecological Security in Energy-ecological Recombination Region Based on PSR Model
—Taking Xinzhou City of Shanxi Province as an Example

Zhao Pengyu[1], Xue Huimin[2]

(1. *Mount Wutai Cultural Research Center, Xinzhou Teachers', University Xinzhou, Shanxi* 034000, *China*;
2. *Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou, Shanxi* 034000, *China*)

Abstract: [Objective] Taking Xinzhou City of Shanxi Province as an example, the pre-warning of ecological security in energy-ecological recombination region was discussed, in order to provide a basis for regional ecological protection planning and high-quality development. [Methods] Based on the pressure-state-response conceptual model framework, 21 indexes were selected from population, resources, economy, environment and ecological elements to establish the ecological security early warning and evaluation index system in energy-ecological recombination region. Entropy method was used to determine the weights and analyze the ecological security pre-warning in Xinzhou City from 2000 to 2018. [Results] ① In 2018, the comprehensive pre-warning values of 14 counties in Xinzhou City ranged from 0.356 2 to 0.587 0, with the average value of 0.491 2. The pre-warning level was within the range of medium to light, among which Xinfu District, Dingxiang County, Wutai County, Fanshi County and Jingle County were in the state of medium pre-warning level. The remaining seven counties were in the state of light pre-warning level. The overall ecological security of Xinzhou City was not optimistic because of its low ecological security level. ② From

收稿日期：2019-02-23　　**修回日期**：2019-08-14

资助项目：2018 年山西省高校哲学社会科学研究一般项目“乡村振兴战略下五台山景区农户旅游参与模式及生态效益研究”(201803096)；2018 年忻州科技计划项目“五台山景区农户旅游参与模式及生态效益研究”(20180106)；忻州师范学院专题研究项目“忻州市资源与生态承载力和生态安全评价”(ZT201405)

第一作者：赵鹏宇(1981—)，男(汉族)，山西省保德县人，硕士，副教授，主要从事区域资源环境保护研究。Email：497154516@qq.com。

2000 to 2018, the ecological security pre-warning values of Xinzhou City showed a slow upward trend. The number of counties with medium and light alarm level decreased, while the number of counties with light alarm level increased. [Conclusion] The ecological security in the research area presented unbalanced in space. The overall warning situation tended to be improved due to the decreasing pressure on economy, resources and environment in the system.

Keywords: ecological security; dynamic pre-warning; entropy method; Xinzhou City

生态安全预警是指在一定时空领域内,人类社会赖以生存的系统处于良性循环,并能满足该区域人类社会可持续发展的状态。目前生态安全预警研究在不同尺度取得了一批重要实践成果,为区域生态环境管理、决策提供科学的依据。区域生态安全评价是对人类活动影响而产生的对区域生态系统威胁状态的评价,其目的是通过研究区域生态安全状况,为可持续发展提供参考,实施有效的生态与环境系统管理。国外的预警理论源于 1917 年哈佛研究会的 Peasons[1] 首次运用 17 项景气指标对美国经济发展趋势进行研究,1975 年全球环境监测系统(GEMS)[2] 建立,生态安全预警开始受到广泛关注,以洪水、水土流失、土壤退化、山体滑坡监测预警为主,新世纪以来主要集中在生态系统稳定性评价[3] 和生态风险评价[4] 两方面。20 世纪 80 年代我国主要侧重于宏观预警研究,内容上以生态安全预警和可持续发展预警为主,且侧重于区域水、土、能源等专题预警研究[5-12]。方法包括统计学评价、模型研究等。统计学评价包括层次分析法、因素分析法、综合指数法、模糊数学法等。模型研究主要有数学模型、生态足迹模型、景观生态模型、数字地形模型等。实践中应用最广泛的模型主要有两类,一类是 1994 年联合国环境规划署和经济合作发展组织等单位共同提出 PSR 模型(pressure-state-response,压力—状态—响应),随后扩展到 DSR,DPSEEA,DPSR 模型[13-14],这些模型从不同程度上考虑了人类活动对环境的压力,自然资源质与量的变化,以及人类对这些变化的响应,即采取相应的减少、预防和缓解措施。另一类以人口、自然、经济、社会、资源、生态环境的部分或全部集合组成指标体系[15-19],同时采用客观赋权法、层次分析法、熵值法等确定权重计算预警值,评价生态安全等级。区域生态安全预警成果丰富但整体还处于不成熟阶段,研究方法多采用单一静态的预警方法,未能充分考虑生态安全的动态性,不能充分为政府决策提供依据。本文在梳理前人文献基础上,以上述 PSR 为基础模型,从人口、资源、社会、环境、生态集合选取指标,试图构建一个更加合理完善的能源—生态复合区生态安全预警指标体系,并将山西省忻州市 14 地市作为研究对象,分析该市新世纪以来 2000—2018 年生态安全预警值的时空演变趋势,并提出相应的对策,旨在为能源—生态复合区生提升生态安全、优化生态环境提供理论指导与借鉴。

1 研究区概况

忻州市位于山西省北中部,总面积 2.51×10^4 km^2,占山西省土地总面积的 16%,土地资源中山地、丘陵与平原所占比例为 53.5%,35.96%,10.54%。下辖 1 市,1 区,12 县。2018 年全市人口为 317.2 万人,自然增长率 3.08‰,农作物种植面积 4.46×10^5 hm^2,粮食产量 1.94×10^6 t;全市一次能源生产折标准煤 5.41×10^7 t,二次能源生产折标准煤 1.62×10^7 t。国内生产总值 681.2 亿元。根据国家与山西省主体功能区划,忻州市大部分区域为国家级或省级重点生态功能区。区域内主要面临的生态问题为水土流失、局部地区水资源短缺以及能源开采带来的生态问题。随着能源开采的增长、产业的发展和城镇化进程加速了区域生态危机,同时退耕还林草工程的实施又缓和了局部危机程度[20-23]。为此,生态安全动态预警显的尤为紧迫。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据收集和处理

(1) 年鉴类。山西省经济与社会统计年鉴、忻州市统计年鉴(2010—2018 年)、《走向富裕文明的忻州:忻州 60 a 发展回顾》、忻州水利志、忻州煤炭志、忻州农田水利统计年鉴。

(2) 政府公报类。忻州市国民经济与社会发展统计公报、忻州市环境状况公报、忻州市水资源公报。

(3) 城市政府部门调研数据及网络搜索。

在数据的整理搜集过程中,由于所有变量都需要一个特定时间系列数据作为支持,可能会遇到某一年份的指标因为统计口径和统计项发生变化而在年鉴中没有统计,主要采用以下办法处理,一是根据已有基础资料,使用插值法计算,二是通过换算统一单位口径,以补充数据的完整性。

2.2 预警指标体系构建

基于 PSR 概念模型,从人口、资源、社会、环境、

生态角度建立指标体系。系统压力对应人口、资源、社会经济、环境压力。系统状态对应生态状态与资源状态。系统响应对应环境与社会响应。指标筛选坚持科学性、目的性、代表性、可操作和实用性等原则,最终选取了 21 项指标,具体指标的计算均是相对数。结果详见表 1。

表 1　忻州市生态安全预警指标体系

目标层	准则层	要素层	指标层	测算方法	指标属性
忻州市生态安全预警指标体系	系统压力	人口压力指数	人口密度/(人·km^{-2})	年末总人口/区域土地面积	—
			人口自然增长率/‰	(年出生人数−年死亡人数)/年平均人数×1 000	—
		资源压力指数	万元 GDP 用水量(m^3/万元)	用水量/GDP×10 000	—
			万元 GDP 能耗(t/万元)	能耗量/GDP×10 000	—
		经济发展指数	人均 GDP/元	GDP/人口数量	+
			GDP 年均增长幅度/%	(本年 GDP−上年 GDP)/上年 GDP×100%	+
		环境压力指数	万元 GDP 废污水排放量(m^3/万元)	(废水排放量+污水排放量)/GDP×10 000	—
			万元 GDP SO_2 排放量(t/万元)	SO_2 排放量/GDP×10 000	—
			万元 GDP 氮氧化物排放量(t/万元)	氮氧化物排放量/GDP×10 000	—
			万元 GDP 烟粉尘排放量(t/万元)	(烟尘排放量+粉尘排放量)/GDP×10000	—
	系统状态	生态状态指数	水土流失治理率/%	已治理面积/水土流失总面积×100%	+
			水土协调度/%	耕地有效灌溉面积/耕地面积×100%	+
			人类干扰指数/%	(耕地面积+建设用地面积)/区域土地面积×100%[19]	—
		资源状态指数	人均水资源/m^3	水资源总量/人口数	+
			人均矿产资源量/t	年产矿量/年末总人口	+
			人均粮食产量/kg	年产粮食量/年末总人口	+
	系统响应	环境响应指数	空气综合染污指数	年度环境状况公报	—
			环保投资率/%	环保投资额/GDP×100%	+
		社会响应指数	农民人均纯收入/元	年度统计年鉴	+
			农业机械化水平/(kW·hm^{-2})	农业机械总动力/耕地面积	+
			城市化水平/%	城镇人口占/总人口×100%	+

注:其中“+”代表正向指标,指标值越大,生态安全状况越好,“—”代表指标指标,情况相反。

2.3　预警模型及判别标准

2.3.1　预警模型

(1) 数据标准化。预警方法采用熵值法,利用极差标准化方法对参评指标进行量化统一。

对于正向指标:

$$X_{ij}'=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min}) \quad (1)$$

对于逆向指标:

$$X_{ij}'=(X_{j\max}-X_{ij})/(X_{j\max}-X_{j\min}) \quad (2)$$

式中:X_{ij}——i 地区的第 j 个指标值;X_{ij}'——数据标准化后的指标值;$X_{j\min}$——所有地区 j 指标的最小值;$X_{j\max}$——所有地区中 j 指标的最大值。

(2) 指标信息熵值 e 和信息效用值 d。第 j 项指标的信息熵值 e_j 为:

$$e_j=-K\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln(p_{ij}) \quad (3)$$

$$p_{ij}=X_{ij}'/\sum_{i=1}^{m}X_{ij}' \quad (4)$$

式中:K——常数,与系统的地区数 m 有关。对于一个信息完全无序的系统,有序度为零,其熵值最大,$e=1$,m 个样本处于完全无序分布状态时 K 为:

$$K=1/\ln m \quad (5)$$

某项指标的信息效用价值取决于该指标的信息熵 e_j 与 1 之间的差值:

$$d_j=1-e_j \quad (6)$$

(3) 指标权重。利用熵值法估算各指标的权重,可以得到第 j 项指标的权重为:

$$W_j=d_j/\sum_{j=1}^{n}d_j \quad (7)$$

(4) 预警值计算。X_{ij} 的评价值 f_{ji} 为:

$$f_{ij}=W_j\cdot X_{ij}' \quad (8)$$

(5) 第 i 个地区的预警值:

$$f_i=\sum_{j=1}^{m}f_{ij} \quad (9)$$

2.3.2　判别标准　运用熵值法得出的生态安全预警值实际上是各地区生态安全的一个综合得分,其分值在 0～1 之间,分值越大表明该地区生态安全状况越理想;分值越接近于 0,表明生态安全警度越大。国内生态安全预警评判标准划分基本为 2 类,平均分段与不等分段。警度等级 4 至 6 级的均有。为了便于预警结果的归类分析,与同类研究成果比较,在参考相

关文献[15-19]的基础上，确定生态安全预警评判标准。将忻州市 14 县市区生态安全预警评判标准划分为了重警、中警、轻警、无警和理想 5 个等级（如图 1 所示）。不同的预警值对应不同级别的安全预警状况。生态安全预警等级越高，说明区域的生态安全状况越好；反之，说明区域的生态安全状态越差。

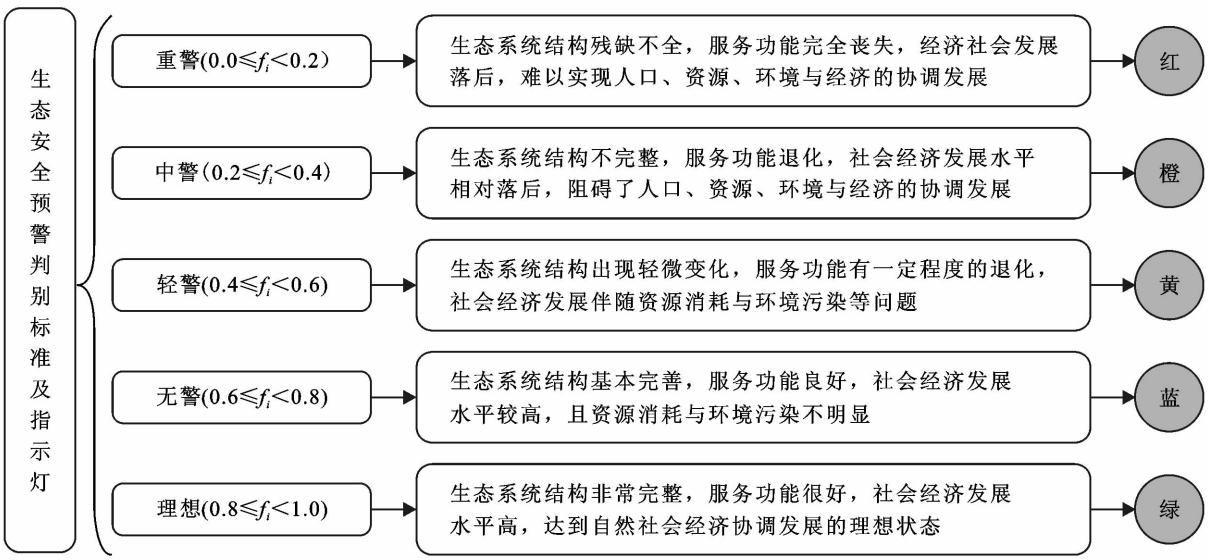


图 1 研究区生态安全预警判别标准及指示灯

3 忻州现状年生态安全警情状况

分析忻州市 2018 年生态安全警情，由图 2—3 可知，全市 14 县（市区）综合预警值介于 0.356 2～0.587 0，平均值为 0.491 2，预警等级处于中警至轻警范围内。其中忻府区、定襄、五台、繁峙、静乐 5 区县警情为中警状态，其余 7 县均为轻警状态，没有无警或理想的区域。由此可见，忻州市整体生态安全并不乐观。

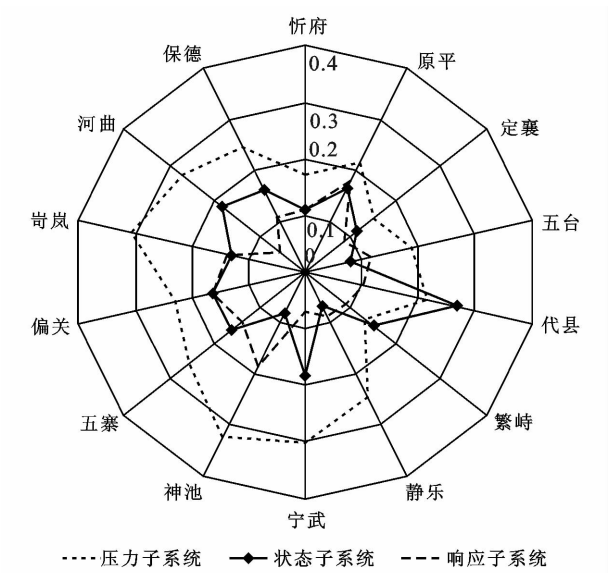


图 2 忻州市 2018 年各县子系统生态安全预警格局

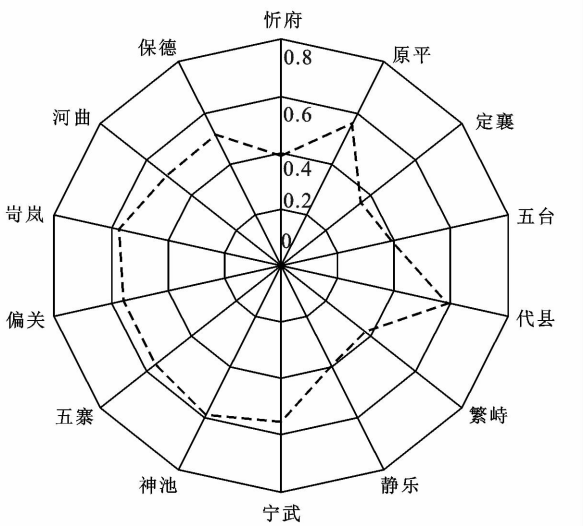


图 3 忻州市 2018 年各县生态安全预警格局

从系统压力来看，预警值小于 0.2 的县有忻府区、定襄、五台、繁峙。预警值越小警情越重。上述 4 县均处于滹沱河流域内，该区域自古人口稠密，约占全市人口的 56.1%，人口密度高于全市区平均水平。地处忻定盆地腹地，滹沱河灌区为全省 6 大自流灌区之一，水资源消耗中约 70%用于农业灌溉，万元 GDP 用水量达 140 m^3/万元，高于全市平均水平 94 m^3/万元。从全省生态功能区划来看，该区域为滹沱河农业发展与城镇聚集区，人均 GDP 与 GDP 年均增长率相对较高，是全市社会经济发展较快的区域。从环境压力指数来看，忻州区、原平、定襄、代县、繁峙万元 GDP 废污

水排放量分别为 7.24,5.42,3.73,6.48,7.90 m^3/万元,高于全市平均水平(全市为 4.90),2018 年原平与代县 SO_2 排放量分别为 24 523 t 和 13 256 t,忻府区与原平氮氧化物排放量 9 652 和 17 535 t,忻府区与原平烟粉尘排放量 19 722 和 22 003 t,上述地区污染物排放量绝对数量位于全市区前列。由此可见,滹沱河区为全市生态安全压力最大的区域。

从系统状态来看,警情相对严重的区域为五台、静乐、神池,系统状态预警值小于 0.1。生态状态要素表现为:静乐、神池水土协调率指标分别为 2.55% 和 1.48%,两县农业以旱作农业和畜牧业为主,水浇地极少。五台水土流失治理率为全市最低仅为 37.21%,从人类干扰指数看,神池也最大值达到 41.71%,神池以种植粗粮和旱作蔬菜为主,地势平缓,形成了集中连片种植区,面积达到 6.07×10^4 hm^2。资源状态要素表现为:神池粮食人均产量达到 1 208 kg/人,全市相对较高。由此可见,上述 3 县为全市生态安全状态警情最大的区域。

从系统响应来看,警情相对严重的区域为忻府区、五台、代县、繁峙、静乐、宁武、河曲和保德县。系统响应预警值小于 0.1。以环境响应指数表现最为显著,根据 2018 年忻州市环境保护状况公报显示,忻州城区环境空气质量综合指数 6.09,在山西省排名第 4 位,污染综合指数介于 4.11～7.26 之间(指数越大污染越重)。虽环保投资率随逐年上升,但与国内平均水平相比整体投入偏低。系统响应警情相对较大。

4　忻州生态安全预警的趋势分析

由图 4 可知,2000—2018 年忻州市生态安全预警值呈波动缓慢上升趋势,整体上由预警值从 0.4 线下上升超过 0.4,预警级别由中警下降到轻警,但社会经济发展伴随资源消耗与环境污染等问题依然存在。2018 年预警等级中轻警县达到 10 个,中警有 4 个,没有无警、理想等级。全市整体生态安全警情趋于改善,但生态安全等级较低。

从时间序列来看,2000 年忻州市社会经济发展开始进入快速增长期,预警值界于 0.25～0.48 之间,其中代县、静乐、宁武、神池、五寨、偏关、河曲、保德等 8 县达到中警等级。到了 2005 年预警值界于 0.25～0.48 之间,中警等级县达到 10 个,生态环境恶化趋势空间范围扩大。2010 年预警值范围为 0.32～0.45,中警等级县达下降至 8 个,随着 2013 年煤碳能源市场的不景气,全市煤炭市场黄金 10 a 开始结束,经济下行压力增大,以及退耕还林草程 15 a 的实施。到 2014 年时生态安全预警值整体上升,界于 0.35～0.51 之间,中警等级的县区缩小到 4 个。2018 年预警值上限达到 0.59,“十三五”末期,个别县区很可能达到无警状态,整体上全市生态安全警情趋于降低。生态安全预警值的变化主要取决于系统压力变化。而系统状态、响应较为稳定。2000—2018 年忻州市 14 县经济有了长足发展,GDP 年均增长、人均 GDP 有了很大提升。万元 GDP 用水量、能耗、废污水排放量、SO_2 排放量、氮氧化物排放量、烟粉尘排放量有所减少。响应层的空气综合染污指数有所下降,环保投资率有所提升,生态环境有所改善。

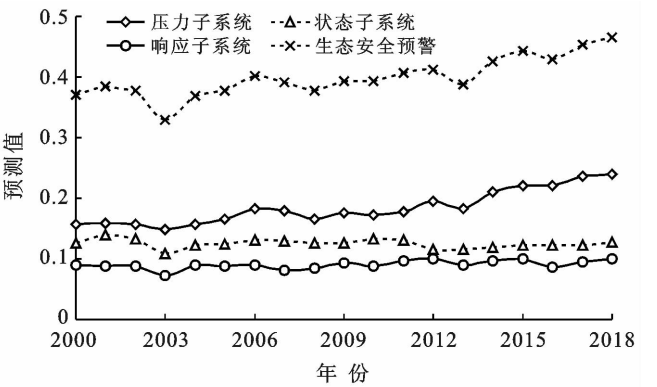


图 4　忻州市生态安全预警值发展趋势

5　讨论与结论

5.1　讨 论

忻州市是典型的能源—生态复合区,以资源和生态承载力的文献探讨较多[20-24]。目前全市生态环境得到了阶段性改善,但总体形式仍不容乐观,且区域内部差异明显,为了更好地优化全市 14 县(区)生态环境,将全市分为两大区域,滹沱河流域 6 县和黄河流域 8 县,对不同的发展区域分别采取差异化的生态管理措施。

滹沱河流域 6 县(区)的忻府区、原平、定襄、五台、代县、繁峙应采取合理的人口政策,优化城镇结构,限制无节制的农业用水,提升二、三产业用水与生态用水量;优化产业结构,持续降低经济发展能耗,重点治理三废排放企业,确保不越环保红线;统筹土地资源的开发利用,积极开展土地整治,缩小人类干扰范围,探寻生态农业发展的新思路;结合京津风沙源治理工程,提升水土流失治理率,加大环水利保投资率,忻定盆地持续提升农业机械化水平。忻府区、原平两个省级经济开发区要积极发展“飞地经济”,开拓发展新空间,在新技术引进、新产业开发上当好排头兵。实施工业能效提升计划,全面提高重点行业和重

点用能企业的节能水平。坚持最严格的节约用地制度,严格土地用途管制,推广应用节地技术和模式。建立健全用能权、用水权、排污权、碳排放权初始分配制度,建立预算管理制度、有偿使用和交易制度,更多用市场手段实现双控目标。政策上,要调整完善县域经济考核办法,根据县域经济发展特点,动态调整考核指标,不求面面俱到。约束性指标必须考核,不折不扣完成。

五台、代县、繁峙集约高效利用资源。坚决杜绝私挖乱采铁矿资源,运用先进技术对传统开采方法进行改造,发展绿色矿业,提高矿产资源开采回采率、选矿回收率和综合利用率,加强劣质低阶煤、低品位矿产资源和可替代资源的开发利用。

黄河流域 8 县宁武、静乐、神池、五寨、岢岚、河曲、保德和偏关县为国家级限制开发的重点生态功能区,要坚持生态优先、适度发展原则,实行产业准入负面清单,落实生态红线,增强生态服务功能,加强保护,合理开发,建设生态畜牧经济区,继续实施退耕还林,加大生态建设转移支付力度。加强区域内以县城和中心城镇为依托的生态型社区建设,发展不与生态保育主体功能相冲突的生态型产业发展,适度集聚人口。继续加强生态建设,最大限度地维护生态系统的稳定性和完整性。

静乐、宁武、河曲、保德为忻州市煤炭主产区,统筹经济发展与环境保护的关系,注重生态恢复与重建,对采矿塌陷区和水土流失区进行治理;推动煤炭等化石能源清洁高效利用,大力发展水能、风能、太阳能、生物质能等清洁能源,逐步提高非化石能源比重。加大煤层气开发力度,开发利用好晋北唯一的河(曲)保(德)煤层气,推广煤层气开发利用绿色低碳技术,积极推进先抽后采。严格控制高碳行业发展规模,加强高能耗行业能耗管控,加快推广应用低碳技术,有效控制电力、化工、铝工业等重点行业碳排放。对晋西北旱作农业种植区神池、五寨、偏关、岢岚生态安全警情相对较小,着重引进先进的农业生产技术,提高农业产品附加值;结合退耕还林政策,减少人类的对土地干扰,提高生态用地面积;发展风电能源,持续保持低环境压力。

总体上,全市应对已有生态功能区进一步细化,建立快速有效的监测体系,提升脆弱区的生态安全预警。

5.2 结 论

(1) 2014 年忻州市 14 县(市区)综合预警值介于 0.356 2~0.587 0 之间,平均值为 0.491 2,预警等级处于中警至轻警范围内。其中忻府区、定襄、五台、繁峙、静乐 5 区县警情为中警状态,其余 7 县均为轻警状态,忻州市生态安全空间上呈现不均衡性,整体生态安全并不乐观,生态安全等级较低。

(2) 2000—2018 年忻州市生态安全预警值呈波动缓慢上升趋势,警情为中警等级的县减少,轻警等级的县增加。警情趋于改善主要取决于系统压力中的经济、资源、环境压力趋缓。空气综合染污指数有所下降,环保投资率有所提升,综合环境管理能力提升,生态环境有所改善。

(3) 本研究仅对当前的生态安全预警进行讨论,未对未来几年进行有效预测。在以后实证研究中可应用神经网络模型中的 BP 模型和径向基函数模型对未来一段时间预测。

[参 考 文 献]

[1] 陈东方,陈建国. 建设工程进度预警及其模型构建的研究与应用工程管理学报[J]. 工程管理学报,2010,24(3):318-322.

[2] Munn R E. Global environmental monitoring system (GEMS): Action plan for phases [M]. California: Available from SCOPE Secretariat, 1973.

[3] Mitra C, Kurths J, Donner R V. An integrative quantifier of multistability in complex systems based on ecological resilience [J]. Scientific Reports, 2015,5:16196.

[4] Xi Weidong, Sun Yonghai, Tian Xiaona, et al. Research on the safety risk structure and early warning system of agriculture with illustrations of production of live pigs to farmers [J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2010,1:462-468.

[5] 高春泥,程金花,陈晓冰,等. 基于灰色关联法的北京山区水土保持生态安全评价[J]. 自然灾害学报,2016,25(2):71-77.

[6] 庄伟,廖和平,杨伟,等. 城郊土地生态安全预警系统设计与关键技术研究:以重庆市长生桥镇为例[J]. 西南大学学报,2014,36(2):117-123.

[7] 吴大放,姚漪颖,刘艳艳,等. 耕地生态安全动态变化研究:以广州市番禺区为例[J]. 生态科学,2016,35(5):160-168.

[8] 徐美. 湖南省土地生态安全预警及调控研究[D]. 湖南长沙:湖南师范大学,2013.

[9] 陈美婷,匡耀求,黄宁生,等. 基于 RBF 模型的广东省土地生态安全时空演变预警研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):217-224.

[10] 周迎雪,孙仪阳,李进涛,等. 基于 PSR-TOPSIS 模型的山东省土地生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报,2016,33(2):1-7.

[11] 马耘秀,董翼驹. 基于 PSR 模型的太原市土地资源生态安全评价[J]. 山西农业科学,2016,44(6):817-821.

(下转第 298 页)

[14] Song Wei, Deng Xiangzheng. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 576(1): 705-719.

[15] Li Chenxi, Wu Kening, Wu Jingyao. Urban land use change and its socio-economic driving forces in China: A case study in Beijing, Tianjin and Hebei region [J]. Environment, Development and Sustainability, 2018, 20(3): 1405-19.

[16] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用变化特征及驱动机制[J].经济地理,2015,35(5):148-54.

[17] 黎景良,后斌,危双峰,等.基于 DEM 的广东省山区土地利用变化分析[J].测绘通报,2007(6):53-7.

[18] 张丽,杨国范,刘吉平.1986—2012 年抚顺市土地利用动态变化及热点分析[J].地理科学,2014,34(2):185-91.

[19] 吴明发,欧名豪,廖荣浩.经济发达地区土地利用变化及其驱动力分析:以广东省为例[J].水土保持研究,2012,19(1):179-183.

[20] 广东省人民政府地方志办公室. 广东省自然地理概况[EB/OL]. 2019-03-13[2019-09]. http://www.gd.gov.cn/zjgd/sqgk/zrdl/index.html.

[21] 国家统计局.广东省年度数据[EB/OL]. [2019-09]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm? cn=E0103.

[22] 李炳元,潘保田,程维明,等.中国地貌区划新论[J].地理学报,2013,68(3):291-306.

[23] 查轩,黄少燕,陈世发.退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系:基于 GIS 的研究[J].自然灾害学报,2010,19(2):32-9.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T15772-2008 水土保持综合治理规划通则[S].北京:中国标准出版社. 2009.

[25] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-7.

[26] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-50.

[27] 徐岚, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报,1993, 4(3):272-277.

[28] 谭学瑞,邓聚龙.灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J].统计研究,1995,12(3):46-8.

(上接第 290 页)

[12] 黄海,谭晶今,陈春,等.基于 TOPSIS 方法的山东省土地生态安全动态评价[J].水土保持研究,2016,23(3):220-224.

[13] 张玉泽,任建兰,刘凯,等.山东省生态安全预警测度及时空格局[J].经济地理,2015,32(11):166-171.

[14] 徐成龙,程钰,任建兰,等.黄河三角洲地区生态安全预警测度及时空格局[J].经济地理,2014,34(3):149-155.

[15] 高宇,曹明明,邱海军,等.榆林市生态安全预警研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(9):57-62.

[16] 张秋霞,张合兵,刘文锴.新郑市耕地生态安全动态预警研究[J].水土保持研究,2017,24(1):256-264.

[17] 刘小波,秦天彬,周宝同,等.基于改进 SPA 的乐山市耕地生态安全评价[J].西南师范大学学报(自然科学版),2016,41(3):147-154.

[18] 张永利,吴宜进,王小林,等.内蒙古贫困地区生态安全评价及空间格局分析[J].地球信息科学学报,2016,18(3):325-333.

[19] 樊鹏飞,段朋辉,刘志丹,等.土地生态安全评价与障碍因子诊断:以河南省周口市为例[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(2):207-213.

[20] 赵鹏宇,郭劲松,崔嫱,等.忻州市相对资源承载力的时空动态变化[J].水土保持研究,2017,24(2):341-347.

[21] 赵鹏宇,步秀芹,崔嫱,等.2004—2013 忻州市生态足迹和承载力变化[J].水土保持研究.2017,24(4):373-378.

[22] 赵鹏宇,刘晓东,步秀芹,等.忻州市相对资源承载力的空间结构差异:基于相对资源承载力模型的改进[J].资源与产业,2017,19(3):60-66.

[23] 赵鹏宇,郭劲松,刘秀丽,等.基于生态足迹模型修正的忻州市生态承载力空间差异变化[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):41-50.

[24] 薛慧敏.忻州市生态安生预警与调控研究[D].山西 临汾:山西师范大学,2018.